

HISTOIRE DES IDÉES SUR LA LUMIÈRE DE L'ANTIQUITÉ AU DÉBUT DU XX^e SIÈCLE

Le texte qui suit retrace l'évolution des idées sur la lumière de l'Antiquité au début du XX^e siècle. Il a été rédigé à partir de documents originaux et s'appuie sur de nombreuses citations. C'est à partir de ce texte de 160 pages qu'a été extraite la partie « Histoire » du cédérom *Histoire des idées sur la lumière, de l'Antiquité au début du XX^e siècle*. Ce texte a bénéficié des remarques de Gisèle Krebs et de Bernard Maitte.

Le cédérom « Histoire des idées sur la lumière » (C. Bracco, G. Krebs, R. Charrier, F. Albrecht) qui a été réalisé à partir de ce texte, a obtenu la prix Arnulf-Françon de la SFO (co-lauréat 2005). J'en remercie une nouvelle fois vivement la SFO. Il a également obtenu le label RIP (Reconnu d'Intérêt Pédagogique) et a fait partie de la sélection 2004 du prix Roberval. Il figure aujourd'hui parmi les ressources de la clé USB « Une clé pour démarrer » distribuée annuellement par le ministère aux nouveaux enseignants de physique-chimie. Dans le cédérom, figurent une trentaine d'expériences d'optique filmées et scénarisées, qui sont des transpositions modernes d'expériences historiques reprises dans l'enseignement. Des compléments philosophiques permettent de situer les connaissances scientifiques dans un cadre plus vaste. Le cédérom a été édité par le CRDP de Nice en 2004 et est diffusé dans le réseau Scérén du CNDP.

Depuis 2004, je travaille avec Jean-Pierre Provost, professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, sur les quanta et la relativité. Nos travaux ont donné lieu à toute une série d'articles, à destination des enseignants du second degré et du supérieur, des physiciens théoriciens et des historiens de la physique. Vous en trouverez la liste ci-dessous. Ils viennent compléter, et réactualiser, la dernière partie du présent texte (p. 128-154).

Je me tiens à votre disposition pour toute remarque éventuelle.

Nice, septembre 2008.

Christian Bracco

cbracco@unice.fr

Maître de Conférences à l'IUFM de Nice

UMR Fizeau, Université de Nice-Sophia Antipolis

Chercheur Associé à l'équipe Histoire de l'Astronomie, Syrte, Observatoire de Paris.

Quanta

J.-P. Provost et C. Bracco, Einstein's quanta and the « true » volume dependence of the black body entropy, *European Journal of Physics*, 29 5 (2008), 1085-1091

C. Bracco, J.-P. Provost, The quanta in Einstein's 1905 relativity theory, in *Albert Einstein Century Anniversary*, Paris (France), juillet 2005, *AIP Conference Proceedings*, Alimi-Füfza éditeurs, (Melville : New York, 2006) vol. 861, 1076-1080.

C. Bracco, J.-P. Provost, Quanta de Planck, d'Einstein et d' « aujourd'hui », *Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales*, n° 210, avril 2005, p.21-38 et *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 877-878, octobre/novembre 2005, p. 909-928.

B. Raffaelli, J.-P. Provost, C. Bracco, Un problème d'oscillateurs : la formule de Planck, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 885, p. 735-739.

Relativité

J.-P. Provost, C. Bracco, La théorie de la relativité de Poincaré de 1905 et les Transformations Actives, *Archive for History of Exact Sciences*, 60 (2006), 337-351

C. Bracco, J.-P. Provost, La relativité de Poincaré de 1905, *Théorie quantique des champs : Méthodes et applications*, Actes de l'école de physique théorique de Jijel, 2006, Boudjedaa-Makhlouf éditeurs, *Collection Travaux en cours* (Paris : Hermann, 2007), vol. 68, 323-354.

J.-P. Provost, C. Bracco, G. Sanguinetti, Poincaré et l'éther relativiste, *Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales*, 211, juillet 2005, p.11-3

I. LA VISION DANS L'ANTIQUITE.	5
I.1 Lucrèce et le point de vue des atomistes.	5
I.2 Platon et la rencontre de deux « feux ».	7
I.3. Aristote et la théorie de la propagation.	8
I.4. Euclide : le rayon lumineux. Théon d'Alexandrie.	10
I.5. Héron d'Alexandrie : le plus court chemin.	13
I.6. Galien et le rôle de l'œil.	14
I.7. Ptolémée et la mesure physique.	14
II. LA LUMIERE DANS LA SCIENCE ARABE.	15
II.1. Al-Kindi	15
II.2. Ibn Sahl et la réfraction.	15
II. 3 Ibn Al-Haitham : la formation des images.	16
III. L'EPOQUE MEDIEVALE.	20
III.1. Robert Grosseteste.	21
III.2. Roger Bacon.	21
IV. L'EXPLOSION DES CONNAISSANCES.	24
IV.1. Della Porta.	24
IV.2. Galilée : la lunette astronomique.	24
IV.3. Kepler et l'optique.	26
V. UNE OPTIQUE MECANISTE ET FORMALISEE.	28
V.1. Descartes et le modèle mécanique de la lumière.	28
V.2. Fermat et la théorie du temps le plus bref.	33
V.3. Leibniz et la voie la plus aisée.	36
VI. DECOUVERTE DE LA DIFFRACTION.	37
VII. UN MODELE ONDULATOIRE DE LA LUMIERE	42
VII.1. Hooke : l'impulsion lumineuse.	42
VII.2. Huygens : surfaces d'ondes.	47

VIII. UNE PREMIERE MESURE INDIRECTE DE LA VITESSE DE LA LUMIERE..	53
IX. L'OPTIQUE DE NEWTON.	55
IX.1. L'attraction universelle.	55
IX.2. Les couleurs.	57
IX.3. Les « lames minces ».	60
IX.4 . L' « inflexion de la lumière ».	62
X. LA LUMIERE AU SIECLE DES LUMIERES.	63
X.1. Bradley et la vitesse de la lumière.	63
X.2. Maupertuis : genèse du principe de moindre action.	65
X.3 Euler.	70
X.3.1. Euler et le principe de moindre action.	70
X.3.2. Euler et la lumière.	71
X.4. Nicolas de Malebranche.	71
X.5. Modèles corpusculaires et ondulatoires.	72
XI. UN NOUVEAU PHENOMENE? LA POLARISATION DE LA LUMIERE.	73
XII. LES INTERFERENCES DE LA LUMIERE.	77
XIII. FRESNEL ET LE TRIOMPHE DE LA THEORIE ONDULATOIRE.	79
XIII.1. Fresnel : une nouvelle théorie ondulatoire.	79
XIII.2. Diffraction et Interférences.	80
XIII.3. Lumière polarisée.	90
XIII.4. Une nouvelle théorie ondulatoire.	92
XIII.5. L'entraînement de l'éther par les corps en mouvements.	94
XIII.6. Conclusion sur les travaux de Fresnel.	98
XIV. LES VERIFICATIONS EXPERIMENTALES.	98
XIV.1. L' « expérience cruciale » de Léon Foucault.	98
XIV.2. Les travaux d'Hippolyte Fizeau.	101
XIV.2.1 La mesure directe de la vitesse de la lumière.	101
XIV.2.2 Fizeau et l'entraînement de l'éther.	103

XIV.2.3. L'effet Doppler-Fizeau.	107
XV. LA SYNTHÈSE ELECTROMAGNETIQUE ET LA LUMIERE.	110
XV.1. Maxwell, l'analogie, et les mathématiques.	111
XV.2. Le point de vue historique.	112
XVI. L'EXPERIENCE DE MICHELSON.	124
XVII. NAISSANCE DE LA THEORIE DE LA RELATIVITE RESTREINTE.	128
XVII.1. Introduction : les principes de la mécanique newtonienne.	128
XVII.2. La théorie de Lorentz.	129
XVII.3. Henri Poincaré et le principe de relativité.	131
XVII.4. Einstein : les principes de la théorie de la relativité restreinte.	134
XVIII. PLANCK ET LA QUANTIFICATION.	136
XVIII.1. Le second principe de la thermodynamique.	136
XVIII.2. Le « corps noir ».	137
XVIII.3. Planck et le problème du corps noir.	138
XVIII.4. Nouvelles données expérimentales et nouvelles difficultés.	139
XVIII.5. L'article où Planck introduit la quantification.	141
XVIII.6. Quelques approfondissements.	145
XIX. EINSTEIN ET LES QUANTA.	147
XIX.1. Les quanta lumineux.	147
XIX.2. Doutes d'Einstein à propos des quanta.	154
XIX.3. « Théorie quantique » du rayonnement.	154
XIX.3.1 Du modèle atomique de Rutherford au modèle atomique de Bohr.	154
XIX.3.2. Einstein et la Théorie Quantique du rayonnement.	157
XIX.3.3. L'effet Compton et les quanta.	160
XX. BIBLIOGRAPHIE.	164

I. La vision dans l'Antiquité.

I.1 Lucrèce et le point de vue des atomistes.

Lucrèce (98-55) reprend les théories atomistes de **Démocrite** (460-470) et d'**Epicure** (341-270). Le monde est constitué d'atomes insécables qui constituent les parties ultimes de la matière. Ce monde est en perpétuel mouvement. Lorsque périclète un corps ses atomes se combinent à d'autres pour former de nouveaux corps. Les atomistes sont conduits à formuler une théorie de la vision, qui à l'exemple du toucher, s'accomplit par l'action matérielle d'un corps sur un autre. Ainsi, la réplique fidèle d'un objet constituée *matériellement* d'atomes émis par sa surface, se détache et se propage dans l'espace jusqu'à l'observateur. L'existence de ces *simulacres* trouve un support dans l'observation de la nature, par exemple les mues de certains animaux. C'est ce que décrit Lucrèce :

Cit. De tous les objets il existe ce que nous appelons les *simulacres*, sorte de membranes légères détachées de la surface des corps, et qui voltigent en tous sens parmi les airs... *Les simulacres, visions et terreurs dont ils sont la cause. Livre IV.*

Je dis donc que des figures et des images subtiles sont émises par les objets, et jaillissent de leur surface : ces images, donnons leur par à peu près le nom de *membranes* ou *d'écorces*, puisque chacune d'elle a la forme et l'aspect de l'objet, quel qu'il soit, dont elle émane pour errer dans l'espace. Ceci, grâce à mon raisonnement, l'esprit le plus obtus le pourra comprendre.

Tout d'abord, parmi les objets à la portée de nos sens, on en voit beaucoup émettre de leurs éléments : de ceux-ci, les uns se dissipent et se résolvent dans les airs, comme la fumée de bois vert ou la chaleur de la flamme ; les autres au contraire sont d'une texture plus serrée : telles les rondes tuniques qu'à l'été abandonnent les cigales, les membranes dont les veaux se défont en naissant, ou encore la robe que le serpent visqueux quitte au milieu des ronces – dépouille flottante dont souvent nous voyons s'enrichir les buissons. Puisque de tels phénomènes se produisent, une image impalpable doit également émaner des corps et se détacher de leur surface.

Preuve de l'existence des simulacres. Livre IV.

La persistance d'un objet à la vue implique que ces éléments superficiels s'écoulent et rayonnent sans relâche de tous les objets.

L'une des caractéristiques physiques de la vision est son caractère « instantané ». Les simulacres doivent être générés avec une extrême rapidité. Ainsi Lucrèce écrit

Cit. ... nombre de ces éléments minuscules, se trouvant à la surface des corps, peuvent la quitter sans modifier leur ordre, sans changer d'aspect, et avec une vitesse d'autant plus grande que, placés en première ligne, peu d'entre eux rencontrent des obstacles sur leur route. *Preuve de l'existence des simulacres. Livre IV.*

Pour Lucrèce ces simulacres ont une vitesse supérieure à celle de la lumière du Soleil qui provient des « profondeurs intimes » de l'astre. Il tente une justification expérimentale qualitative un peu naïve

Cit. Voici encore une preuve convaincante de la vitesse qui emporte les simulacres : place la nuit un miroir d'eau sous un ciel étoilé ; tout aussitôt les astres éclatants qui illuminent le ciel viennent s'y refléter. Vois-tu maintenant que l'image descend immédiatement des régions du ciel jusqu'aux régions terrestres ? *Rapidité de formation et vitesse des simulacres. Livre IV.*

Que se passe-t-il si les simulacres rencontrent un obstacle à leur propagation? Leur comportement dépend de la nature de l'obstacle: ils peuvent le traverser, s'y abîmer ou en être repoussés :

Cit. Rencontrent-ils des corps poreux, ils les traversent, telle notamment l'étoffe ; mais s'ils se heurtent aux aspérités d'une roche, ou à du bois, ils s'y déchirent, sans pouvoir produire d'image. Enfin un objet brillant et compact, comme l'est un miroir, s'oppose-t-il à leur marche, rien de semblable n'arrive. Ils ne peuvent le traverser comme l'étoffe, ni s'y déchirer : le poli de ces corps assure leur salut. Voilà pourquoi de telles surfaces nous renvoient les images. Aussi soudainement que tu veux, en n'importe quel temps, présente au miroir n'importe quel objet, toujours apparaît l'image... Ainsi donc une foule de simulacres s'engendre en un instant, et l'on peut à bon droit dire que leur naissance est rapide. *Rapidité de formation et vitesse des simulacres. Livre IV.*

La théorie rend compte, du moins très qualitativement, de la possibilité de la réflexion des simulacres dans un miroir : le poli de celui-ci ne les dénature pas. Pour expliquer ce fait, Lucrèce développe une l'argumentation suivante :

Cit. Ainsi en est-il de l'image ; une fois projetée par le miroir, elle chasse et pousse devant elle, en se dirigeant vers nos regards, la couche d'air interposée entre elle et nos yeux et nous en donne la sensation avant celle du miroir. Mais à peine avons-nous aperçu le miroir lui-même, qu'immédiatement une image venue de nous parvient à celui-ci, et, reflétée par lui, revient jusqu'à nos yeux ; et, comme, dans sa marche, elle déplace en avant d'elle une autre couche d'air, qu'elle nous fait voir tout d'abord, elle nous semble ainsi reculée au-delà du miroir, à sa distance exacte. Aussi, je le répète encore, rien d'étonnant que l'image nous apparaisse avec son recul dans le miroir, puisque, dans ce cas comme dans le précédent, l'impression est l'effet d'une double colonne d'air. *Théorie du miroir. Livre IV.*

Dans ce monde en perpétuel mouvement, les simulacres qui se croisent peuvent se recombinaer au gré de leurs rencontres et former des êtres qui n'existent pas, qui viennent frapper notre esprit, d'où des *visions de l'esprit* : fantômes, chimères ...

Un phénomène physique important, difficile à analyser, est la couleur des objets. Dans le cadre de la théorie atomiste, un atome n'a pas de couleur en soi. La couleur n'est pas un attribut de l'atome. Elle dépend du mouvement et de l'agencement des atomes.

Quant au fait que l'on ne peut voir la nuit, Lucrèce invoque que

Cit. En revanche, de la lumière nous ne pouvons voir dans les ténèbres ; car l'air obscur qui se trouve derrière le jour, étant plus épais, bouche toutes les ouvertures, obstrue les canaux des yeux, si bien que le choc d'aucun simulacre ne saurait ébranler la vue. *Phénomènes divers de la vision. Livre IV.*

Un des problèmes que rencontre la théorie des simulacres est que le mécanisme de la vision nécessite l'introduction d'une donnée « extérieure » à cette théorie, qui n'a d'autre justification que de se plier à l'évidence : on voit. Comment le simulacre d'une montagne peut-il entrer dans l'œil ? Il faut supposer qu'il rétrécit au cours de sa propagation, suivant la *pyramide visuelle*, dont le sommet est dans l'œil de l'observateur et la base sur l'objet. Cette

affirmation constitue un postulat de la théorie. Pour divers observateurs, situés à des distances différentes d'un objet, il faut donc faire l'hypothèse que les simulacres émis par l'objet se comportent différemment suivant les observateurs. D'une certaine manière, l'œil de l'observateur joue un rôle actif indirect dans cette théorie puisqu'il conditionne les caractéristiques de la pyramide visuelle dans laquelle doit s'inscrire le simulacre pour parvenir à l'œil. Cette hypothèse est discutable ; aussi, d'autres théories que la théorie atomiste sont proposées.

I.2 Platon et la rencontre de deux « feux ».

Platon (427-348) donne une description de sa cosmologie par la voix de *Timée*. Il explique la genèse du monde de la formation des astres à l'homme. La vision résulte d'une communion entre le *feu extérieur* du monde qui nous entoure et celui qui compose notre âme, le feu étant le plus subtil des quatre constituants élémentaires du monde sublunaire. Platon tente une explication de la vision en conférant un rôle actif à l'œil qui devient émetteur d'un *feu* visuel qui va à la rencontre du *feu* qui peut provenir de ceux-ci, à la faveur de la lumière du jour. De cette rencontre du *semblable* naît la vision :

Cit. Entre tous instruments, ils [les Dieux] ont façonné en premier lieu les yeux porteurs de lumière ... Cette sorte de feu, qui n'est point capable de brûler, mais seulement de fournir une douce lumière, ils ont fait par leur art qu'elle devînt, chaque jour, un corps approprié. A cet effet, ils ont fait en sorte que le feu pur qui réside au-dedans de nous et qui est frère du feu extérieur, s'écoulât au travers des yeux de façon subtile et continue. Mais ils ont épaissi tout l'œil et spécialement le centre de l'œil, de façon qu'il ne laissât rien échapper du reste du feu le plus grossier, mais laissât seulement filtrer un tel feu parfaitement pur. Lors donc que la lumière du jour entoure ce courant de vision, le semblable rencontre le semblable, se fond avec lui en un seul tout, et il se forme, selon l'axe des yeux, un seul corps homogène. De la sorte, où que vienne s'appuyer le feu qui jaillit de l'intérieur des yeux, il rencontre et choque celui qui provient des objets extérieurs. Il se forme ainsi un ensemble qui a des propriétés uniformes dans toutes ses parties, grâce à leur similitude. Et si cet ensemble vient à toucher lui-même quelque objet, ou à être touché par lui, il en transmet le mouvement à travers le corps tout entier, jusqu'à l'âme, et nous apporte cette sensation, grâce à laquelle nous disons que nous voyons. 45c-d.

L'obscurité provient de ce que le feu intérieur n'a plus de semblable avec lequel s'unir :

Cit. Mais lorsque le feu extérieur se retire pour la nuit, le feu intérieur se trouve séparé de lui : alors, s'il sort des yeux, il tombe sur un élément différent de lui ; il se modifie et s'éteint, puisqu'il cesse d'être de même nature que l'air environnant, lequel n'a plus de feu. Il cesse alors d'y voir et ainsi amène le sommeil. 45 e.

La théorie du rayon visuel requiert, pour pallier une opposition légitime et se plier à l'évidence des faits, une hypothèse très forte : la présence d'un feu extérieur pour expliquer que l'on voit les objets à la lumière et qu'on ne les voit pas dans la nuit. Cette hypothèse est si forte qu'elle peut susciter le questionnement de savoir si l'existence du rayon visuel elle-même n'est pas superflue.

Platon avance une explication qualitative de la réflexion dans les miroirs plans:

Cit. Quant à l'origine des images que donnent les miroirs et toutes surfaces brillantes et polies, il n'est plus difficile après cela de la comprendre. En effet, par suite de

l'affinité réciproque du feu intérieur et du feu du dehors, chaque fois que l'un d'eux rencontre la surface polie et vient s'y appliquer à nouveau plusieurs fois successives, toutes les apparences de ce genre se manifestent nécessairement, parce que le feu extérieur, qui se trouve proche du visage, se colle étroitement au feu de la vision, contre la surface brillante et lisse. Mais alors ce qui est à gauche apparaît à droite. En effet c'est aux parties opposées du feu visuel que viennent s'appliquer les parties opposées du feu extérieur, contrairement à ce qui a lieu d'ordinaire dans l'émission. 46b.

I.3. Aristote et la théorie de la propagation.

Aristote (384-322) expose sa théorie de la vision dans le traité *De l'Ame*. Dans la partie consacrée aux sens, Aristote développe une étude théorique de la lumière, très subtile, fondée sur la notion de *milieu*. Au début du XIX^{ème} siècle, Thomas Young, en découvrant les interférences de la lumière, fera référence à la théorie des milieux d'Aristote, même si la théorie qu'il développe n'a plus rien à voir avec celle d'Aristote.

Il n'y est plus question de rayon visuel, et dans la théorie aristotélicienne, ce que l'on voit correspond à un *ébranlement* se propageant de l'objet à l'œil. Les milieux transparents, comme l'air et l'eau, ont une *qualité* commune ; ils contiennent « une certaine nature identique », Aristote écrira dans le *De Sensu* « une certaine puissance commune à tous » : il les nomme *diaphanes*. Un diaphane « n'est pas visible par soi », à la différence d'un objet. Il a deux états possibles : il peut être diaphane en puissance ou en acte. « Là où le diaphane n'est qu'en puissance se trouve l'obscurité ». Une source de lumière, composée de « feu » dans notre monde terrestre, « actualise » le diaphane, le faisant passer de son état de diaphane en puissance à celui de diaphane en acte. Le diaphane est dit en *entéléchie* grâce à l'action du feu. Il subit un changement d'état. « La lumière », quant à elle, « n'est pas le feu ». « La lumière en est l'acte » [du diaphane] et « est en quelque sorte la couleur du diaphane ». Ainsi, « c'est la même nature qui est tantôt obscurité, tantôt lumière ». Quant à « l'objet de la vue, c'est le visible » qui est « la couleur » dont Aristote donne la nature

Cit. Toute couleur met en mouvement le diaphane en acte et c'est cela qui constitue sa nature. C'est pourquoi la couleur n'est pas visible sans lumière et c'est seulement dans la lumière que l'on voit la couleur de chaque objet...

Mais en réalité la couleur met en mouvement le diaphane, l'air par exemple, et celui-ci met à son tour l'organe sensoriel avec lequel il est en contact.

« C'est moyennant une passion subie par l'organe que se produit la sensation » et celle-ci doit être « imprimée par le milieu », et de conclure « un milieu est donc nécessaire ». Cette théorie des milieux s'oppose à celle des atomistes pour lesquels la vision à travers le « vide » est possible : en effet les simulacres n'ont pas besoin de support pour se propager. La « mise en mouvement » constitue pour Aristote un « ébranlement » pour lequel on peut trouver l'analogie pour le son et l'odeur.

Dans le *De Sensu des Parvia Naturalia* qui font suite à *De l'Ame*, Aristote complète cette analogie

Cit. Les sensations qui procèdent par l'intermédiaire d'un milieu extérieur appartiennent à ceux des animaux qui ont la faculté de locomotion : ce sont celles de l'odorat, de l'ouïe et de la vue. *De sensu, I*.

D'autre part, dans un diaphane illimité, il ne pourrait y avoir que de la lumière, qui lui est inhérente, mais pas de couleur car celle-ci est « la limite du diaphane dans un corps de forme déterminée » : la couleur s'identifie avec la surface des objets.

S'interrogeant sur l'instantanéité de la vision, Aristote est tout d'abord très prudent

Cit. ... tout mobile se meut d'un point de départ à un point d'arrivée, et, par suite, il doit y avoir un certain temps durant lequel il se meut d'un des points vers l'autre. Or tout temps donné est divisible, de telle sorte qu'il y aurait un moment où le rayon lumineux voyagerait dans le milieu intermédiaire. *De Sensu VI, 446a 25-30.*

S'il en est bien ainsi pour le son et l'odorat, il y a lieu de reformuler la question pour la lumière et les couleurs, car la lumière « n'est pas un mouvement ». Aristote fait l'analogie avec les phénomènes d'altération, de *changements d'états*, telle la congélation de l'eau qui s'opère « en un seul bloc », propos qu'il tempère par la remarque suivante :

Cit. Si la masse de la chose chauffée ou congelée est considérable, une partie est affectée par la partie qui lui est contiguë, et la première de ces parties change sous l'action de l'agent altérant lui-même, et l'altération ne se fait pas nécessairement en même temps et en bloc. *De Sensu VI, 447a 5.*

Ainsi, bien que favorable à une propagation instantanée, laisse-t-il planer quelques doutes.

Aristote rejette la théorie du rayon visuel par un argument de bon sens : « et si la vision était le résultat d'une émission de lumière sortant de l'œil comme d'une lanterne, pourquoi la vue ne s'exercerait-elle pas aussi dans l'obscurité ? » *II, 437b 14*, ne tenant pas compte des hypothèses rajoutées *a posteriori*, comme la présence d'un feu extérieur. Aristote se fait encore plus pressant quand il affirme

Cit. Il est complètement absurde de soutenir que l'œil voit au moyen de quelque chose qui en sort et que le rayon visuel s'étend jusqu'aux astres, ou que, après avoir parcouru une certaine distance, il fusionne, comme des auteurs le prétendent [Empédocle et Platon], avec quelque autre chose qui sort de l'objet. *II, 438b, 3-5.*

Cette prise de position radicale tranche nettement avec l'interprétation des *Météorologiques*, traité postérieur aux ouvrages précédents qui lui est également attribué. Dans les *Météorologiques* Aristote consacre un chapitre à l'arc-en-ciel. Après avoir détaillé les conditions climatiques de son apparition, il donne une description précise du phénomène observé

Cit. Après l'équinoxe d'automne, au moment où les jours sont les plus courts, l'arc-en-ciel a lieu à toute heure du jour, mais en été, il ne se produit pas vers midi. Il n'y a jamais plus de deux arcs-en-ciel en même temps. Chacun d'eux a alors trois couleurs, les couleurs sont les mêmes dans l'un et dans l'autre, et leur nombre est le même ; mais dans l'arc extérieur, elles sont plus faibles et leur position est inversée.

Les trois couleurs auxquelles il fait référence sont « l'écarlate, le vert et le pourpre ».

Il tente d'en donner une explication qualitative fondée sur la *réflexion*. Le problème est d'expliquer l'apparition des couleurs. Aristote utilise de manière surprenante une théorie du rayon visuel. Il écrit

Cit. Les démonstrations de l'optique doivent nous donner la conviction que la vue¹ est réfléchi à partir de l'air et de tout objet doué d'une surface lisse, comme elle l'est à partir de l'eau ; et aussi que, dans certains miroirs, ce sont les figures qui sont réfléchies, et dans d'autres les couleurs seulement. A cette dernière espèce appartiennent les miroirs qui sont tellement petits qu'ils sont indivisibles à la sensation : en eux, en effet, il est impossible que la figure soit réfléchi mais puisqu'il faut bien que quelque chose y soit réfléchi et que ce ne peut être la figure, il reste que c'est la couleur seule qui le soit.

Pour expliquer l'apparition de couleurs différentes, Aristote utilise la théorie communément admise à son époque suivant laquelle la couleur résulte d'une sorte d'altération du rayon visuel, qui perd de son intensité au fur et à mesure de son éloignement. Ainsi les arcs de différentes couleurs doivent se former à différentes distances. Sur l'apparition des couleurs, Aristote écrit :

Cit. A cet effet, nous devons, ainsi que nous l'avons dit, avoir dans l'esprit et poser : premièrement, que la couleur blanche, vue d'une substance noire², donne la couleur écarlate³ ; secondement, que la vue, quand elle s'étend au loin, devient plus faible et s'amointrit ; troisièmement, que le noir est une sorte de négation de la vue, car c'est parce que la vue vient à manquer que le noir apparaît, et c'est la raison pour laquelle tous les objets éloignés paraissent plus noirs, la vue ne pouvant pénétrer jusqu'à eux. Aussi la vue la plus forte change la couleur blanche en couleur rouge ; celle qui suit en vert ; plus faible encore en pourpre.

Différentes quantités de « noir » mélangées au blanc doivent donc être responsables de l'apparition des couleurs. Il est curieux qu'Aristote utilise dans cet ouvrage une théorie du rayon visuel, qu'il a si vivement condamnée par ailleurs, la jugeant absurde, et qui se trouve ici étayée par l'argument suivant :

Cit. L'air agit comme un miroir quand il se trouve condensé, mais, en raison de la faiblesse de la vue, il engendre souvent une réflexion indépendamment de toute condensation. A cet égard, on a cité le cas d'un homme dont la vue était diminuée et peu perçante : il lui semblait toujours voir son image le précéder dans sa marche, et le regarder en lui faisant face. Cette impression était due à ce que la vue de cet homme était réfléchi vers lui. La maladie rendait sa vue si faible et si délicate que l'air avoisinant jouait le rôle de miroir, qui est normalement dévolu à l'air distant et condensé, et que la vue était dans l'incapacité de le repousser.

L'attribution de certains passages des *Météorologiques* à Aristote est peut-être à reconsidérer.

I.4. Euclide : le rayon lumineux. Théon d'Alexandrie.

Les soucis de Platon et d'Aristote sont conceptuels et touchent à la nature de la lumière. Leurs réflexions théoriques n'aboutissent pas à un modèle qui puisse décrire les phénomènes optiques. A l'inverse, chez **Euclide** (III^{ème} Siècle av. JC), le souci est de rendre compte des « illusions » d'optique, par une méthode géométrique.

Deux traités d'optiques sont attribués à Euclide : *Optique* et *Catoptrique*. Ces documents ont traversé les siècles avec de multiples traductions et ajouts et l'authentification de leur contenu

¹ le rayon visuel dans ce passage d'Aristote

² où il y a du « sombre »

³ où il y a du « sombre » remarque inspirée par le soleil couchant

n'est pas toujours certaine. Dans ces ouvrages, il n'y a pas de discussion sur la *nature* de la lumière. Ils se présentent sous la forme d'une série de définitions, propositions, démonstrations, théorèmes et lemmes. Les problèmes abordés sont très inégaux. Les sources d'Euclide ne sont pas connues mais il est vraisemblable qu'il a opéré une synthèse et une présentation globalement rigoureuse de connaissances antérieures. *La recension de l'optique par Théon*, rédigée par un auditeur des cours de Théon d'Alexandrie (IV^{ème} siècle ap. J.C.) détaille des conceptions qui pouvaient être celles d'Euclide sur la lumière :

Cit. Lorsqu'il⁴ expliquait les choses relatives à la vue, il apportait en manière de conclusion certaines confirmations du fait que toute lumière se propage suivant des lignes droites, et il en relevait comme preuve la plus importante les ombres projetées par les corps, ainsi que les traits lumineux introduits par les fenêtres et par les ouvertures ; car toutes ces choses n'auraient pas lieu, comme on constate qu'elles se produisent maintenant, si les rayons du soleil ne se propageaient pas suivant des lignes droites. *Recension*.

Une expérience est proposée pour accréditer cette hypothèse :

Cit. D'ailleurs, tous ces faits s'observent de la façon la plus manifeste dans des conditions que l'on obtient artificiellement. Ainsi, par exemple, si, en disposant une lampe n'importe de quelle manière, l'on place devant celle-ci un petit panneau muni d'une fente pratiquée à la fine scie, de telle sorte que la fente tombe suivant le milieu de la lampe, et si l'on met, en outre, de l'autre côté du petit panneau, et très près de lui, un petit panneau sur lequel tombera la lumière introduite à travers la fente, on découvre indubitablement que la lumière projetée sur le petit panneau est entourée de lignes droites, et que la ligne qui relie le milieu de la lampe et la fente du petit panneau est dans une même droite. *Recension*.

Euclide *géométrise* l'optique: la lumière se propage suivant des lignes droites, au sens mathématique, sans épaisseur : les *rayons*. Ce *modèle* mathématique fonde *l'optique géométrique* utilisée de nos jours dans la plupart des cas usuels.

Quelles sont les propriétés de ces rayons ? Quel est leur sens de propagation? Euclide utilise dans certaines démonstrations, comme dans la proposition XVIII, un rayon allant du soleil vers l'observateur : « soit ΓA le rayon du soleil aboutissant au sommet de la grandeur AB , et amenons-le jusqu'à l'œil Δ ». Les rayons solaires sont loin d'être les seuls rayons lumineux et la *définition I* de l'*Optique* est sans équivoque :

I. Supposons que les lignes droites qui émanent de l'œil se propagent à divergence des grandes grandeurs.

Ce qui signifie que les rayons partent de l'œil et divergent pour atteindre les objets dans toute leur étendue. Cela est une *supposition*, une hypothèse de travail. Par cette théorie du rayon visuel, Euclide reprend la thèse des pythagoriciens (Phytagore, 500 av. JC). Il affine cette définition par la suivante :

II. Et que la figure comprise sous les rayons visuels est un cône ayant son sommet dans l'œil, et sa base aux limites des grandeurs regardées.

⁴ Théon.

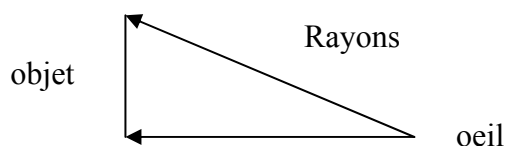
La troisième définition dote les rayons visuels d'une nouvelle propriété:

III. Et que les grandeurs sur lesquelles tombent les rayons visuels sont vues ; tandis que celles sur lesquelles les rayons visuels ne tombent pas ne sont pas vues.

Cette distinction consiste en une *discrétisation* des rayons qui forment le cône visuel. Ainsi, un objet ne peut être vu qu'à la faveur d'un rayon visuel incident. C'est ce que tente de justifier l'auteur de la *Recension* en écrivant :

Cit. Le fait que la lumière se propage suivant une ligne droite étant sensible et patent pour tout le monde, il s'est occupé de l'œil et des rayons qu'il projette. Il a voulu qu'on lui concède aussi que ces rayons se propagent suivant des lignes droites tout en s'écartant l'une de l'autre, et que ce soit pour cela, tout en fournissant l'exemple suivant, que les objets regardés ne sont pas vus entièrement tout à la fois. En effet, si une aiguille, ou quelque autre petit corps de ce genre, est jetée sur le sol, d'aucuns se sont livrés souvent d'une manière obstinée à leur recherche ; ils ont scruté plusieurs fois un même endroit, bien que rien ne cachât le petit objet cherché, et ils n'ont cependant vu l'aiguille que plus tard, en dirigeant la vue sur l'endroit où se trouvait ce petit objet. Il est donc évident que, s'ils n'ont pas vu l'objet tombé, c'est que l'endroit où il se trouvait n'a pas été vu non plus ; de sorte que toutes les parties de l'endroit placé sous l'œil du chercheur n'ont pas été regardées ; car, si elles l'avaient été, l'objet cherché aurait été vu ; or il n'a pas été vu. Se basant, en outre, sur ceux qui regardent attentivement les livres, il disait qu'ils ne peuvent pas apercevoir toutes les lettres qui se trouvent dans une page ; car s'ils avaient à désigner les lettres qui y sont tracées en minorité, ils seraient incapables de le faire, parce que les rayons visuels ne sont pas dirigés sur toutes les lettres, mais se présentent avec des écarts, et qu'ainsi un grand nombre de lettres alignées ne sont pas vues. Il s'ensuit évidemment qu'un endroit de la page ne sera pas vu tout entier. La même chose aura lieu pour d'autres objets visibles ; de sorte que les objets regardés ne sont pas vus entièrement tout à la fois ; mais il semble qu'on les voit entièrement, parce que les rayons visuels se meuvent avec une extrême vitesse, sans rien omettre, c'est-à-dire en parcourant d'une manière continue et non par sauts.

Les phénomènes invoqués mettent en jeu des processus mentaux associés ici à des propriétés intrinsèques des rayons. Lorsqu'ils atteignent un objet, leurs longueurs diffèrent, comme le suggère le schéma ci-dessous :



Il s'ensuit que « nulle grandeur regardée n'est vue simultanément tout entière », ce qui est la *proposition I* de l'*Optique*. « ... mais, comme les rayons visuels se transportent rapidement, il semble que l'on voit simultanément ». Ainsi, les rayons lumineux mettent du temps à se propager, mais ce temps nous est imperceptible en raison de l'extrême rapidité de leur propagation.

Les lois de la réflexion, clairement exposées dans la *catoptrique*, correspondent à une donnée expérimentale et non à une démonstration : rayons incidents et réfléchis sont contenus dans un

même plan, les angles formés avec la normale (cf. fig.2 ci-dessous) sont égaux; ces lois sont généralisées à des miroirs convexes et concaves; il n'y a pas alors, et ce pour longtemps encore, de loi générale de la *réfraction*, phénomène qui apparaît lorsque le rayon lumineux change de milieu de propagation.

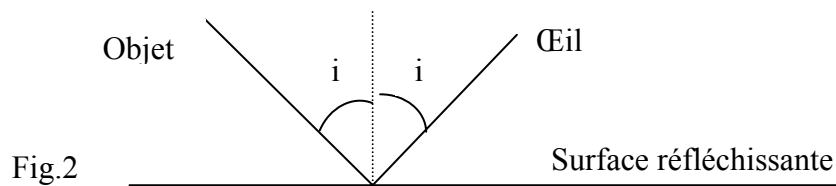


Fig.2

I.5. Héron d'Alexandrie : le plus court chemin.

Héron d'Alexandrie (Ier siècle après J.C.) utilise la théorie du rayon visuel d'Euclide pour établir les lois de la réflexion sur la base d'un principe général⁵ :

Cit. Héron d'Alexandrie a démontré dans son livre sur les miroirs, que les droites brisées suivant des angles égaux sont les plus courtes de toutes celles qu'on peut mener d'un point à un autre en les faisant se briser sur la même surface sous des angles divers.

Comme l'indique la fig.3 ci-dessous, le trajet AIB est plus court que n'importe quel chemin AI'B, I' étant un point quelconque de la surface réfléchissante. Pour le démontrer, il suffit de remarquer que le trajet A'I est égal au trajet AI, A' étant le symétrique de A par rapport au miroir. La somme de deux côtés d'un triangle est toujours plus grande que son troisième côté, et ainsi A'IB est plus court que A'I'B.

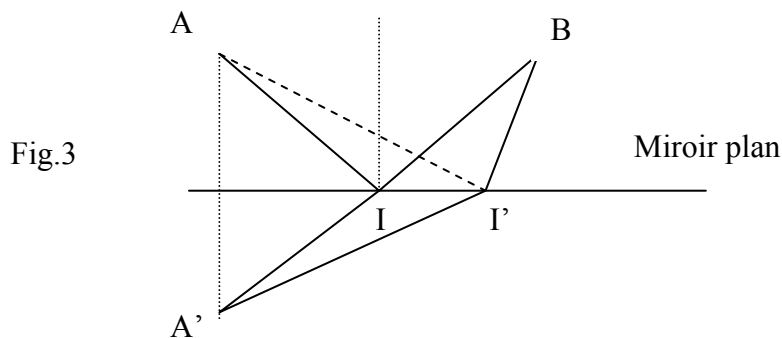


Fig.3

Cette démonstration est rapportée par Damianus qui conclut que «si la nature ne doit pas en vain diriger le rayon de notre vue, il doit en effet se rompre suivant des angles égaux».

La propagation rectiligne trouve ainsi sa *justification* dans la *finalisation* de la nature.

Le raisonnement développé ici pour la réflexion de la lumière repose sur la propagation rectiligne de la lumière, qui satisfait elle-même au principe de plus court chemin : le plus court chemin entre deux points, dans un milieu donné, est la droite⁶.

⁵ Cité par V.Ronchi, *Histoire de la Lumière*.

⁶ En géométrie euclidienne.

I.6. Galien et le rôle de l'œil.

Des progrès sensibles sont accomplis par **Galien** (Pergame, II^{ème} Siècle ap. J.C.). Il dissèque de nombreux animaux dans le but d'améliorer les pratiques médicales. Il met en évidence le rôle du nerf optique dans la vision. Il rejoint les idées platoniciennes en ce qu'il considère qu'un fluide intérieur est communiqué du cerveau à l'œil par le nerf optique, qui sensibilise l'œil et le rend apte à être impressionné par le fluide externe en provenance de l'objet. Il attribue la zone sensible au cristallin

Cit. J'ai dit que l'humeur cristalline elle-même est l'instrument principal de la vision, un fait clairement établi par ce que les médecins nomment cataracte, qui se situe entre le cristallin et la cornée et qui interfère avec la vision ...⁷.

La rétine joue un rôle important, mais elle n'est pas perçue comme le siège de la vision. En tant que la dernière des *tuniques* qui compose l'œil, elle assure le lien entre l'œil et le cerveau, via le nerf optique. Elle est une réserve de nutriments:

Cit. Sa fonction principale est [...] de percevoir les modifications du cristallin ainsi que d'acheminer et de diffuser les éléments nutritifs à l'humeur vitreuse⁸.

I.7. Ptolémée et la mesure physique.

Aux alentours de 150 ap. J.C., **Claude Ptolémée** accomplit un travail astronomique colossal, mettant en évidence la précession des équinoxes. Dans le domaine de l'optique, il réalise un dispositif expérimental qui lui permet de mener une étude systématique de la réfraction. Il peut ainsi noter la valeur de l'angle de réfraction pour un angle d'incidence et un milieu donnés. Le principe des expériences de Ptolémée est présenté dans la vidéo.

VIDÉO

Les valeurs données par Ptolémée sont fiables à moins d'un demi-degré près en général. Ptolémée pensait que la loi reliant les angles d'incidence et de réfraction était d'un type parabolique et ses mesures se trouvent de fait sur une parabole.⁹ Ptolémée étend le cône visuel discret d'Euclide en un cône continu.

Commentaire : quel regard porter sur la diversité des approches proposées pour rendre compte de la vision ? Il ressort que tous les auteurs ont tenté de donner un caractère rationnel à la vision, dans le cadre de théories très générales sur le monde. Dans les théories précédentes, la pyramide visuelle des atomistes, le feu extérieur des platoniciens, le rayon visuel, l'existence d'un milieu subissant des changements d'état, la finalisation de la nature, sont autant de postulats nécessaires aux différentes théories pour en assurer la cohérence. Moyennant ces hypothèses, les théories « fonctionnent ». Dans l'Antiquité, la discussion porte donc sur les hypothèses et ne peut se départir d'un terrain purement logique sur lequel il n'est pas possible de trancher.

⁷ I have said that the crystalline humour itself is the principal instrument of vision, a fact clearly proved by what physicians call cataracts, which lie between the crystalline humour and the cornea and interfere with vision *Lindberg.*

⁸ its principal and greatest usefulness ... is to perceive the alterations of the crystalline humour and in addition to convey and transmit nutriment to the vitreous humour. *Lindberg.*

⁹ cf. V. Ronchi

Une avancée importante aura lieu quand le rôle de l'œil dans le mécanisme de la vision sera élucidé. Cela requière à la fois l'amélioration des connaissances anatomiques et l'établissement des lois de la réfraction. Les aléas de l'Histoire des civilisations feront que cette entreprise ne se concrétisera qu'au XVIIème siècle.

II. La lumière dans la science arabe.

II.1. Al-Kindi

A la suite de l'effondrement de la civilisation grecque et romaine, naît le nouvel empire arabe, qui s'étend du bassin méditerranéen au Moyen Orient. Après la phase de conquêtes, s'instaure une période pendant laquelle les connaissances propres aux divers peuples assujettis imprègnent la civilisation émergente. L'un des auteurs les plus importants de cette période est **Al-Kindi** (fin du VIII^{ème} siècle-866). Il traduit les travaux d'Euclide et défend la théorie des rayons visuels. Il s'appuie sur l'exemple du cercle vu par la tranche mentionné par Euclide. Si celui-ci envoyait de lui une image fidèle, il apparaîtrait comme un cercle et non tel qu'il est perçu, à savoir un segment de droite. Cette « illusion » trouve une interprétation dans la théorie des rayons visuels par un effet de projection. Al-Kindi enrichit les conceptions d'Euclide¹⁰. Il adapte le cône visuel continu de Ptolémée en discrétisant la surface de l'œil : chaque point de la surface est associé au sommet d'un cône visuel. Il réalise une discrétisation analogue d'une source lumineuse. Al-Kindi dote les rayons lumineux d'une extension transversale. Il crée une optique des *faisceaux* lumineux.

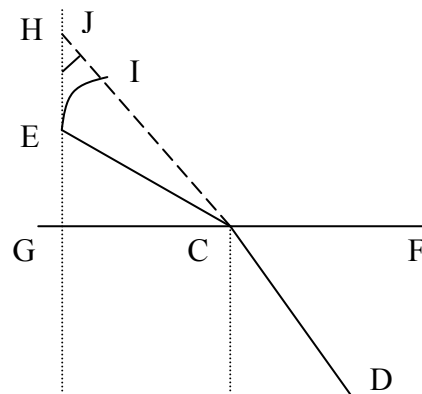
Les ouvrages grecs sont traduits massivement, souvent grâce au mécénat de califes. Puis une science nouvelle se met en place. L'apogée de la science arabe se situe entre le VIII^{ème} et le XI^{ème} siècle, peu avant l'effondrement de l'empire. Deux figures marquantes de cette période sont **Ibn Sahl** et **Ibn Al-Haytham**.

II.2. Ibn Sahl et la réfraction.

Les travaux du mathématicien **Ibn Sahl**, n'ont été découverts que récemment¹¹ et de manière parcellaire. Sa période d'activité est située vers 980. Ibn Sahl consacre ses travaux d'optique à un sujet très discuté: la détermination de la forme des miroirs ardents d'Archimède, qui est réputé avoir incendié à distance par ce moyen une flotte ennemie assiégeant Syracuse. Ibn Sahl utilise ses connaissances sur les coniques pour calculer, dans différentes configurations, quelle forme donner aux miroirs. Il ne se limite pas à une étude de *catoptrique* mais étudie les foyers ardents, lorsque la lumière traverse les milieux transparents. Il fait l'étude de lentilles plan-convexe et biconvexe, et s'intéresse au problème de *l'anaclastique*, à savoir la détermination de la forme à donner à une lentille pour que la lumière converge en un point, suivant ses conditions d'utilisation, problème qui intéressera René Descartes bien plus tard. Ses constructions géométriques l'amènent à définir une propriété de la réfraction qui n'était pas connue antérieurement et qui aurait pu constituer la première formulation d'une loi de la réfraction. A la base de toutes les constructions d'Ibn Sahl se trouve le schéma suivant :

¹⁰ *Theories of vision from al-Kindi to Kepler. Lindberg.*

¹¹ Ce paragraphe est inspiré de l'ouvrage de R. Rashed R., *Géométrie et dioptrique au X^{ème} siècle*, Les belles lettres, Paris, 1993.



La lumière se propage dans un cristal suivant le chemin DC dont elle rencontre la surface en C. La lumière se réfracte alors dans l'air, dans le plan de la figure, suivant CE. Ibn Sahl trace la perpendiculaire GE à la surface du dioptre. Cette perpendiculaire coupe le prolongement DC du rayon qui ne serait pas réfracté en H. Il considère alors le rapport CH/CE qu'il dit être constant. Si l'on nomme i l'angle d'incidence compté par rapport à la normale au dioptre en C et r l'angle de réfraction avec la normale, le rapport CH/CE est égal au rapport $\sin r / \sin i$ qui est, en notations modernes, l'indice n du milieu cristallin.

Dans les écrits qui nous sont parvenus, Ibn Sahl n'érige malheureusement nulle part ce fait au statut de *loi physique*. Il semble passer à côté de la grande généralité de ce qui n'est pour lui qu'un outil de calcul. D'autre part, il n'écrit pas explicitement que ce rapport dépend des milieux considérés. Finalement, il privilégie un autre rapport dans ses constructions : il reporte la distance CE sur CH et appelle I le point correspondant. Puis il considère le point J milieu de IH et forme le rapport CI/CJ, rapport qui n'a pas de signification physique immédiate. Aussi, bien que la loi de Snell au XVII^{ème} siècle sera présentée sous la forme de la constance du rapport CH/CE, les objectifs de ces auteurs semblent ne pas avoir été les mêmes. Ibn Al-Haytham, le « successeur » immédiat d'Ibn Sahl, ne reprendra pas cette formulation et adoptera les lois de Ptolémée... qui traverseront ainsi les siècles. Le travail d'Ibn Sahl semble s'être rapidement perdu pour la postérité.

II. 3 Ibn Al-Haitham : la formation des images.

Ibn Al-Haitham (965-1039) (dit **Alhazen**) apporte une contribution majeure à l'optique.

Il discrétise la source lumineuse à la manière d'Al-Kindi : chaque partie de la source rayonne de la lumière dans toutes les directions. Un apport important d'Al-Haitham est alors de postuler que la vision nécessite une correspondance bijective entre les points de l'objet et ceux de l'image formée dans l'œil.

Après avoir souligné le mérite de ses prédécesseurs, Al-Haitham remarque que leurs points de vue sont inconciliables. Deux courants de pensée s'affrontent : celui des « physiciens » pour lesquels la lumière va des objets à l'œil, sous la forme de simulacres, et celui des « mathématiciens » pour lesquels il y a un rayon visuel. Aucune des deux approches ne lui semble satisfaisante. Dans la première, il n'y a pas de formulation mathématique possible de la théorie, alors que la seconde utilise un rayon visuel qui ne repose sur aucune réalité tangible. Il éprouve la nécessité d'aboutir à une théorie « physique », traduisant au plus près les phénomènes, géométrisable. Il lui faut reformuler la science de la vision, ce qui est l'objet du *Traité d'Optique*.

Al-Haitham attache beaucoup d'importance à la démonstration expérimentale de la propagation rectiligne de la lumière. Il démontre non seulement la propagation rectiligne de la lumière solaire directe, mais aussi celle du clair de lune et du ciel. Il fait un usage systématique de la chambre noire: une ouverture est aménagée dans une pièce sombre, puis il intercepte à l'aide d'un écran le faisceau de lumière entrant. Le rapport homothétique liant la dimension de cette section avec la distance à l'ouverture indique que la lumière se propage en lignes droites. Il remarque en outre que lorsque la pièce est emplie de fumée ou de poussière, qui « matérialisent » le faisceau lumineux, celle-ci apparaît se propager rectilignement.

Contrairement aux *eidola* des atomistes, composées d'un ensemble ordonné et lié d'atomes, fidèle à l'objet qui les émet, les *espèces*, au sens de *forme* ou d'*images*, d'Al-Haitham sont issues des différentes parties de la source, dont chaque point émet dans toutes les directions de l'espace :

Cit. Il découle de tout ce que nous avons dit, que de chaque source lumineuse, de la lumière est émise suivant des lignes droites de cette partie.

Cette propriété est évidente dans le cas de grandes parties de sources de lumière, leurs plus petites parties – même lorsqu'elles sont extrêmement petites et tant qu'elles préservent leur *forme* – doivent encore être lumineuses ; la lumière rayonne de ces parties comme elle le fait des plus grandes¹² ...

Al-Haitham cite la lumière du soleil couchant ou levant, qui provient des bords extrêmes du soleil, et donc de petites parties de la source lumineuse, dont il vérifie la propagation rectiligne. Il remarque en outre que la lumière « accidentelle » diffusée par les corps opaques éclairés par un corps lumineux (soleil, feu ...) a encore cette propriété. Il montre par une série d'observations que lumière et couleurs sont intimement liées et il en conclut

Cit. ... Il suit de cette expérience que la couleur rayonne d'un corps coloré éclairé et s'étend dans toutes les directions comme le fait la lumière de ce corps, les deux allant toujours de pair ; que la forme de la couleur est mêlée à celle de la lumière ; et que la forme de la couleur en expansion avec la forme de la lumière est plus faible que la couleur elle-même, qu'elle s'amenuise au fur et à mesure de son éloignement du corps coloré – comme il en est de la lumière.¹³

La couleur est une *forme*, au même titre que la lumière. Elle ne provient pas d'un phénomène intervenant entre l'œil et l'objet. Et bien qu'il existe des couleurs changeantes, comme en témoignent les plumes de certains oiseaux, Al-Haitham l'attribue à des incidences différentes dans la réflexion. Les couleurs des corps opaques ne leur appartiennent pas moins.

¹² It is therefore evident from all that we said that from every self-luminous body, light radiates in every straight line extending from that part.

This property is manifest in the case of the larger parts of self-luminous bodies, their smaller parts – even when extremely small and as long as they preserve their form – must also be luminous; light will radiate from these parts in the same manner as it does from the larger ones ... *The optics of Ibn Al-Haytham. Sabra A. I.*

¹³ It is therefore evident from this experiment that colour radiates from an illuminated coloured body and extends in all directions just as the light in this body does, both being always together ; that the form of colour is mingled with the form of the light; and that the form of the colour extending along with the form of the light is weaker than the colour itself, and the farther it is from the coloured body the weaker it becomes – as is the case with light. *The optics of Ibn Al-Haytham. Sabra A. I.*

Que l'observateur regarde directement le soleil ou l'observe par réflexion, il est ébloui et ne peut le fixer. Qu'il fixe le ciel à travers la fenêtre d'une chambre sombre pour en détourner ensuite son regard, l'impression lumineuse persiste. Al-Haitham en conclut que la lumière a une action sur l'œil. Il n'y a pas lieu de conclure autre chose que de la lumière se rend des objets à l'œil. La théorie du rayon visuel est superflue. Se pose alors le problème crucial de décrire comment les *formes* des objets entrent dans l'œil. Al-Haitham a conscience qu'une vision ordonnée ne peut se faire que si à chaque point de l'objet correspond un point à l'endroit où s'effectue la vision. Le lieu privilégié de la vision est encore le cristallin, sans lequel il n'y a pas de vision pour Al-Haitham qui précise

Cit. ... l'oeil ne peut percevoir les objets visibles à moins qu'il ne perçoive la *forme* de chaque point par un point seulement de la surface du cristallin¹⁴.

Comment réaliser une telle correspondance? Al-Haitham fait la remarque suivante:

Cit. Ceci étant dit, lorsque les formes de la lumière et de la couleur en provenance de chaque point de l'objet visible arrivent à la surface de l'œil, seules celles qui suivent les lignes droites perpendiculaires à la surface de l'œil vont, en atteignant la surface, passer sans déviation au travers des tuniques transparentes de l'œil. Celles qui suivent d'autres droites seront réfractées au lieu de passer sans dévier, car les transparences des tuniques de l'œil sont différentes de celle de l'air qui est en contact avec la surface de l'œil¹⁵.

Les tuniques de l'œil et le cristallin lui paraissent concentriques. Il est alors possible pour les rayons perpendiculaires à la surface de l'œil de traverser ces différentes tuniques sans déviation pour atteindre le cristallin. Ne connaissant pas la loi de la réfraction, Al-Haitham ne peut imaginer la convergence des rayons réfractés en un même point. La solution qui s'impose à lui est donc de privilégier un type particulier de rayons. Eu égard à ce qui précède, Al-Haitham privilégie les rayons perpendiculaires. Ces derniers sont sensés avoir plus de force que les autres, à la manière d'une épée qui peut couper une corde tendue par le tranchant mais échoue à le faire lorsque le coup est porté de biais. Cette hypothèse lui apparaît plausible sans pour autant qu'il soit débarrassé de tout doute :

Cit. Ainsi n'est-il pas impossible que l'œil, dans sa réception des effets des lumières et des couleurs, ne soit particulièrement lié aux seules lignes qui se rencontrent en son centre et sont perpendiculaires à sa surface¹⁶.

Chaque point d'un objet émet donc de la lumière en ligne droite dans toutes les directions. Parmi ces lignes, il s'en trouvera une qui arrive perpendiculairement sur l'œil. Il en est ainsi

¹⁴ ... the eye cannot perceive the visible object unless it perceives the form of each point of the object through one point only on the surface of the crystalline. *The optics of Ibn Al-Haytham. Sabra A. I.*

¹⁵ That being so, when the forms of the light and colour come from every point on the visible object to the surface of the eye, only those along the straight line perpendicular to the eye's surface will, upon reaching that surface, rectilinearly pass through the transparency of the eye's coats. But those along other lines will be refracted instead of passing through rectilinearly, for the transparency of the eye's coats is not the same as that of the air which is adjacent to the eye's surface. *The optics of Ibn Al-Haytham. Sabra A. I.*

¹⁶ It is, therefore, not impossible that the eye, in its reception of the effects of lights and colours, should be especially related only to the straight lines that meet at its centre and are perpendicular to its surface. *The optics of Ibn Al-Haytham. Sabra A. I.*

pour chaque point de l'objet. La famille de rayons perpendiculaires issus des différents points d'un objet donné constitue un cône dont le sommet est le centre de l'œil et qui s'appuie sur l'objet. Le cristallin intercepte les rayons dans une zone où à chaque point correspond un point de l'objet, avant que ces rayons ne parviennent au centre de l'œil. Al-Haitham peut ainsi rendre compte de la formation de *formes* dans l'œil. Il fait le lien entre les théories des physiciens et celle des mathématiciens : « Et ces lignes sont ce que les mathématiciens appellent les lignes du rayon¹⁷ ». Les lignes droites perpendiculaires à la surface de l'œil, émises par les objets, se confondent avec le rayon visuel des mathématiciens.

Il établit une nouvelle théorie de la vision. L'expérience suivante le trouble cependant car elle prend sa théorie en défaut: il place une aiguille verticalement devant son œil et constate que les images des objets ne sont pas sensiblement modifiées.

VIDÉO

Quant au milieu intermédiaire, entre œil et objet, sa propriété fondamentale est de ne pas être altéré par le passage des formes: « car il reçoit les formes simplement comme un convoyeur et n'est pas modifié par elles¹⁸ ». En conséquence, les formes peuvent se traverser sans se modifier les unes les autres. Pour preuve, Al-Haitham donne l'exemple suivant, toujours inspiré de la chambre noire:

Cit. La preuve que les lumières et les couleurs pas ne se mélangent pas dans l'air ou les autres corps transparents est [la suivante]. Plaçons plusieurs chandelles en des endroits différents d'une même pièce, toutes faisant face à une ouverture unique donnant dans un endroit sombre. Qu'un mur se trouve face à cette ouverture ou que l'on tienne un corps opaque face à celle-ci ; les lumières des chandelles apparaîtront séparées sur le mur ou sur le corps et en même nombre que les chandelles, chaque lumière se faisant face à une chandelle sur la ligne droite passant par l'ouverture. Si l'une des lampes est masquée, seule la lumière en face de cette chandelle dans la pièce sombre disparaît. Lorsque l'écran est enlevé, la lumière revient¹⁹.

Il n'insiste pas sur le mode de propagation de la lumière mais précise toutefois que quel qu'il soit, il ne peut se faire dans l'instant, bien que sa durée nous semble imperceptible.

Il souhaite donner une *interprétation* de la réflexion et de la réfraction en termes *mécaniques* et dans l'analogie avec une flèche tirée vers la surface de séparation, décompose le mouvement en une *composante tangentielle* et une *composante perpendiculaire*

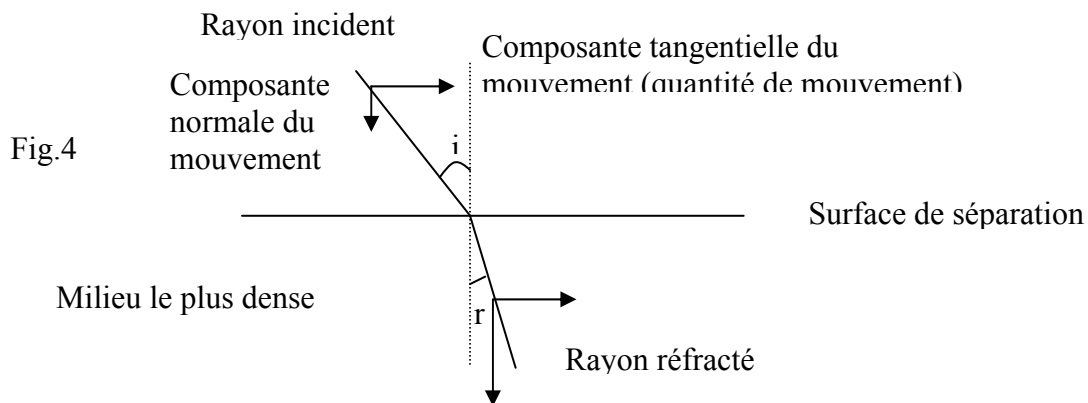
- Lors de la réflexion, la composante tangentielle ne change pas, alors que la composante normale s'inverse.

¹⁷ And these lines are what mathematicians call *lines of the ray*.

¹⁸ for it receives these forms merely as a conveyer and is not altered by them.

¹⁹ The proof that lights and colours do not blend in the air or in transparent bodies is [the following]. Let several lamps be positioned at various points in the same area, all being opposite a single aperture leading to a dark place; opposite the aperture let there be a wall in that dark place or let an opaque body be held facing the aperture: the lights of those lamps will appear separately on that wall or body and in the same number as the lamps, each light being opposite one of the lamps on the straight line passing through the aperture. If one of the lamp is screened, only the light opposite that lamp in the dark place vanish. When the screen is moved away from the lamp, that light will return to its place. *The optics of Ibn Al-Haytham. Sabra A. I.*

- Lors de la réfraction, la composante tangentielle est encore inchangée, alors que la composante normale est *freinée* ou *accélérée*. Dans un milieu plus dense que le milieu incident, le rayon réfracté se rapproche de la normale, ce qui implique dans la description précédente que *la vitesse de la lumière s'accroît avec la densité du milieu* comme l'illustre la fig. 4. Une interprétation similaire nourrira une vive polémique au XVII^{ème} siècle entre Fermat et Descartes.



Réfraction de la lumière. i est l'angle d'incidence et r l'angle de réfraction comptés par rapport à la normale au point de contact du milieu séparateur. Les rayons se brisent à la traversée de la surface de séparation. Le rayon réfracté se rapproche de la normale dans le cas où le second milieu (eau par ex.) est plus dense que le premier (air par ex.). Dans le cas contraire, il s'en éloigne.

III. L'époque Médiévale.

Jusqu'au XI^{ème} siècle, les intellectuels occidentaux ne disposent que d'ouvrages hérités des romains dont le souci n'avait pas été tant d'approfondir la recherche théorique des grecs, que de s'attacher à un savoir encyclopédique de vulgarisation. L'exploitation de ces documents ne permettait pas de faire avancer l'état des connaissances. Avec l'accès aux textes originaux ou aux traductions, via les documents laissés par les Arabes lors de leur retrait d'Espagne, commence une période de traduction intense des sources. Parmi les auteurs importants, Aristote tient le premier rang, en grande partie grâce au travail d'Albert le Grand (env. 1200-1280). Ce dernier incorpore les modifications de la théorie aristotélicienne d'Avicenne (980-1037), contemporain d'Ibn al-Haitham, et d'Averroès (1126-1198), qui visent principalement à rendre compte du cheminement de la lumière dans l'œil. E. Grant écrit à propos de la prédominance de la théorie aristotélicienne :

Cit. De cette masse de science et de savoir, l'œuvre physique et philosophique d'Aristote fut le fondement, car elle était porteuse d'une vision scientifique d'ensemble du cosmos, dotée d'une forte puissance d'intellection, entièrement nouvelle pour l'Occident, et qui devait tour à tour illuminer et égarer, mais toujours dominer l'esprit des savants. E. Grant. *La physique au Moyen âge*.

Les théories aristotéliciennes vont être débattues au sein des universités qui se mettent en place dès le début du XIII^{ème} siècle. Certains ecclésiastiques sont défavorables à la diffusion d'une théorie qui s'affiche en rupture avec les dogmes chrétiens de la création divine et de la survie de l'âme après la mort. Plusieurs propositions aristotéliciennes sont condamnées en

1277 et quiconque les professe encourt l'excommunication. S'initie alors un mouvement de pensée qui aboutit au constat d'échec de toute théorie visant à une *explication* du monde. Une théorie ne peut être le reflet du réel.

III.1. Robert Grosseteste.

Le franciscain anglais **Robert Grosseteste** (1168-1253) dirige l'école d'Oxford en 1230 et devient évêque de Lincoln en 1235. Grosseteste peut être considéré comme le fondateur de l'optique. Il écrit :

Cit. La première forme corporelle que certains nomment corporéité est d'après moi la lumière. Car la lumière par sa nature elle-même se répand dans toutes les directions de telle manière qu'un point lumineux produise instantanément une sphère de lumière de quelque taille que ce soit, à moins qu'un objet opaque ne soit rencontré. Grosseteste. *De Luce*.

La lumière se « multiplie elle-même [...] instantanément dans toutes les directions » et se « répand uniformément dans toutes les directions ». Elle est la « première forme corporelle créée » car elle est la plus proche des formes qui existent hors de la matière, « les intelligences ». Grosseteste fait le lien avec une « lumière divine » qui vient éclairer l'esprit humain, suivant en cela **Saint Augustin** (354-430).

Il préconise l'usage de l'expérience pour contrôler les hypothèses et s'appuie sur les mathématiques, et en particulier la géométrie « car toutes les causes des effets naturels doivent être exprimées au moyen de lignes, d'angles et de figures, car autrement il serait impossible, d'avoir connaissance de la raison de ces effets²⁰ ». Il utilise également des rapports à l'arithmétique pour analyser la multiplication des formes (ou espèces) à l'infini. Il développe une cosmologie finaliste où « toute opération de la nature s'accomplit de la manière la plus déterminée, la plus brève, la plus parfaite possible²¹ » et où la lumière occupe le rôle central, originel. À Oxford, Robert Grosseteste a comme élève Roger Bacon.

III.2. Roger Bacon.

Roger Bacon (env. 1215-1292) peut être considéré comme le fondateur d'une école perspectiviste médiévale. Après avoir étudié à Oxford puis à Paris, il enseigne Aristote à la Sorbonne en 1240. Théologien, il rejoint l'ordre des Franciscains en 1257.

Bacon tente d'harmoniser les théories de l'Antiquité en s'inspirant beaucoup des travaux d'Al-Haitham. Lumière et couleur appartiennent au genre des *espèces*, au sens des *formes* d'Al-Haitham, issues de chaque point de l'objet et émises dans toutes les directions. L'objet est discrétisé en éléments rayonnants. Ces espèces sont *corporelles*, par opposition à *spirituelles*, car capables d'une action matérielle sur les corps à l'image des « espèces de la chaleur » qui chauffent, séchent ou putréfient les corps. Elles ne sont cependant pas constituées par les atomes de l'objet qui les émet. Contrairement à Démocrite, qui suggère que la vision est possible dans le vide, la théorie des espèces de Bacon est une théorie des *milieux*. Ses espèces peuvent être assimilées à des « ondes » se propageant dans un milieu.

²⁰ Michel Authier dans *Les éléments d'histoire des sciences*.

²¹ *Id.* 20.

Cit. Cependant, nous devons affirmer ici que si le vide existait, nous ne verrions rien; non en raison de quelque chose qui entraverait les *espèces* et s'opposerait à elles, mais en raison de l'absence d'une essence favorable à leur multiplication. Car une espèce est une chose naturelle, et nécessite de fait un milieu naturel ; mais dans le vide il n'y a pas de nature. Car un vide correctement conçu n'est qu'une simple entité mathématique étendue dans les trois directions , existant par elle-même, sans chaud ni froid, dur et mou, dilué et dense, et sans réceptivité naturelle, occupant l'espace à la fois en deçà et au-delà du ciel²² [...]. Mais une *espèce* n'est pas un corps, et n'est non plus transportée en bloc d'un endroit à l'autre ; mais celle qui est produite dans la première partie de l'air n'est pas distincte de cette partie, car la forme ne peut être distinguée de la matière dans laquelle elle se trouve à moins qu'elle ne soit âme ; plus exactement, elle se reproduit dans la seconde partie de l'air et ainsi de suite. Il n'y a pas de mouvement dans un lieu, mais un engendrement se multipliant à travers les différentes parties du milieu²³.

Chacune de ces actions « élémentaires » s'étale sur une durée imperceptible. La propagation sur des distances colossales peut demeurer imperceptible à condition que le processus « infinitésimal » soit suffisamment rapide. Ainsi, Bacon suggère-t-il une relecture d'Aristote, qui après avoir comparé les différents sens entre eux, écrit que la vision se fait dans l'instant, à la différence de l'ouïe et de l'odorat. Pour Bacon, « instant » ne doit pas être considéré ici dans son sens mathématique, mais en rapport avec les mécanismes de notre sensation.

Suivant Al-Haitham, il attribue la prédominance aux rayons perpendiculaires, non réfractés, ce qu'il justifie identiquement par la force plus grande que doivent avoir ces rayons par rapport à ceux qui sont inclinés.

Dans sa tentative d'harmonisation des théories, il est amené à distinguer deux sortes d'espèces qui interviennent dans le processus de la vision :

Cit. ... Concernant maintenant la multiplication de ces *espèces*, nous devons admettre qu'elle a lieu au même endroit, entre l'œil et l'objet visible ; et qu'elle s'opère le long d'une pyramide, dont le sommet est dans l'œil et la base sur l'objet visible. Et tout comme les espèces d'un objet avancent en ligne droite dans un milieu unique, sont réfractées de diverses façons lorsqu'elles rencontrent un milieu de transparence différente, et réfléchies lorsqu'elles rencontrent un obstacle ou un corps opaque, les espèces de l'œil avancent selon précisément le même chemin²⁴.

²² However, it must be stated here that if there were a vacuum, we would see nothing - not because of some nature that would impede and resist a species, but because of the absence of a nature suited to the multiplication of a species. For a species is a natural thing, and therefore it requires a natural medium; but in a vacuum there is no nature. For a vacuum correctly conceived is merely a mathematical quantity extended in three dimensions, existing of itself, without hot and cold, soft and hard, rare and dense, and without any natural receptivity, occupying space both within and without the heaven. *Lindberg. Roger Bacon and the origins of Perspectiva in the Middle Ages. I.9.2*

²³ But a species is not a body, nor is it move as a whole from one place to another ; but that which is produced in the first part of the air is not separated from that part, since form cannot be separated from the matter in which it is unless it should be soul ; rather, it produces its likeness in the second part of the air and so on. There is no local motion, but a generation multiplied through the different parts of the medium ; nor is it body that is generated there, but corporeal form that does not have the dimensions of itself, but is produced according to the dimensions of the air. *Lindberg. I.9.4*

²⁴ Now concerning the multiplication of this species, it must be recognised that it occurs in the same place, between the eye and the visible object ; and it takes place along a pyramid, the vertex of which is in the eye and

Cependant, ces espèces sont différentes dans leur nature : celles de l'œil sont animées et celles des objets inanimées. Par conséquent, il ne peut y avoir d'unification entre elles, contrairement à ce que Platon pouvait suggérer dans le *Théétète*. L'apparition d'espèces visuelles dans l'œuvre de Bacon semble superflue et il en minimisera le rôle lui-même.

Bacon détaille ensuite la physiologie de l'œil et son lien avec le cerveau. Dans la dernière partie, il étudie la réflexion dans des miroirs de différentes formes. Bacon attribue la cause de la réflexion à la multiplication des espèces empêchée dans sa course, qui peut alors choisir un chemin différent, en l'occurrence celui vérifiant l'égalité des angles. Il termine son ouvrage par des références théologiques

Cit. ... La vue est triple pour une autre raison, suivant qu'elle est directe, réfractée ou réfléchie ... Et nous pouvons faire ici plusieurs comparaisons. Nous attribuons la vue directe à Dieu ; l'éloignement de cette voie directe par la réfraction, qui donne une vue plus faible, convient à la nature angélique ; la vue par réflexion, qui est plus faible, peut être affectée à l'homme²⁵.

et conclut par des applications d'inspirations diverses, telle l'utilisation de plusieurs miroirs pour faire croire qu'un homme est une armée et une armée plusieurs armées, ou d'autres, destinées à un avenir plus prometteur tels :

Cit. Les miracles réalisables par la réfraction sont encore plus grands, car il apparaît clairement des règles précédentes que ce qui est très grand peut être rendu très petit et vice versa, et que les objets éloignés peuvent être rapprochés et les choses proches éloignées. Car nous pouvons donner une forme telle aux matières transparentes et les disposer d'une manière telle par rapport à l'œil et aux objets visibles, que les rayons seront réfractés et déviés dans la direction que nous souhaitons, nous permettant ainsi de voir les choses proches ou loin, selon l'aspect voulu²⁶.

Il faudra encore attendre plusieurs siècles avant que les instruments d'optique ne répondent aux attentes de Roger Bacon, mais depuis le XI^{ème} siècle semblent être apparues les *lentilles de verre*. Il n'y a pas de trace d'un inventeur particulier, ce qui tend à faire se situer cette découverte hors de la communauté « savante », mais plutôt dans le milieu artisanal des verriers de la région vénitienne peut-être, qui auraient pu découvrir par hasard les propriétés de certaines formes de verre et notamment leurs propriétés de corriger la vue. Leur utilisation à cet usage se répand à la fin du XIII^{ème} siècle. Il semble que la pensée philosophique dominante considère que la meilleure manière de connaître la vérité est de n'altérer en rien la

the base of which is on the visible object. And just as the species of the object proceeds rectilinearly in a single medium, is refracted variously when it encounters a medium of different transparency, and is reflected when it meets the obstacle of a dense body, so the species of the eye proceeds along precisely the same path. *Lindberg*.

²⁵ Vision is threefold in another way, according to whether it is direct, refracted, or reflected And here we can draw multiple comparisons. Direct vision we attribute to God ; departure from rectitude by refraction, which produces weaker vision, is suited to angelic nature ; reflected vision, which is weaker, can be assigned to human. *Lindberg. III.3.2.*

²⁶ The [wonders] producible by refraction are even greater, for it is easily evident from the foregoing rules that the very large can [be made to] appear very small and vice versa, and that distant objects can [be made to] appear very close and close things distant. For we can so shape transparent substances and so arrange them relative to the eye and [visible] objects that the rays will be refracted and deflected in whatever direction we wish, and thus see them near or far, under whatever angle we choose. *Lindberg. III.3.4.*

forme des rayons ou la « course naturelle des espèces ». Les lentilles représentent un artifice fallacieux interposé entre l'objet et l'œil, susceptible de tromper la vue. Les figures apparaissent agrandies ou rapetissées, irisées et déformées. Elles entraînent une « illusion ». Ce n'est qu'en 1572 que l'œuvre d'Al-Haitham sera réellement diffusée et rendue accessible à la civilisation occidentale.

IV. L'explosion des connaissances.

IV.1. Della Porta.

Le mécanisme de la formation des images par l'œil semble proche du problème du *sténopé* ou *chambre noire* introduite par Alhazen qui n'en donnait pas une analyse détaillée.

Dans la seconde moitié du XVI^{ème} siècle, Giovan Battista **Della Porta** (Naples 1535-1615) publie la *Magia Naturalis*. L'édition de 1589 compte vingt tomes dont le dix septième traite des « magies » optiques. Ces livres sont essentiellement des recueils d'astuces à caractère spectaculaire. Della Porta cite l'expérience de la chambre noire à laquelle il ajoute une lentille à l'entrée:

Cit. Si tu appliquais une lentille de verre devant l'ouverture, tu verrais toutes les choses plus claires, les visages des gens qui marchent, les couleurs, les vêtements, les actes et toutes les choses et si tu les observais attentivement, tu en aurais tellement de plaisir que celui qui les a vus n'en a jamais assez de les revoir.

Cette expérience montre aux philosophes et aux opticiens en quel endroit se fait la vision; et ainsi est résolue la question, discutée depuis longtemps, de l'introduction des figures dans l'œil.

Il note encore que:

Cit. Avec les lentilles concaves, tu vois les choses lointaines petites mais claires ; avec les lentilles convexes, les choses voisines plus grandes mais peu nettes ; si tu sais les assembler avec justesse les unes et les autres, tu verras, agrandies et claires, les choses proches et les choses lointaines.

A quoi se réfère Della Porta? Sa description est très qualitative. Il n'y a notamment pas d'information sur la distance entre les deux types de lentilles. Selon toute probabilité, il se réfère à la juxtaposition de deux lentilles, l'une convexe et l'autre concave, de manière à modifier les propriétés de l'une par l'autre, comme d'autres l'avaient fait avant lui. Il n'y a aucune indication sur la réalisation d'un quelconque instrument nouveau. Mais pour qui tente l'expérimentation, il n'y a qu'un pas entre accoler deux lentilles et faire varier continuellement leur séparation jusqu'à découvrir la propriété nouvelle d'une telle association. L'origine de la lunette semble assez floue, mais sa commercialisation se fait aux Pays-Bas une dizaine d'années plus tard.

Les lunettes qui se répandent un peu partout en Europe sont de qualité médiocre, entachées d'aberrations, offrant un grossissement faible, de l'ordre de trois. Elles constituent plus un amusement au sens de la *Magia Naturalis* qu'un instrument scientifique.

IV.2. Galilée : la lunette astronomique.

Galilée (1564-1642) donne à la lunette ses lettres de noblesse. Il a eu nombre de prédécesseurs dans la réalisation de l'instrument, et il faut modérer l'arrogance de ses propos lorsqu'il écrit en préambule du *Messenger des étoiles* en 1610 :

Cit. Tous ces phénomènes, une Lunette que j'ai conçue sous l'illumination de la grâce divine m'a permis, il y a peu de jours, de les découvrir et de les observer.

Galilée présente la lunette à oculaire divergent dans le courant de l'année 1609 aux notables de Venise, pour s'assurer de leur appui et corrélativement d'un meilleur salaire. Il leur montre qu'un instrument de bonne qualité n'est pas trompeur, et permet de voir des bateaux deux heures avant qu'ils ne soient visibles à l'œil nu. L'apport déterminant de Galilée est de réaliser un instrument de bonne qualité: sa lunette a un grossissement de 8. Dans les mois qui suivent, Galilée apporte encore des améliorations décisives: il utilise des verres de meilleure qualité qui lui permettent d'atteindre un grossissement de 20 tout en conservant une bonne clarté, confère une meilleure stabilité à l'instrument et en rend possible sa mise au point. La lunette devient un instrument scientifique dans les mains de Galilée. Il tente d'apparaître comme le véritable découvreur de la Lunette, en ce que son travail reposerait sur la connaissance théorique de la réfraction des lentilles. Dans le *Messenger*, il repousse l'explication du fonctionnement de l'instrument à une publication ultérieure. Ses connaissances théoriques semblent très floues: il parle de rayons visuels dans le *Messenger*, de *formes* au sens médiéval dans d'autres textes, et ne donne aucun schéma correct du fonctionnement de la Lunette. Il relatera plus tard son « invention » en ces termes

Cit. Voici quel fut mon raisonnement. Cet instrument comporte un seul verre ou plusieurs. Ce ne peut être un seul verre car sa forme est soit concave, soit convexe (...), soit comprise entre deux surfaces parallèles. Or cette dernière n'altère en rien les objets visibles en les grandissant ou les diminuant ; la forme concave les diminue ; la convexe les agrandit bien, mais les présente très indistincts et troubles : donc un seul verre ne suffit pas pour que l'effet se produise. Passant alors à deux et sachant que le verre à face parallèles ne change rien, comme je l'ai dit, j'en conclus que le phénomène ne pouvait résulter de l'assemblage de ce verre avec l'un des deux autres, c'est à dire le convexe et le concave, et je vis comment en résultait l'effet cherché. Telles furent les étapes de ma découverte. *L'Essayeur*. (Cité par Fernand Hallyn dans sa présentation du texte le *Messenger des étoiles*).

Qu'observe Galilée dans le ciel? La Lune en premier lieu, bien évidemment. Mais d'autres avaient réalisé des observations analogues. Il en ressort que la face de la Lune présente un relief et ne s'assimile pas à une surface lisse. Il se rend compte également que les constellations apparaissent beaucoup plus riches mais cette observation n'est pas très originale non plus. La découverte marquante de Galilée est celle des satellites de Jupiter:

Cit. Le sept janvier, donc, dans la présente année 1610, à la première heure de la nuit, comme je regardais les étoiles célestes à travers la Lunette, Jupiter se présenta ; et comme je m'étais fabriqué un instrument tout à fait excellent (ce qu'auparavant je n'avais pu réussir à cause de la faiblesse de l'autre Lunette) qu'il y avait trois étoiles, toutes petites il est vrai, mais pourtant très claires, situées près de lui. Je les croyais d'abord au nombre des Fixes. Néanmoins, elles me causèrent un certain émerveillement, du fait qu'elles semblaient disposées selon une ligne exactement droite et parallèle à l'Ecliptique, et bien qu'égales aux autres [Fixes] en grandeur, plus resplendissantes.

Il note les positions respectives de ces « étoiles » au voisinage de Jupiter dans les jours qui suivent. Il en voit successivement une à l'Ouest et deux à l'Est de Jupiter, puis les trois à l'Ouest, puis plus que deux, puis deux à l'Est et une à l'Ouest, puis « pour la première fois,

quatre étoiles », une à l'Ouest et trois à l'Est. Au cours de deux mois d'observations, Galilée se forge la certitude qu'il a découvert quatre astres en révolution autour de Jupiter, qu'il appellera planètes Médicéennes, en l'hommage de la famille de Côme II, dont il attend les faveurs institutionnelles, et dont il dépose le "brevet":

Cit. Voilà les observations des quatre Planètes Médicéennes, récemment et pour la première fois découvertes par moi. A partir de ces observations, bien qu'il n'ait pas encore été possible de calculer les périodes des Planètes, on peut tout le moins énoncer quelques affirmations dignes d'attention. Et d'abord, puisque selon des intervalles semblables tantôt elles suivent, tantôt elles précèdent Jupiter, puisqu'elles ne s'éloignent de lui, aussi bien vers le levant que vers le couchant, que selon des écarts très étroits, et puisqu'elles l'accompagnent dans son mouvement rétrograde et dans son mouvement direct, personne ne peut douter qu'elles ne décrivent autour de lui leurs propres révolutions, tout en accomplissant, pendant ce temps, toutes ensemble un mouvement giratoire en douze ans autour du centre du monde [le Soleil].

Vers la fin de l'année 1610, Galilée découvre que la planète Vénus présente des phases comme la Lune et que la taille de la planète varie corrélativement aux phases observées. Il brevète cette découverte sous la forme d'un anagramme. Il en fait de même pour Saturne dont il perçoit l'anneau sous la forme de deux points brillants encadrant la planète et qu'il assimile à deux satellites.

Galilée reporte dès mars 1610 que le soleil présente des taches qui tournent avec une période de 28 jours. L'observation des trajectoires des taches sur plus d'une année le conduit à l'interprétation que l'axe de rotation du soleil est incliné par rapport à celui de la Terre. Il défendra cette position dans sa *Discussion sur le Système des deux mondes*. De telles hypothèses avaient déjà été formulées.

L'ensemble des découvertes de Galilée le pousse à croire au système Copernicien: le soleil est au centre de l'univers et les planètes tournent autour de lui, y compris la Terre. L'alternance des jours et des nuits est expliquée dans ce système par la rotation de la terre sur elle même.

Mais Galilée ne peut apporter de preuves décisives comme support à cette interprétation. Un système "intermédiaire" tel celui de l'astronome Tycho Brahé pourrait rendre compte de ces phénomènes. D'autre part, le système Copernicien est dans une certaine mesure aussi *ad hoc* que celui de Ptolémée: pour rendre compte du mouvement des planètes avec suffisamment de précision, il a recourt à plus d'épicycles que le système Ptoléméen. Ce système est une étape mentale peut-être nécessaire, mais à l'époque de Galilée, il y a déjà un système héliocentrique extraordinairement plus avancé: celui de Kepler, exposé dans l'*Astronomia Nova* en 1609, qui fournit tous les éléments qui rendront les travaux de Newton "possibles". Galilée ne semble accorder aucune importance à ces découvertes.

IV.3. Kepler et l'optique.

Galilée recherche le support de la communauté scientifique à l'appui de la thèse copernicienne, et plus particulièrement celui de **Johannes Kepler** (1571-1630) justement. Malgré les demandes réitérées de Kepler, Galilée ne lui fait pas parvenir de Lunette, ce dont il n'était habituellement pas avare envers ceux dont il espérait les grâces institutionnelles. Kepler prend cependant ouvertement parti pour Galilée dans sa *Discussion avec le messenger céleste* datée du 19 avril 1610, en soulignant que les découvertes mentionnées lui apparaissent *conceptuellement* possibles. A propos de la lunette, Kepler fait remarquer à Galilée qu'il a des prédécesseurs. Cependant, il marque là sa déférence pour Galilée : bien que lui-même, inspiré de Della Porta, ait songé à un tel instrument, il n'était pas passé à sa réalisation, en grande

partie en raison de spéculations théoriques : les détails de l'observation du ciel lui semblaient pour toujours devoir être masqués par des vapeurs.

C'est l'Electeur de Cologne, de passage à Prague vers la fin août 1610, qui prête sa lunette à Kepler pour quelques jours. Kepler observe du 1^{er} au 8 septembre et rédige un rapport sur l'observation des satellites de Jupiter aussitôt publié dans la lettre du 11 septembre 1610. Il y confirme les observations de Galilée.

Dans l'intervalle, Kepler avait tenté la réalisation d'une lunette qui n'avait pas été un succès expérimental mais qui lui avait permis d'élucider son fonctionnement, par des raisonnements clairs. Il propose une lunette à oculaire convergent. Ses travaux sont publiés dans la *Dioptrice* en 1611.

Cette explication de la Lunette est le fruit d'un long travail entrepris par Kepler en optique, et d'une contribution majeure à cette science. Son intérêt pour ce domaine s'était manifesté très tôt : les observations astronomiques qu'il analysait nécessitaient des mesures très précises de la position des astres, et il était gêné en cela par la réfraction atmosphérique. De là son intérêt pour la réfraction et la vision de manière générale. Il publie en 1604 les *Paralipomènes à Vitellion*, œuvre dans laquelle il complète en bien des points les travaux d'Al-Haitham. Kepler donne dans cet ouvrage sa définition de la lumière et des rayons lumineux, où se mêlent définitions mathématiques et inspiration métaphysique :

Cit. ...la figure la plus éminente de toutes est la Surface Sphérique, car pour celle-ci le créateur s'est amusé, dans sa grande sagesse, à la former à l'image de la Sainte Trinité. Le point central est donc comme une source pour la Sphère, la Surface est l'image du point intime, et l'on conçoit chaque chemin pour y parvenir comme engendré par une émanation infinie dans toutes les directions du point hors de lui-même jusqu'à ce qu'il y ait égalité de toutes les émanations, le point se communiquant dans cette ampliation et s'égalant à la surface, par la variation du rapport de densité. Ceci engendre partout entre le Point et la Surface l'égalité la plus absolue, l'union la plus étroite, la convenance, la relation, la proportion, la symétrie les plus belles.

Et quoique le Centre, la Surface et l'Intervalle soient assurément trois, ils ne font qu'un, de sorte que l'on ne peut, même en pensée, en séparer un des autres sans que le tout soit détruit.

Tout point laisse la lumière s'écouler selon un nombre infini de lignes. Ceci, afin qu'il éclaire tout l'orbe qui l'environne, comme nous avons dit que cela doit être. Or le Sphérique contient une infinité de lignes. *Prop. II.*

La lumière est apte à se propager par elle-même à l'infini. En effet, puisqu'elle participe de la quantité et de la densité, selon ce qui précède, elle ne pourra s'annuler pour aucune amplitude: car la quantité, comme la densité, se divisent à l'infini. Ceci du point de vue de l'essence. Mais de plus la force de projection est infinie puisque selon ce qui précède, la lumière n'a pas de matière ni de poids, c'est à dire pas de résistance. De sorte que pour elle, le rapport de la vertu au poids est infini. *Prop. III.*

Les lignes de ces projections sont des droites, et on les nomme rayons. Nous avons affirmé en effet que la lumière cherche à imiter la forme d'une sphère. Or la genèse géométrique de celle-ci repose sur l'égalité des segments au moyen desquels le point central est répandu sur la surface: et ces segments sont des lignes droites. *Prop. IV.*

Le mouvement de la lumière ne se fait pas dans le temps mais dans l'instant. *Prop. V.*

Le rayon de lumière n'est nullement la lumière elle-même qui émane [...] le rayon n'est rien d'autre que le mouvement même de la lumière. Dans le mouvement physique, le mouvement lui-même est une ligne droite, et le mobile physique est un corps; dans la lumière il en va exactement de même: le mouvement est une ligne droite, et le mobile une certaine surface. *Prop. VI.*

Le caractère immatériel de la lumière est notamment accrédité par le fait que des lumières de différentes couleurs peuvent se croiser sans se mélanger.

VIDÉO

Kepler élucide le fonctionnement de la chambre noire. Il était confronté à l'interprétation d'images inversées: si l'orifice de la chambre est suffisamment petit, il est le lieu de croisement des rayons issus d'un objet étendu, et celui-ci apparaîtra inversé sur le fond de la chambre qui tient lieu d'écran.

VIDÉO

Travaillant en incidence faible, typiquement moins de 30° , il établit dans la *Diotrique*, qu'angles de réfraction r et d'incidence i sont proportionnels, le coefficient de proportionnalité dépendant de la nature des milieux traversés. Cette loi approximative lui permettra de suivre le cheminement des rayons lumineux dans la lunette et d'expliquer ainsi son fonctionnement. Il ne parvient cependant pas à trouver une formulation générale de la réfraction²⁷.

S'intéressant au fonctionnement de l'œil, il condamne l'artifice d'Al-Haitam qui consiste à privilégier les rayons perpendiculaires à l'œil en leur attribuant une force prépondérante.

Il argumente que les rayons *quasi* perpendiculaires, qui ne sont pratiquement pas déviés par la réfraction, n'ont pas de raison d'avoir notablement moins de force que ceux qui sont exactement perpendiculaires.

Ses travaux sur la réfraction lui permettent de faire converger en un point une famille de rayons occupant le centre du champ visuel (faibles incidences). Kepler, qui a connaissance des travaux des anatomistes contemporains, adopte le point de vue de Félix Platter qui attribue la zone de la formation des images non plus au cristallin, mais à la rétine. Les rayons optiques se croisent après le cristallin et forment une image inversée de l'objet sur la rétine. Il fait s'arrêter là le domaine de l'optique et s'en remet au cerveau pour formuler l'hypothèse que ce dernier interprète l'image inversée comme une image à l'endroit.

Le mécanisme de la vision ainsi élucidé, Kepler explique clairement le rôle des lentilles convexes et concaves dans l'amélioration de la presbytie et de la myopie.

V. Une optique mécaniste et formalisée.

V.1. Descartes et le modèle mécanique de la lumière.

Les travaux de **René Descartes** (1695-1650) en optique datent des années 1620-1629. Son projet initial avait été de donner une explication unifiée du monde qui devait figurer dans le *Monde ou Traité de la lumière*. La nature de la lumière y était étroitement liée à un modèle

²⁷ Kepler s'intéresse en fait à l'angle de déviation qu'il montre être proportionnel à l'angle d'incidence pour les petits angles. Cette proportionnalité entraîne celle de l'angle de réfraction avec l'angle d'incidence comme il est d'usage de l'écrire dans l'approximation de la loi de Snell-Descartes.

cosmologique. Ce traité incluait également une partie sur *L'Homme*. Ce projet fut repoussé en raison, entre autres, de la condamnation de Galilée en 1633.

Descartes renonce temporairement à toute explication cosmologique et publie en 1637 trois essais : la *Dioptrique*, les *Météores* et la *Géométrie* qui font suite au *Discours de la méthode* dont ils constituent des applications. C'est dans les *Principes de la Philosophie* publiés en 1644 que Descartes livre plus précisément sa conception de la lumière.

Descartes défend une méthode rationnelle d'approche des problèmes, quelle que soit la discipline étudiée, dont il donne la philosophie dans le *Discours* et le mode opératoire dans les *Règles pour la direction de l'esprit*. C'est dans cette méthode que réside la démarche cartésienne.

La lumière occupe une place centrale dans l'œuvre scientifique de Descartes, comme il l'écrit lui-même dans le *Discours* à propos d'un ouvrage qu'il n'a pas publié (*Le Monde*) dans lequel

Cit. ... j'entrepris seulement d'y exposer bien amplement ce que je concevais de la lumière; puis, à son occasion, d'y ajouter quelque chose du soleil et des étoiles fixes, à cause qu'elle en procède presque toute ; des cieux, à cause qu'ils la transmettent ; des planètes, des comètes et de la Terre, à cause qu'elles la font réfléchir ; et en particulier de tous les corps qui sont sur la Terre, à cause qu'ils sont ou colorés, ou transparents, ou lumineux ; et enfin de l'homme, à cause qu'il en est le spectateur.

Contrairement aux *Principes*, ouvrage difficile destiné à l'enseignement et rédigé en latin dans lequel Descartes livre une théorie complète de la lumière, il fait preuve d'un certain pragmatisme en procédant par analogies, dans la *Dioptrique*:

Cit. Or n'ayant ici autre occasion de parler de la lumière, que pour expliquer comment ses rayons entrent dans l'œil, et comment ils peuvent être détournés par les divers corps qu'ils rencontrent, il n'est pas besoin que j'entreprenne de dire au vrai quelle est sa nature, et je crois qu'il me suffira que je me serve de deux ou trois comparaisons, qui aident à la concevoir en la façon qui me semble la plus commode, pour expliquer toutes celles de ses propriétés que l'expérience nous fait connaître, et pour déduire ensuite toutes les autres qui ne peuvent pas si aisément être remarquées. Imitant en ceci les astronomes, qui, bien que leurs suppositions soient presque toutes fausses ou incertaines, toutefois, à cause qu'elles se rapportent à diverses observations qu'ils ont faites, ne laissent pas d'en tirer plusieurs conséquences très vraies et très assurées.

La première analogie est celle de l'aveugle à qui son bâton transmet une information *instantanée*

Cit. Et pour tirer une comparaison de ceci, je désire que vous pensiez que la lumière n'est autre chose, dans les corps qu'on nomme lumineux, qu'un certain mouvement, ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux, par l'entremise de l'air et des autres corps transparents, en même façon que la résistance des corps, que rencontre cet aveugle, passe vers sa main, par l'entremise de son bâton. Ce qui vous empêchera d'abord de trouver étrange, que cette lumière puisse étendre ses rayons en un instant, depuis le soleil jusques à nous : car vous savez que l'action, dont on meut l'un des bouts du bâton, doit ainsi passer en un instant jusques à l'autre, et qu'elle y devrait passer en même sorte, encore qu'il y aurait plus de distance qu'il n'y en a depuis la terre jusques aux cieux.

On retrouve cette idée dans la règle IX où Descartes justifie l'analogie du bâton pour illustrer une propagation d'un *signal*, et non pas le mouvement d'un corps matériel :

Cit. Ainsi par exemple, supposons que je veuille examiner s'il existe quelque puissance naturelle qui puisse dans un même instant passer dans un lieu éloigné, en traversant l'espace intermédiaire, je n'irais pas tourner sitôt ma pensée du côté de la force magnétique, ou de l'influence des astres, ni même de la vitesse de la lumière, pour rechercher si par hasard des actions semblables s'exercent en un instant : car il me faudrait plus de mal pour le démontrer que pour ce qui fait l'objet de mon enquête ; mais plutôt, je réfléchirais aux mouvements locaux des corps, car il ne peut rien se trouver, en tout ce domaine, de plus accessible au sens. Et je remarquerai qu'une pierre ne peut passer d'un lieu dans un autre en un instant, parce qu'elle est un corps ; mais qu'une puissance semblable à celle qui meut la pierre ne se communique qu'en un instant, si elle passe à l'état nu d'un sujet dans un autre. Par exemple, si je bouge l'une des extrémités d'un bâton aussi long qu'on voudra, je me représente facilement que la puissance qui met en mouvement cette partie du bâton fasse nécessairement mouvoir aussi, en un seul et même instant, toutes ses autres parties, parce qu'alors elle se communique à l'état nu, sans résider dans quelque corps, une pierre par exemple, qui la transporterait avec lui.

Prétendre que l'on peut à partir d'analogies se rapprocher d'une certaine vérité est assez délicat. Descartes montre ici qu'il considère sa conviction comme une justification parce que l'image lui en apparaît clairement, alors que la notion d'instantanéité n'est ici relative qu'à l'individu. Il justifiera également l'instantanéité de la lumière par des observations astronomiques, à partir d'éclipses de Lune. Il commettra l'erreur de ne pas tenir compte de la précision finie de ses mesures, ce que soulignera Huygens. Descartes est cependant très sûr de lui

Cit. La lumière parvient du corps lumineux à nos yeux en un instant [...]. J'ai même ajouté que c'est pour moi tellement certain que si l'on pouvait en prouver la fausseté, j'étais prêt à confesser ma pleine ignorance de la philosophie. *A Beekman, 22 août 1634. Rodis-Lewis.*

L'analogie précédente permet d'illustrer que la lumière consiste en une certaine *action*, dans un milieu. Cependant Descartes ne s'affranchit pas totalement de la vision des Anciens, en ce qu'il considère qu'en de rares cas, par exemple pour les chats, la lumière peut provenir des yeux.

Dans l'analogie suivante, celle d'une cuve remplie de vin et de grappes de raisins, Descartes affine son modèle. Les grappes jouent le rôle de l'air ou de corps. Dans la philosophie cartésienne, il n'y a pas de vide, mais « quelque matière fort subtile et fort fluide » qui remplit les « pores » des corps. Cette matière « s'étend sans interruption depuis les Astres jusques à nous ». Elle est comparée avec le vin de la cuve qui s'écoule en ligne droite entre les grappes de raisins. De même, « toutes les parties de la matière subtile, que touche le côté du soleil qui nous regarde, tendent en ligne droite vers nos yeux ... ». Descartes fait la distinction entre le mouvement, et « l'action ou l'inclination à se mouvoir ». Ainsi, les contraintes qui s'exercent sur la matière subtile peuvent l'empêcher de s'écouler dans la direction qui lui serait naturelle, et de produire un mouvement différent. Pour Descartes, « ce n'est pas tant le mouvement, comme l'action des corps lumineux qu'il faut prendre pour leur lumière ». Cette *tension* peut

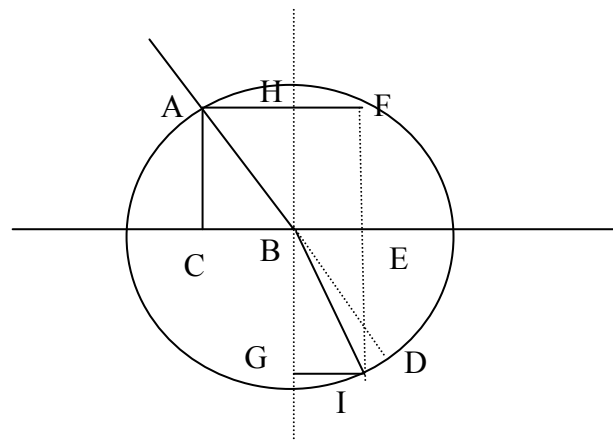
être vue comme une sorte de pression dans le milieu. « Les rayons de cette lumière ne sont autre chose, que les lignes suivant lesquelles tend cette action ».

Ces analogies, destinées à illustrer des considérations théoriques, ne permettent pas de conduire à des résultats quantitatifs. Pour ce faire Descartes en utilise une troisième :

Cit. Au reste ces rayons doivent bien être ainsi toujours imaginés exactement droits, lorsqu'ils ne passent que par un seul corps transparent, qui est partout égal à soi-même: mais lorsqu'ils rencontrent quelques autres corps, ils sont sujets à être détournés par eux, ou *amortis*, en même façon que l'est le mouvement d'une balle, ou d'une pierre jetée en l'air, par ceux qu'elle rencontre. Car il est bien aisé de croire que l'action ou l'inclination à se mouvoir, que j'ai dit devoir être prise pour la lumière, doit suivre en ceci les mêmes lois que le mouvement.

Ainsi, la lumière consiste en une action qui se fait ressentir instantanément, pendant que le rayon de cette action, le rayon de lumière, obéit aux lois du mouvement et peut être amorti, c'est à dire ralenti. Cette *dualité* rend la théorie quelque peu incohérente. Elle porte le germe aussi de ce qui sera la source de la polémique entre Descartes et Fermat.

Pour établir les lois de la réfraction, il établit le raisonnement suivant :



Le mouvement de la balle se compose d'un mouvement parallèle à la surface et d'un mouvement perpendiculaire à cette surface. Le mouvement parallèle en B n'est pas affecté par la présence de la surface. Le mouvement perpendiculaire est modifié. S'agissant d'une balle rencontrant une toile ou pénétrant dans l'eau, le mouvement perpendiculaire s'affaiblit et la trajectoire s'éloigne de la normale dans le milieu plus dense où la balle pénètre. Le phénomène observé pour la lumière est opposé : le rayon réfracté se rapproche de la normale dans un milieu comme l'eau ou le verre quand le rayon incident est dans l'air. Il faut donc « prendre aussi à revers cette conclusion » et supposer « enfin d'autant que la lumière suit en cela les mêmes lois que la balle », que la balle modélisant la lumière subit une force en B qui augmente « la force de son mouvement » de $\frac{1}{3}$ par exemple. Il s'ensuit que son mouvement est facilité dans les mêmes proportions et ainsi de sa vitesse dans le second milieu (pour Descartes force et vitesse sont proportionnelles). La balle se déplace en ligne droite dans le second milieu jusqu'à un point I à déterminer de la circonférence du cercle de centre B et de rayon OA. La balle atteint le point I dans une durée moindre de un tiers par rapport au temps mis pour parcourir une distance égale AB dans le milieu incident. Le mouvement parallèle

n'ayant pas varié, elle se trouvera sur une ligne FE plus proche de HB de $1/3$ que HB ne l'était de AC. Descartes trace donc la « ligne » FE telle que $BE = 2/3$. Le point I se trouve à l'intersection de cette ligne et du cercle, dans le second milieu.

Cette construction est valable quelque soit le rayon incident AB tracé. Pour un réfraction donnée, entre deux milieux, un rapport tel que CB à EB permet de déterminer le rapport des vitesses dans les deux milieux. Ce rapport est constant. Il constitue la loi de la réfraction :

Cit. Seulement faut-il prendre garde que cette inclination se doit mesurer par la quantité des lignes droites, comme CB ou AH, et EB ou IG, et ensembles, comparées les unes aux autres ; non par celle des angles, tels que sont ABH ou GBI, ni beaucoup moins par celle des semblables à DBI, qu'on nomme les angles de réfraction. Car la raison ou proportion qui est entre ces angles, varie à toutes les diverses inclinations des rayons ; au lieu que celle qui est entre les lignes AH et IG ou semblables, demeure la même en toutes les réfractions qui sont causées par les mêmes corps. *La dioptrique. Discours second.*

En désignant par i l'angle d'incidence ABH et r l'angle de réfraction GBI, le rapport de CB à BE s'exprime par le rapport $\sin i$ à $\sin r$. La « loi des sinus » ne sera exprimée en tant que telle que dans une lettre de Descartes à Mersenne de juin 1632²⁸.

Le raisonnement de Descartes repose sur une analogie mécanique et une hypothèse : celle que la vitesse dans le milieu le plus réfringent est plus grande. Devant la validité de la relation à laquelle il aboutit, Descartes en vient à valider cette hypothèse qu'il sait contraire à l'intuition, et à lui trouver une justification. Il écrit :

Cit. Ce que vous cesserez toutefois de trouver étrange, si vous vous souvenez de la nature que j'ai attribuée à la lumière, quand j'ai dit qu'elle n'était autre chose, qu'un certain mouvement ou une action reçue en une matière très subtile, qui remplit les pores des corps ; et que vous considériez que, comme une balle perd davantage de son agitation, en donnant contre un corps mou, que contre un qui est dur, et qu'elle roule moins aisément sur un tapis, que sur une table toute nue, ainsi l'action de cette matière subtile peut beaucoup plus être empêchée par les parties de l'air, qui, étant comme molles et mal jointes, ne lui font pas beaucoup de résistance, que par celles de l'eau, qui lui en font davantage ; et encore plus par celles de l'eau, que par celles du verre ou du cristal. En sorte que d'autant que les petites parties d'un corps transparent sont plus dures et plus fermes, d'autant laissent-elles passer la lumière plus aisément : car cette lumière n'en doit pas chasser aucunes hors de leur place, ainsi qu'une balle en doit chasser de celles de l'eau, pour trouver passage parmi elles.

L'analogie de la balle a un autre mérite pour Descartes: elle lui permet d'expliquer les couleurs. Il lui suffit pour cela d'introduire un paramètre supplémentaire:

Cit. Et il faut remarquer que la balle, outre son mouvement simple et ordinaire, qui la porte d'un lieu en l'autre, en peut encore en avoir un deuxième, qui la fait tourner autour de son centre, et que la vitesse de celui-ci peut avoir plusieurs diverses proportions avec celle de l'autre.

²⁸ note de Frédéric de Buzon. La dioptrique in Discours de la métjode. Folio essai.

Ces considérations sont inspirées des effets qui peuvent être mis dans une balle de jeu de paume. Les couleurs ne sont pas une propriété intrinsèque de la lumière. Elles procèdent d'une altération de la lumière blanche, lors de la rencontre d'une surface matérielle, à la frontière avec l'ombre. Cette réflexion est notamment inspirée à Descartes par l'expérience du prisme.

VIDÉO

A la limite de l'ombre et de la lumière, les petites boules constituant le milieu de propagation de la lumière sont mises en rotation en des sens opposés, l'un donnant du bleu et l'autre du rouge. Dans les théories de l'Antiquité, les différentes couleurs sont considérées comme un mélange dosé en proportion de blanc et de sombre. La tentative d'explication de Descartes qui fait jouer un rôle particulier à l'obscurité, vise à donner une formulation mécaniste de ce type de théories.

La paternité de la découverte des lois de la réfraction énoncées par Descartes est controversée. Il est reconnu que **Willebrod Snellius** (Leyde 1591-1626) a démontré la loi des sinus, sous une forme différente, en 1625. Remarquons ce passage du *Discours*

Cit. Car pour les opinions, qui sont toutes miennes, je ne les excuse point comme nouvelles, d'autant que si on en considère bien les raisons, je m'assure qu'on les trouvera si simples, et si conformes au sens commun, qu'elles sembleront moins extraordinaires, et moins étranges, qu'aucunes autres qu'on puisse avoir sur mêmes sujets. Et je ne me vante point aussi d'être le premier inventeur d'aucunes, mais bien que je ne les ai jamais reçues, ni pource qu'elles avaient été dites par d'autres, *ni pource qu'elles ne l'avaient point été*, mais seulement pource que la raison me les a persuadées.

Ce passage tend à montrer que l'objectif de Descartes n'est pas tant de formuler des concepts entièrement novateurs, que de faire sien des raisonnements qui peuvent avoir été produits par d'autres, en les reformulant conformément à sa méthode. Descartes peut très bien avoir eu connaissance des résultats de Snell, et en rechercher une interprétation *convaincante* qui le conduise à une nouvelle démonstration. Le fait que Descartes semble avoir été informé de la démonstration de Snell peut être étayé par ce qu'écrit Leibniz à ce sujet :

Cit. C'est pourquoi le Très illustre Spleissius, Homme très versé également dans ces études [optiques] ne doute pas de la chose, si Descartes, puisqu'il était en Hollande, avait vu le théorème de Snell ; en effet il remarque qu'il avait coutume d'omettre le nom des auteurs, et il apporte l'exemple des *tourbillons* de l'univers que Giordano Bruno et Jean Kepler montrèrent du doigt, de sorte qu'il semble que ce mot leur ait seulement fait défaut. Il arrive que Descartes, pour démontrer son théorème par sa propre force, tombe dans de grandes aspérités ... *Unique principe d'optique*.

V.2. Fermat et la théorie du temps le plus bref.

Pierre de Fermat (1601-1665), magistrat à Toulouse, est auteur d'importants travaux en mathématiques. Il fonde la géométrie analytique indépendamment de Descartes en 1636, apparaît comme un précurseur du calcul différentiel par ses *Méthode pour la recherche des maxima et des minima*, fonde avec Pascal le calcul des probabilités et doit sa célébrité à ses travaux en théorie des nombres. Une copie du manuscrit de Descartes lui parvient par

l'intermédiaire du père Marin Mersenne qui centralise l'information scientifique d'alors grâce à ses nombreux correspondants. A la demande de Mersenne, Fermat livre une critique de la *Dioptrique* alors qu'il n'a eu l'ouvrage que peu de temps entre les mains. Dans une première lettre d'avril ou mai 1637, il écrit qu'il « doute premièrement, et avec raison ce me semble, si l'inclination au mouvement doit suivre les lois du mouvement même », point clef du raisonnement cartésien qui justifie l'analogie de la balle pour expliquer la réfraction, et que Descartes avait présenté comme une « évidence ». Ce point est malheureusement occulté par une critique géométrique inappropriée relative à la décomposition du mouvement. Descartes perçoit très mal cette lettre venant d'un inconnu qui poursuit des travaux géométriques concurrents, qu'il reçoit alors que son manuscrit n'est pas encore sous presse, lui qui en retardait la publication pour ne pas perdre de temps en polémiques. Il répond à Mersenne et conclut ainsi:

Cit. Mais de quelque qualité que soient les objections qu'on voudra faire contre mes écrits, vous m'obligerez, s'il vous plaît, de me les envoyer toutes, et je ne manquerai pas d'y répondre; au moins si elles ou leurs auteurs en valent un tant soit peu la peine...

La polémique s'amplifie suite aux objections que Fermat adresse sur la réfraction. Fermat critique l'hypothèse suivant laquelle la lumière se propage plus vite dans les milieux denses, mais il ne formule pas alors de démonstration alternative. Après quelques échanges épistolaires, la polémique s'estompe et la lettre du 27 juillet 1638 que Descartes adresse à Fermat débute ainsi

Cit. Je n'ai pas eu moins de joie à recevoir la Lettre par laquelle vous me faites la faveur de me promettre votre amitié, que si elle venait de la part d'une maîtresse, dont j'aurais passionnément désiré les bonnes grâces.

Ce n'est qu'après la mort de Descartes que Fermat rend publique, sur l'instance des cartésiens, sa démonstration des lois de la réfraction.

Fermat étend à la réfraction le principe de Héron d'Alexandrie relatif à la réflexion. Le principe de Héron reposait sur le trajet le plus court en *distance*. Ce principe ne peut être transposé tel quel à la réfraction puisque le rayon lumineux se brise à la surface de séparation et n'emprunte pas le trajet le plus court en distance, qui serait celui pour lequel il n'est pas dévié. Fermat formule un principe qui porte sur la minimisation du *temps de parcours* de la lumière dans les différents milieux. Il calcule ce temps de parcours en divisant la distance parcourue par la *vitesse de la lumière*, supposée *plus petite dans les milieux denses*. La vitesse de la lumière dans un milieu est inversement proportionnelle à la résistance de ce milieu pour Fermat. Il développe la démonstration géométrique suivante.

Soit BFH le rayon lumineux passant de l'air à l'eau en se brisant en F , tel que $BF = FH$, a et b les projections respectives de BF et FH sur le dioptré. Les quantités a et b sont par hypothèse respectivement proportionnelles à la résistance de l'eau et de l'air au passage de la lumière. Il représente par FH le temps de parcours de la lumière de F à H dans l'eau. Dans l'air, où la lumière se déplace plus vite, le temps de parcours est représenté par iF plus petit que BF dans le rapport b/a : $iF = b/a \cdot BF$.

Principe : La lumière emprunte le chemin qui minimise $(iF + FH)$.

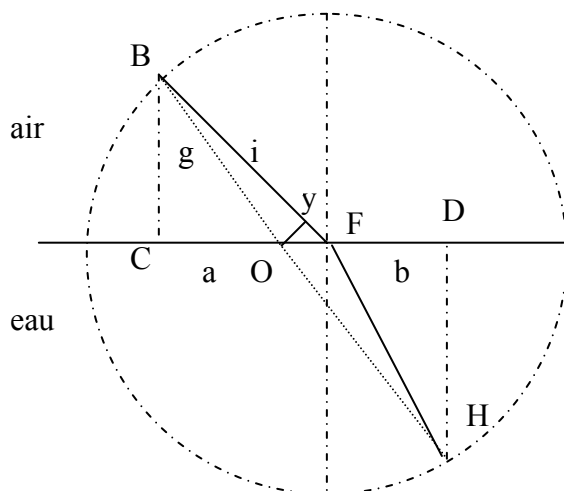
Pour le démontrer, il considère un point O distant de ε de F sur le dioptre. Le temps de parcours de la lumière est représenté par OH dans l'eau et par $gO=(b/a)BO$ dans l'air. Il s'agit de montrer que $(gO+OH) > (iF+FH)$.

Soit y la projection orthogonale de O sur FH : $Fy=b\varepsilon /FH$. L'application du théorème de Pythagore donne $HO > Hy$. La démonstration serait simplifiée si $gO > iF+Fy$, i.e.

$gO^2 > (iF+Fy)^2$ (pour éviter les racines). Dans le triangle BFO , $BO^2 = BF^2 + \varepsilon^2 + 2a\varepsilon$, d'où après multiplication par $(b/a)^2$ et avec les définitions de gO et iF ,

$$gO^2 = iF^2 + (2b^2/a)\varepsilon + (b^2/a^2)\varepsilon^2 \quad \text{Or} \quad (iF+Fy)^2 = iF^2 + (2b^2/a)\varepsilon + (b^2/BF^2)\varepsilon^2$$

$BF > a$ implique que $gO^2 > (iF+Fy)^2$, c.q.f.d. compte tenu de $HO > Hy$.



Fermat est très surpris de parvenir ainsi à la loi des sinus de Descartes, en étant parti d'un point de vue radicalement opposé sur la vitesse de la lumière dans les différents milieux. Il écrit à ce propos dans une lettre adressée à M. Cureau de la Chambre, médecin du roi:

Cit. Le prix de mon travail a été le plus extraordinaire, le plus imprévu et le plus heureux qui fut jamais. Car après avoir couru par toutes les équations, multiplications, antithèses et autres opérations de ma méthode, et avoir enfin conclu le problème ..., je trouvais que mon principe donnait justement et précisément la même proportion des réfractions que M. Descartes a établie. J'ai été si surpris d'un événement si peu attendu que j'ai peine à revenir de mon étonnement. J'ai réitéré mes opérations algébriques diverses fois, et toujours le succès a été le même, quoique ma démonstration suppose que le passage de la lumière par les corps denses soit plus malaisé que par les corps rares, ce que je crois très vrai et indispensable, et que M. Descartes suppose le contraire.

Fermat est prêt à donner tout le mérite de la découverte des lois des sinus à Descartes, mais argumente pour qu'au moins d'un point de vue géométrique, sa démonstration ait droit de cité. Il conclut sa lettre ainsi:

Cit. C'est à vous, Monsieur, qui êtes sans doute destiné par votre mérite extraordinaire à avoir grand commerce avec elle [la postérité], à l'informer si vous le jugez à propos, de ce célèbre démêlé ou, si vous pensez mieux placer ce petit écrit parmi vos papiers inutiles, j'y consens et tout m'est indifférent...

Le principe que développe Fermat est d'inspiration métaphysique car "la Nature agit toujours suivant les voies les plus courtes". Cette origine métaphysique empêche les cartésiens d'adhérer à la démonstration de Fermat, car cela signifierait à leurs yeux que la lumière a en mémoire le trajet qu'elle a déjà effectué avant de changer sa direction, lors d'une réfraction. Le principe de temps le plus court permet d'unifier les lois de la propagation rectiligne, de la réflexion, et de la réfraction en leur donnant une explication commune.

V.3. Leibniz et la voie la plus aisée.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) applique les règles du calcul différentiel qu'il a énoncées pour établir la loi des sinus à partir du postulat suivant lequel le trajet effectif de la lumière « doit être pris tel que le chemin soit le plus facile de tous. Alors les difficultés du chemin dans les divers milieux sont en raison composée et de la longueur des chemins, et de la résistance des milieux ». En désignant par c et d respectivement les hauteurs BC et HD , par p et q les longueurs BO et OH , par l la longueur CD , et par m et n les résistances respectives de l'air et de l'eau, la quantité $mp+nq = m\sqrt{c^2+x^2} + n\sqrt{(l-x)^2+d^2}$ « doit être la plus petite de toutes les quantités à exprimer pareillement; et est recherchée [x] qui la fasse telle ». Un calcul immédiat de différentiation par rapport à x donne la condition $mqx = np(l-x)$; or $(l-x)/q = \sin r$ et $x/p = \sin i$ d'où $m \sin i = n \sin r$.

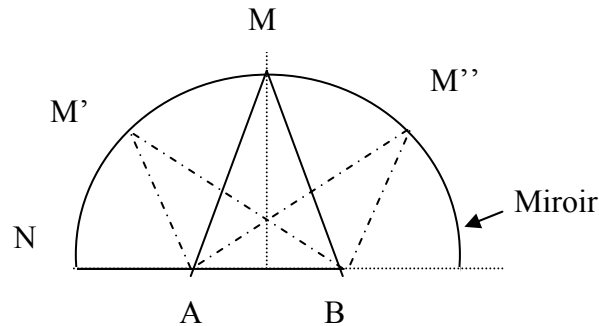
L'analyse de Leibniz est plus concise que celle de Fermat, grâce à l'utilisation du calcul différentiel. L'hypothèse qui sous-tend le principe de Leibniz s'oppose cependant à celle de Fermat. Leibniz ne mentionne dans son énoncé que la résistance des milieux. L'eau, ou le verre, sont plus résistants que l'air, d'un point de vue mécanique. Cependant, Leibniz s'accorde avec Descartes en ce que le passage de la lumière est plus aisé dans les corps les plus résistants. Il s'ensuit pour Leibniz que *la vitesse de la lumière est plus grande dans les milieux plus denses*, et que le principe de « plus grande facilité » ne doit pas être confondu avec un « principe de moindre temps ».

L'inspiration du principe est toujours métaphysique. Il écrit à ce propos « mais le Fondateur des choses créa la lumière de telle sorte que de sa nature naquît ce très beau résultat ». Sur cette base, Leibniz critique l'attitude des cartésiens:

Cit. C'est pourquoi ils se trompent beaucoup, pour ne pas dire plus gravement la chose, ceux qui rejettent en physique les *causes finales* avec Descartes ; puisque cependant, outre l'admiration de la divine sagesse, elles nous offrent à trouver un très beau principe, également les propriétés de ces choses dont la nature intime n'est pas encore si clairement connue par nous que nous ayons le pouvoir de les expliquer, d'utiliser les causes efficientes et les artifices que le créateur employa pour produire leurs effets et pour obtenir leurs fins. Nous comprenons encore de là que les méditations des anciens sur ces choses ne sont pas à mépriser, comme il semble aujourd'hui à certains. Car pour moi il est fait très vraisemblable que les grands géomètres Snell et Fermat très versés dans la géométrie des Anciens ont livré pour l'optique une méthode dont ils se servaient en Catoptrique. A bon droit je soupçonne que le théorème de Snell [...] a été trouvé par une méthode presque semblable ...

La *voie la plus aisée* de l'*unicum Opticae Catoptricae et Dioptricae principium* de 1682 apparaît sous un jour nouveau dans les *Tentamen Anagoricum* de 1690. Elle devient la *voie la plus déterminée*. Cette notion est plus générale. Elle recouvre sous un principe unique aussi bien une notion de minimum que de maximum. Ainsi, la réflexion sur des surfaces non planes

ne se fait plus systématiquement par le chemin le plus aisé, à savoir le plus court. Sur l'exemple suivant, on considère les différents chemins que peut emprunter un rayon lumineux issu d'un point A appartenant à un diamètre d'un miroir sphérique pour atteindre un point B symétrique de A par rapport au centre de ce miroir.



Les lois de la réflexion sont vérifiées pour le trajet AMB figuré sur le schéma ci-dessus. Or on peut montrer que ce trajet est plus long que n'importe lequel des trajets AM'B correspondant à une position M' de M différente sur la surface du miroir. Ainsi le trajet le plus long est celui qui est « choisi » par la lumière. Pour reprendre cet exemple, tout trajet AM'B a un symétrique, un jumeau représenté par AM''B. Seul le trajet AMB est *unique*. La *détermination* rejoint donc l'*unicité*, la *simplicité*, et se confond dans l'analyse différentielle avec la notion d'*extremum*.

Cit. Le rayon rompu arrive toujours du point d'un milieu, au point de l'autre milieu, par le chemin le plus déterminé, ou l'unique, qui pour ainsi dire n'a point de frère jumeau.

Sur l'exemple précédent, le raisonnement peut être complété en remarquant que le trajet ANB est également suivi par la lumière et correspond au trajet le plus court, tout en vérifiant le principe précédent.

Commentaire : jusqu'à présent la propagation rectiligne de la lumière a été mise en évidence, son sens de propagation également, le fonctionnement de l'œil est correctement décrit, les lois de la réflexion et de la réfraction sont clairement formulées. Quelles interrogations subsistent encore?

VI. Découverte de la diffraction.

L'œuvre du père **Francesco Maria Grimaldi** (Bologne 1618 – Bologne 1663) intitulée *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, est publiée à titre posthume en 1665.

Grimaldi découvre une propriété nouvelle de la lumière et lui donne un nom : la *diffraction*.

Cet ouvrage comporte 573 pages dans lesquelles Grimaldi s'interroge sur la nature de la lumière. Le livre commence par la découverte de la diffraction comme l'indique le titre de la première proposition

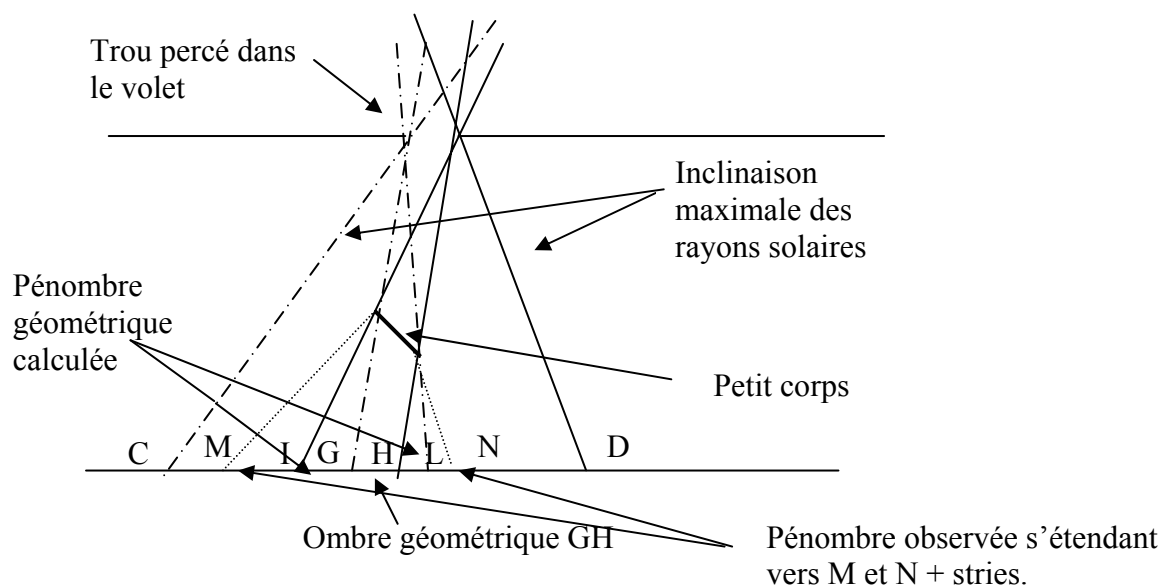
Cit. Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directe, Refracte, ac Reflexe, sed etiam alio quodam Quarto modo, diffracte. *Prop.I.*

Après avoir rappelé que la lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène, qu'elle se réfléchit suivant l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, et qu'elle se réfracte suivant la loi des sinus, Grimaldi introduit l'origine du terme diffraction de la manière suivante :

Cit. Nobis alius Quartus modus illuxit, quem nunc proponimus, vocamusq ; Diffractionem, quia advertimus lumen aliquando diffringi, hoc est partes eius multiplici dissectione separatas per idem tamen medium in diversa ulterius procedere, eo modo, quem mox declarabimus. *num. 5.*

Experimentum primum. Grimaldi se place dans une chambre dont il a fermé les volets. Il perce un très petit trou dans un volet. La lumière du soleil s'introduit dans la pièce sous la forme d'un cône lumineux, qui se « matérialise » à l'observation par les poussières présentes dans l'air. Il reçoit la base de ce cône sur une table recouverte d'une feuille blanche qui lui sert d'écran. Il place un petit corps opaque dans le trajet de la lumière à une grande distance du petit trou et en observe l'ombre projetée sur la table.

La source lumineuse qu'utilise Grimaldi est le soleil, qui est un objet étendu. Le petit corps opaque projette alors sur la table une ombre à côté de laquelle se trouve une zone de pénombre, conformément aux lois de l'optique géométrique, et comme l'indique le schéma ci-dessous, qui reproduit le schéma de l'expérience donnée par Grimaldi.



Grimaldi calcule la taille que devrait avoir la zone d'ombre et de pénombre en fonction de la largeur du trou et de la taille du corps opaque et remarque que la zone de pénombre observée est plus grande que celle qu'aurait dû lui donner les lois de l'optique en supposant la propagation rectiligne de la lumière depuis l'ouverture dans le volet.

Cit. Itaq ; in figura ponamus umbram per calculum, & suppositis lineis rectis deductam ut supra, esse IL ; umbram vero de facto apparente in observatione esse MN.

VIDÉO

Cette manière de présenter les choses peut laisser supposer que Grimaldi a été amené à découvrir la diffraction en cherchant à vérifier la propagation rectiligne de la lumière. Il se fabrique une source lumineuse et calcule la dimension de l'ombre projetée par un petit obstacle. Pour conclure en la propagation rectiligne de la lumière, Alhazen avait utilisé le principe de la chambre obscure en s'intéressant directement à la lumière qui entrait dans la pièce. Kepler avait analysé le principe de la chambre obscure et montré que si l'ouverture d'entrée était large, la lumière issue de la source et recueillie sur l'écran en était affectée. Il peut sembler logique que Grimaldi ait alors essayé d'utiliser un trou aussi petit que possible, compatible avec la nécessité d'avoir assez de lumière pour réaliser les observations. Le cône lumineux obtenu lui sert alors à éclairer son dispositif expérimental, composé de l'obstacle et de l'écran. En éloignant l'obstacle du trou, dès que le trou apparaît suffisamment ponctuel vu de l'obstacle, le phénomène que décrit Grimaldi apparaît.

En extrapolant les données quantitatives données par Grimaldi pour sa seconde expérience, on peut estimer que le trou a un diamètre de quelques dixièmes de millimètres et que le petit corps opaque se trouve à quelques mètres.

En outre, à côté de cette zone de pénombre, en direction de la limite du cône lumineux, Grimaldi observe trois séries de raies colorées, bleues à l'intérieur et rougeâtres à l'extérieur :

Cit. Praeterea observetur super lucidae basis parte CM, & ND, nitide ac fortiter illustrata, spargi & distingui tractus aliquos, seu series luminis colorati, ita ut in qualibet serie sit in medio quidem lux valde pura et sincera, in extremis autem sit color aliquis, nempe caeruleus in extremo ipsi umbrae MN propinquiore, & rubeus in extremo remotiore : quae series lucidae licet dependeant à quantitate foraminis AB, quia non apparent si illud esset maiusculum, non sunt tamen ab eo determinatae, sicut nec determinantur à quantitate diametri Solaris, ut constabit ex dicendis. *num. 9.*
... Quod ut clarius explicemus, in sequenti figura prope umbram X ab opaco, ut supra, proiectam, acterminatam in tabella, seu folio chartae mundaе, repraesententur tres illae series lucidae, singulae ex tribus velut fasciis constantes. *num. 11*

Grimaldi s'intéresse alors à ces raies colorées et il observe qu'elles suivent le contour géométrique de l'obstacle :

Cit. Porro observetur, praedictas omnes series esse parallelas umbrae ab opaco proiectae, adeoq ; rectas si opaci extremum lucido incertum rectum fuerit, & curvas si curvum. *num. 13.*

Outre les franges irisées dans la partie éclairée, Grimaldi observe aussi des franges lumineuses dans l'ombre projetée par le corps :

Cit. Numerus autem serierum super umbra apparentium, eo major erit, caeteris paribus, quo latior fuerit lamina, seu virga inserta cono : eruntq ; illae ad minimum duae, & si crassior virga adhibeatur erunt quatuor. *num. 15.*

Grimaldi prend alors beaucoup de soin à prouver que ces phénomènes traduisent un comportement nouveau de la lumière, qui ne peut pas être ramené aux connaissances antérieures concernant la propagation rectiligne de la lumière, la réflexion ou la réfraction. Il se doit donc d'examiner un à un chaque cas.

Il établit que le phénomène n'est pas associé à une propagation rectiligne de la lumière depuis l'ouverture aménagée dans le volet, puisque la zone de pénombre est perturbée par des franges qui ne sont pas dans l'alignement du trou et de l'obstacle.

Il ne peut s'agir de réflexion ou de réfraction sur l'obstacle, car la répartition de lumière observée ne dépend notamment pas des caractéristiques du corps opaque :

Cit. Hic autem nulla intervenit mutatio medij, nec assignari potest cur tanta determinatè fiat Refractio, sive obliquatio luminis incidentis in superficiem corporis, quod sensibiliter non penetrat : praesertim cum omnia pari modo eveniant, quodcumq ; tandem sit corpus illud opacum, quod lucido cono inseritur, sive densum, sive rarum, & sive laeve ac politum, sive asperum ac inaequale, sive denique durum sit, sive molle. *num. 18.*

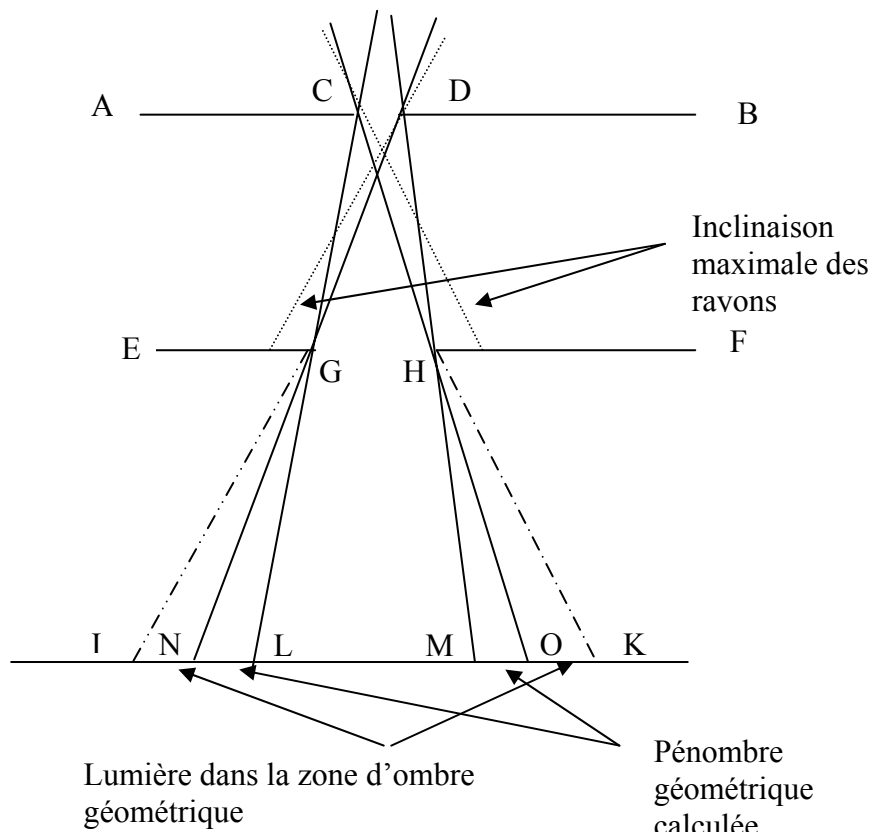
Grimaldi donne une argumentation similaire concernant la réflexion.

Il examine encore une autre possibilité analogue à celle de la lumière produite par le ciel illuminé quand le soleil est déjà sous l'horizon. Toute les parties de cet « air » se comporteraient alors comme des centres d'émission qui rayonneraient la lumière sous forme de sphères :

Cit. Dices iterum, hanc luminis radiationem ideo esse, quia illustratus aër tanquam novum luminosum, suam activitatis sphaeram instituit, ideoq ; lume aliquod secundarium ab ipso produci multipliciter quidem, & per plures illas series, Directe tamen in unaquaq ; illarum. Et hanc doctrinam fortasse confirmabis ex eo quod per fenestram quamcumq ; etiam ad Septentrionem conversam, ingreditur diurno tempore lumen, quod neq ; Directe, neq ; Reflexe, aut Refracte videtur provenire immediate à Sole, praesertim si hic ponatur iam descendisse infra horizontem. *num. 21.*

Même si l'on considère alors que de la lumière puisse être émise sous cette forme, cela ne donne pas à Grimaldi d'explication pour l'apparition des franges, ni leur coloration, ni le rôle de l'obstacle.

Experimentum secundum. Avant de conclure en l'existence d'un différent mode de propagation de la lumière, Grimaldi réalise une seconde expérience, dans laquelle il remplace le corps opaque par une nouvelle ouverture suivant le schéma ci-dessous. Travaillant toujours avec la même source étendue (le soleil), il doit tenir compte de la pénombre dans ses schémas. Grimaldi est plus explicite sur les conditions de cette expérience : le volet de la chambre est percé d'un trou de la largeur d'un doigt, sur lequel il applique un cache percé d'un trou de 0.3 à 0.4 mm de diamètre. Parallèlement au plan de ce trou, il place une lamelle percée d'un trou d'environ 2mm, située à 3.5 m environ de la première ouverture, de manière à ce que le cône de lumière solaire (observations qu'il mène l'été quand le soleil est au méridien) recouvre totalement la seconde ouverture. Il observe la lumière qui arrive sur l'écran, placé lui aussi à environ 3.5 m de la seconde ouverture.



Il calcule quelle doit être la largeur de la zone éclairée sur l'écran, en faisant l'hypothèse de la propagation rectiligne de la lumière depuis la première ouverture. Il observe alors que la lumière s'étend sur une zone plus large que prévue. Grimaldi précise les conditions requises pour une bonne observation :

Cit. Ut experimentum rectè succedat, requiritur lumen Solis validum, quia ut dictum est, foramina debent esse arcta, praesertim primum CD, ac praeterea debet planum candidum, in quo excipitur basis IK, distare multum à foramine GH, alioquin ea, vel nihil, vel parum excedit basim NO per calculum deductam. *num. 26.*

VIDÉO

Fort de ces observations, il conclut :

Cit. Maneat igitur ex utroq ; allato experimento validè probatum, lumen propagari aliquando modo aliquo peculiari, qui non est ullus ex tribus communiter agnitis apud Opticos, videlicet neq ; Directus, neq ; Refractus, neq ; Reflexus, sed est quartus aliquis novo aliquo vocabulo nominandus. Diffractum nos illum diximus, quia ut clarè constitit, lume eo modo propagatum diffringitur, & in diversas series lucidas huc illuc effusas scinditur. Quin immo lumen vi talis fractionis discissum habet praeterea ulterius dissipari, agitari, fluctuare, ut in sequentibus Propositionibus ostendetur. *num.28.*

Dès la proposition suivante, Grimaldi essaie en effet d'interpréter ce comportement de la lumière en se demandant quelle est la nature de la lumière et en en donnant un modèle :

Cit. Lumen videtur esse quid fluidum perquam celerrimè, & saltem aliquando etiam undulatum, fusum per corpora diaphana. *Prop.II.*

D'après V. Ronchi²⁹, Grimaldi introduit une ondulation du rayon lumineux lui-même pour tenter d'expliquer les couleurs :

Cit. La modification de la lumière, par laquelle elle se colore de manière apparente (comme on dit) et permanente, ou mieux par laquelle elle se rend sensible avec la qualification de couleur, on peut dire sans improbabilité, que c'est une certaine ondulation d'elle-même, très très petite, fluctuante, comme un tremblement de diffusion, avec une certaine oscillation très très fine, par laquelle la lumière stimule l'organe de la vision avec une activité particulière et déterminée.

Il faudra attendre le début du XIXème siècle pour que le phénomène de la diffraction soit modélisé.

VII. Un modèle ondulatoire de la lumière.

VII.1. Hooke : l'impulsion lumineuse.

La lunette, composée de deux lentilles, avait permis à Galilée de porter un nouveau regard sur le ciel. L'association de deux lentilles dans une configuration différente aboutit à la réalisation du microscope, qui permet à **Robert Hooke** (1635-1703) d'accéder à l'univers du très petit. Dans la préface de son ouvrage *Micrographia*, publié en 1665, Hooke écrit :

Cit. Avec les télescopes, il n'y a rien qui ne soit assez éloigné pour se trouver hors de portée de notre vue; et avec l'aide des microscopes, il n'y a rien qui ne soit assez petit pour échapper à notre investigation; ainsi un nouveau monde se présente à la connaissance. Par ces moyens, les Cieux se sont ouverts, et une quantité extraordinaire d'étoiles nouvelles, de nouveaux mouvements, de nouveaux phénomènes, y sont apparus, auxquels les astronomes de l'Antiquité étaient totalement étrangers.

Par ces moyens, la terre elle-même, qui est si proche de nous, sous nos pieds, s'est révélée sous un nouveau jour, et en chaque parcelle de sa matière, nous apercevons désormais pratiquement une aussi grande variété d'espèces que nous n'étions capables auparavant d'en compter dans l'univers entier³⁰.

Hooke s'appuie sur une observation scrupuleuse des objets qu'il examine au microscope. Il détaille les conditions d'éclairage, réitère les observations, dessine aussi précisément que possible ce qu'il voit. Il examine des tissus, des insectes, des minéraux. Il émet des hypothèses susceptibles de donner une interprétation de ses observations.

²⁹ Histoire de la lumière

³⁰ By means of *Telescopes*, there is nothing so far distant but may be represented to our view ; and by the help of *Microscopes*, there is nothing so small, as to escape our inquiry ; hence there is a new visible world discovered to the understanding. By this means the Heavens are open'd, and a vast number of new stars and new motions, and new productions appear in them, to which all the antient Astronomers were utterly strangers. By this the Earth it self, which lyes so near us, under our feet, shews quite a new thing to us, and in every *little particle* of its matter, we now behold almost as great a variety of creatures, as we were able before to reckon up in the whole universe it self. *Preface.*

Un certain nombre de ses observations portent sur les couleurs, et en premier lieu, celles qui apparaissent dans les phénomènes dits des *lames minces*, analogues à l'irisation observée sur les bulles de savon.

VIDÉO

Hooke découpe de fines lamelles de *verre de Moscovie*, ancienne dénomination pour le Mica, et relate ses observations :

Cit. ... cette pierre à la propriété, visible à l'œil nu, mais qui se manifeste plus nettement au microscope, de présenter différents reflets colorés ; pour le mettre en évidence, je pris un morceau de mica, et le clivant en de fines lamelles, je vis que de bas en haut en divers endroits, je distinguais clairement plusieurs tâches, ou défauts, de couleur blanche, et d'autres diversement colorés avec les couleurs de l'arc-en-ciel ; et avec le microscope, je pouvais voir que ces couleurs étaient ordonnées en anneaux qui entouraient la tâche, ou le défaut, blanc, et qu'elles étaient arrondies et irrégulières, suivant la forme du point qu'elles délimitaient ; et l'ordre des couleurs était le même que celui de l'arc-en-ciel^{31, 32}.

Il observe que partant d'une lame de mica incolore, des subdivisions successives en lamelles de plus en plus fines font apparaître des couleurs déterminées. Il observe de même l'évolution des couleurs le long d'une strie à la surface d'une lamelle. Hooke reporte l'observation suivante :

Cit. Prenez deux petits fragments de verres de miroirs polis, chacun de la taille d'une pièce de un shilling, qu'ils soient secs, et pressez les très fort l'un contre l'autre entre vos pouces et vos index, et vous devriez observer, lorsqu'ils sont très serrés, que des lignes colorées, ou *irisations*, apparaissent pratiquement de la même manière qu'avec le mica ; et vous pourrez facilement modifier l'une quelconque des couleurs en n'importe quel endroit, en pressant les lamelles plus fortement l'une contre l'autre, ou en relâchant cette pression³³ ...

³¹ ... this stone has a property, which in respect of the microscope is more notable, and that is, that it exhibits several appearances of colours, both to the naked eye, but much more conspicuously to the microscope ; for the exhibiting of which, I took a piece of muscovy-glass, and splitting or cleaving it into thin plates, I found that up and down in several parts of them I could plainly perceive several white specks or flaws, and others diversely coloured with all the colours of the rainbow ; and with the microscope I could perceive, that these colours were ranged in rings that incompassed the white speck or flaw, and were round or irregular, according to the shape of the spot which they terminated ; and the positions of colours, in respect of one another, was the very same as in the rainbow.

³² Ce n'est pas le cas: les couleurs observées par Hooke sont des couleurs interférentielles.

³³ Take two small pieces of ground and polisht looking-glass plate, each about the bigness of a shilling, take these two dry, and with your fore-fingers and thumbs press them very hard and close together, and you shall find, that when they approach very near, there will appear several *irises* or coloured lines , in the same manner almost as in the muscovy-glass ; and you may very easily change any of the colours of any part of the interposed body, by pressing the plates closer and harder together, or leaving them more lax...

Hooke remarque qu'il n'est pas nécessaire que les deux pièces en présence aient des faces planes, mais que les faces en regard peuvent être une combinaison de faces planes, convexes ou concaves.

Il cherche une explication à l'apparition de ces couleurs. Il rejette tout d'abord l'argumentation de Descartes fondée sur la rotation de globules à la frontière de la lumière et de l'ombre, occasionnée par la réfraction, car dans le cas des lames minces, la seconde réfraction devrait annuler les effets de la première. Cette observation tient lieu de *crux experiment* en ce qu'elle invalide aux yeux de Hooke l'explication mécaniste cartésienne des couleurs. Il cherche une théorie susceptible d'expliquer les couleurs apparaissant aussi bien dans les observations des lames minces que de la réfraction ordinaire ou la couleur apparente des objets. Sous-jacente à cette explication se trouve la question de la nature de la lumière.

La luminosité persistante d'un diamant chauffé ou frotté, dans l'obscurité, lui donne à penser que la lumière est issue d'une agitation, d'un mouvement dans le corps lumineux, que ce mouvement doit être extrêmement rapide, et qu'il doit correspondre à un mouvement de vibration. C'est encore l'observation du diamant frotté qui lui suggère que ce dernier n'est pas altéré mais revient dans son état original après un certain laps de temps. Finalement, que cette vibration elle-même est très courte. Ce mouvement de vibration se propage dans les corps transparents, à une vitesse très grande, mais non infinie, en lignes droites et dans toutes les directions dans un milieu homogène. Il écrit encore :

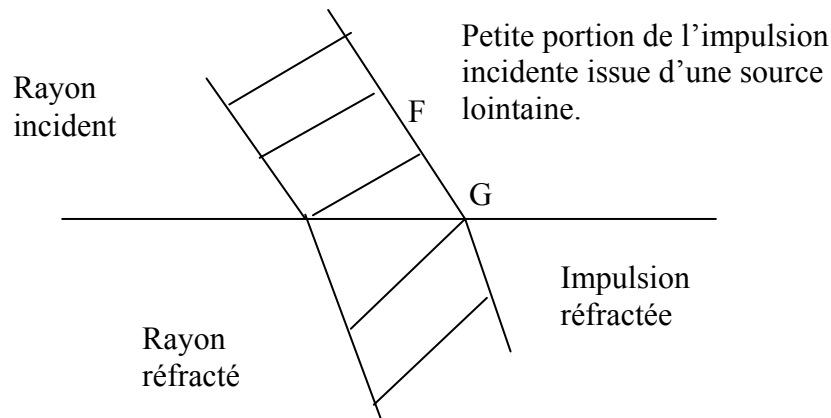
Cit. Cinquièmement, ce mouvement se propage dans toutes les directions avec une égale vitesse dans un milieu homogène. Il s'ensuit que chaque impulsion ou vibration de la source lumineuse générera une sphère, qui augmentera continuellement, à la manière (quoiqu'incomparablement plus rapidement) des vagues ou des anneaux à la surface de l'eau qui se développent en des cercles de plus en plus grands, centrés en un point où le mouvement a été amorcé par le plongeon d'une pierre. En conséquence, toute portion de ces sphères ondulant à travers un *milieu homogène* coupent les rayons à angles droits³⁴.

Pour étudier la réfraction, Hooke considère une source lumineuse située à grande distance de la surface de séparation, de manière à assimiler une petite portion de la sphère à un plan. Les rayons sont alors perpendiculaires au plan avant la réfraction.

Il considère la réfraction des rayons suivant les lois de Descartes. Cette loi est expérimentale et il ne lui cherche pas de justification. Le rayon se rapproche de la normale à la surface de séparation dans le cas où sa trajectoire est facilitée dans le milieu réfringent. Ainsi dans un milieu comme l'eau, la *vitesse est supposée plus grande que dans l'air*. En conséquence, le trajet parcouru dans l'eau pendant le temps que le point F arrive en G sur le schéma ci-dessous, est-il plus grand le long du rayon réfracté que le long du rayon incident (FG).

Par conséquent, l'*impulsion réfractée* est inclinée par rapport au rayon réfracté. Le rayon ne coupe pas l'impulsion réfractée à angles droits.

³⁴ Fifthly, in an *Homogeneous medium* this motion is propagated every way with equal velocity, whence necessarily every pulse or vibration of the luminous body will generate a sphere, which will continually increase, and grow bigger, just after the same manner (though indefinitely swifter) as the waves or rings on the surface of the water do swell into bigger and bigger circles about a point of it, where, by the sinking of a stone the motion was begun, whence it necessary follows, that all the parts of these spheres undulated through an homogeneous medium cut the rays at right angles.



Hooke ne s'attarde pas à expliquer pour quelle raison la vitesse dans l'eau est plus grande que dans l'air :

Cit. Je n'ai pas l'intention d'établir ici les raisons pour lesquelles tel ou tel corps doit plus ou moins faire obstacle aux rayons: par exemple pourquoi l'eau doit-elle transmettre les rayons plus facilement, quoique plus faiblement, que l'air³⁵.

Il établit simplement un lien qualitatif entre cette hypothèse et la quantité de matière subtile supposée être présente dans un corps transparent et apte à transmettre la vibration. Il nomme ce milieu Ether.

Cit. Je suppose alors que l'essentiel des *interstices* du monde, qui se trouvent entre les corps du Soleil et des Etoiles, des Planètes et de la Terre, est un corps infiniment fluide, très adapté à être remué, et prêt à l'être, et à communiquer ce mouvement d'un endroit quelconque à un autre, indépendamment de leur éloignement : je ne me préoccupe pas non plus beaucoup de savoir comment doivent être les particules de ce milieu fluide infiniment subtile ; ni si ce milieu présente des pores intersticiels ou des cavités, puisqu'il est suffisant pour rendre compte de tous les Phénomènes de faire l'hypothèse de son extrême fluidité, ou de dire qu'il est le corps le plus fluide de l'univers, et qu'il est jusqu'à présent impossible de lever les autres difficultés. Etant un corps d'une telle fluidité, il laisse le passage à tous les autres corps qui s'y meuvent de long en large ... par ce fluide ou Ether^{36, 37}.

³⁵ It is not my business in this place to set down the reasons why this or that body should impede the rays more, other less : as why water should transmit the rays more easily, though more weakly than air.

³⁶ Le terme *éther* provient d'une dénomination très ancienne. Aristote utilise quatre éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu pour expliquer tout ce qui compose le monde *sublunaire*. Ce monde est soumis à la *génération* et à la *corruption* ; les êtres sont créés et dépérissent. Il n'en est pas de même du monde *supralunaire* qu'« il est raisonnable également d'admettre [qu'il est] inengendré, indestructible, exempt de croissance et d'altération » car « dans toute l'étendue du passé, si l'on en croit les souvenirs que les hommes se sont transmis les uns aux autres, aucun changement n'a été observé ni dans le dernier ciel ni dans son ensemble, ni dans aucune autre partie qui lui sont propres ». Dans ce monde supralunaire « le corps qui se meut circulairement ne peut avoir ni pesanteur ni légèreté. Il ne peut, en effet, ni être mû en direction du centre, ni être éloigné du centre, que ce soit d'un mouvement naturel ou d'un mouvement contraire à la nature ». Les corps du monde supralunaire n'ont pas les *qualités* de *lourd* (terre, eau) ou de *léger* (air, feu) responsables des qualités des choses d'ici-bas. On doit donc considérer, d'après Aristote, que le monde supralunaire est constitué d'un *cinquième élément* dont il fait remonter l'origine aux temps les plus reculés : « le nom, lui aussi, semble bien s'être transmis depuis l'époque des anciens jusqu'à la nôtre. Les anciens nourrissent des conceptions identiques à celles que, nous aussi, nous

L'inclinaison des impulsions réfractées par rapport au rayon réfracté a une conséquence fondamentale pour Hooke, qu'il pense avoir découverte :

Cit. En premier lieu, si nous considérons la façon dont l'impulsion avance, il est raisonnable de conclure, que l'extrémité de l'impulsion qui précède l'autre, doit nécessairement se trouver plus gênée par la résistance du milieu transparent, que l'autre extrémité qui lui est postérieure, et dont le chemin a été en quelque sorte préparé par l'autre ; plus particulièrement si le milieu limitrophe n'est pas éclairé ou agité pareillement³⁸.

La zone limitrophe entre le faisceau lumineux qui est réfracté et le reste du milieu est ainsi dotée d'une propriété spécifique. Rejoignant les idées de Descartes, quoiqu'en donnant une toute autre interprétation, Hooke associe cette propriété à l'apparition de couleurs.

Il observe que les couleurs sont d'autant plus marquées que l'incidence est grande. La réfraction est corrélativement d'autant plus importante et l'inclinaison de l'impulsion réfractée par rapport au rayon réfracté est également plus importante. Hooke relie ainsi directement l'apparition des couleurs à l'inclinaison de l'impulsion réfractée par rapport au rayon réfracté. Le bleu apparaît d'un côté et le rouge de l'autre. Il suit le trajet des faisceaux lumineux réfractés dans l'œil et en vient à la conclusion suivante :

Cit. Le bleu est une empreinte sur la rétine d'une impulsion lumineuse oblique et indistincte, dont la partie la plus faible précède et la plus forte suit. Le rouge est une empreinte oblique et indistincte, dont la partie la plus forte précède et la plus faible suit³⁹.

professons. Ce n'est pas une fois, ni deux, mais un nombre infini de fois, sachons-le bien, que les mêmes opinions reviennent jusqu'à nous. Estimant que le premier corps est différent de la terre, du feu, de l'air et de l'eau, ils ont donc nommé « éther » le lieu le plus élevé ; ils tiraient de sa course incessante, pendant l'éternité entière, cette dénomination qu'ils lui ont donnée ». *Du Ciel, I, 3*. Aristote, revient, en des termes très voisins, dans les *Météorologiques* sur cette origine très ancienne. Derrière le terme « éther » se cache l'éternité, l'infini (propre au mouvement circulaire), qui sont des attributs du divin.

L'éther, ce cinquième élément *quinte essence* et premier d'entre eux, « le corps éternel qui se trouve dans la région supérieure » *de l'âme, II, è, 418b*, est *diaphane*, au même titre que l'air et que l'eau, et permet la vision. Huygens en fait le *milieu* dans lequel se propagent les surfaces d'ondes lumineuses.

³⁷ I suppose then, that the greatest part of the intersitia of the world, that lies between the bodies of the Sun and Stars, and the Planets, and the Earth, to be exceeding fluid body, very apt and ready to be mov'd, and to communicate the motion of any one part to any other part, though never so far distant : nor do I much concern my self, to determine what the figure of the particles of this exceedingly subtile fluid medium must be ; nor whether it have any interstitiated pores or vacuities, it being sufficient to solve all the Phaenomena to suppose it an exceedingly fluid, or the most fluid body in the world, and as yet impossible to determine the other difficulties.

That beeing so exceeding fluid a body, it easily gives passage to all other bodies to move to and fro in it. ... by this fluid or Aether. *Obs. XV. Of kettering-stone, and the pores of inanimate bodies.*

³⁸ First therefore, if we consider the manner of the progress of the pulse, it will be rational to conclude, that that part or end of the pulse which precedes the other, must necessarily be somewhat more obtunded, or impeded by the resistance of the transparent medium, than the other part or end which is subsequent, whose way is, as it were, prepared by the other ; especially if the adjacent medium be not in the same manner enlightened or agitated. *pp.62/63.*

³⁹ The blue is an impression on the retina of an oblique and confus'd pulse of light, whose weakest part precedes, and whose strongest follows. And, that red is an impression on the retina of an oblique and confus'd pulse of light, whose strongest part precedes, and whose weakest follows.

Cette déduction provient de l'observation similaire à celle de Descartes, que rouge et bleu se forment à la frontière avec l'ombre, laquelle traduit un affaiblissement de la lumière, reprenant en cela les théories des anciens sur la couleur, ici un affaiblissement de la partie de l'impulsion réfractée qui se trouve à la limite avec l'ombre.

Rouge et bleu sont les deux couleurs fondamentales. Les autres couleurs correspondent pour Hooke à des mélanges de rouge et de bleu en des proportions appropriées, avec du blanc et du noir. Il explique de même les couleurs « réelles » qu'ont les objets qui semblent opaques. Ceux-ci sont constitués d'au moins deux types de substances différemment réfringentes composées de particules dont les dispositions produisent les différentes couleurs observées.

VII.2. Huygens : surfaces d'ondes.

Christiaan Huygens (Hollande 1629-1695), est invité par la toute jeune Académie des Sciences de Paris en 1666 ; il présente sa théorie de la propagation des rayons lumineux dans le premier chapitre du *Traité de la Lumière*, publié en 1690, bien que relatant des travaux antérieurs d'une dizaine d'années. Le premier chapitre s'intitule "*Des rayons directement étendus*", à savoir les rayons qui se propagent dans un milieu homogène sans rencontrer d'obstacle. Huygens ne se satisfait pas de l'énoncé des lois de la réflexion et de la réfraction et en recherche "*l'origine et les causes*" comme il convient à des esprits "*plus curieux*". Ses objectifs sont de comprendre

Cit. ... les premiers et notables phénomènes de la lumière, savoir pourquoi elle ne s'étend que suivant des lignes droites et comment les rayons visuels, venant d'une infinité de divers endroits, se croisent sans s'empêcher en rien les uns les autres.

Il laisse de côté le phénomène de la couleur, qui n'en est pas moins un "notable phénomène". Cette incapacité à expliquer les couleurs ne permettra pas à sa théorie de s'imposer face à une théorie Newtonienne contemporaine dont la spécificité porte en grande partie sur l'analyse des couleurs. Huygens se place dans une vision mécaniste de la lumière suivant en cela les principes cartésiens en vigueur dans la

Cit. ... vraie Philosophie, dans laquelle on conçoit la cause de tous les effets naturels par des raisons de mécanique. Ce qu'il faut faire à mon avis, ou bien renoncer à toute expérience de jamais rien comprendre dans la physique.

La lumière consiste en « un mouvement de la matière qui se trouve entre nous et le corps lumineux ». Le point crucial qui guide Huygens est qu'il considère que la vitesse de la lumière, même très grande, est finie:

Cit. Ce qui est tout autre chose que d'être momentanée, puisqu'il y a la même différence que d'une chose finie à infinie.

Huygens peut fonder cette analyse sur la toute récente mesure de la vitesse de la lumière par Roemer (*cf* § VIII), qui le conduit à adopter une valeur d'environ 230000 km.s^{-1} . Il écrit :

Cit. Que si avec cela la lumière emploie du temps à son passage il s'ensuivra que ce mouvement imprimé à la matière est successif, et que par conséquent il s'étend, ainsi que celui du son, par des surfaces et des ondes sphériques; car je les appelle ondes à la ressemblance de celles que l'on voit se former dans l'eau quand on y jette une pierre,

qui représentent une telle extension successive en rond, quoique provenant d'une autre cause, et seulement dans une surface plane.

Que cette vitesse soit « plus de six cent mille fois plus grande que celle du son » ne doit pas choquer « parce qu'il ne s'agit point du transport d'un corps avec tant de vitesse, mais d'un mouvement successif qui passe des uns aux autres ». La lumière consiste en l'ébranlement d'un certain milieu sans transport direct de matière. Huygens tente une description de ce milieu qu'il démontre ne pas être l'air:

Cit. Ce qui se prouve en enfermant un corps sonnant dans un vaisseau de verre dont on tire ensuite l'air...il faut avoir soin de placer le corps sonnant sur du coton, ou sur des plumes, en sorte qu'il ne puisse pas communiquer ses tremblements au vaisseau de verre qui l'enferme, ni à la machine, ce qui avait jusqu'ici été négligé. On voit d'ici non seulement que notre air, qui ne pénètre point le verre, est la matière par laquelle s'étend le son, mais aussi que ce n'est point ce même air, mais une autre matière dans laquelle s'étend la lumière ; puisque l'air étant ôté du vaisseau, la lumière ne laisse pas de traverser comme auparavant.

Il élabore un modèle mécanique, microscopique, de ce milieu qu'il nomme *éther*. Huygens s'inspire de la propagation du son pour imaginer la propagation d'ondes sphériques lumineuses mais il se détache de cette analogie pour conférer à l'*éther* des propriétés nouvelles fondées sur

Cit. La propriété que gardent les corps durs à transmettre le mouvement les uns aux autres »; et de préciser : « Lorsqu'on prend un nombre de boules d'égale grosseur, faites de quelque matière fort dure, et qu'on les range en ligne droite, en sorte qu'elles se touchent ; l'on trouve, en frappant avec une boule pareille contre la première de ces boules, que le mouvement passe comme dans un instant jusqu'à la dernière, qui se sépare alors de la rangée, sans qu'on s'aperçoive que les autres se soient remuées.



Avant le choc



Après le choc

Ce milieu pénétrant les corps est constitué de boules serrées les unes contre les autres les « particules d'éther » que Huygens dote artificiellement des propriétés nécessaires:

Cit. Or pour appliquer cette sorte de mouvement à celui que produit la lumière, rien n'empêche que nous n'estimions les particules d'éther être d'une manière si approchante de la dureté parfaite et d'un ressort si prompt que nous voulons. Il n'est pas nécessaire pour cela d'examiner ici la cause de cette dureté ni de celle du ressort, dont la considération nous mènerait trop loin de notre sujet.

Huygens n'entre donc pas dans le détail de ses hypothèses et les multiplie en notant

Cit. Je dirai pourtant en passant qu'on peut concevoir que ces particules de l'éther, nonobstant leur petitesse, sont encore composées d'autres parties...

À la part d'incompréhension du phénomène de propagation auquel Kepler attribuait une interprétation métaphysique se substitue l'ajustement de paramètres *ad hoc*. Le problème de « l'origine et des causes » reste entier. C'est cependant dans cette structure postulée de l'éther que réside pour Huygens le secret de la propagation de la lumière et il peut désormais envisager la propagation d'une onde sphérique: chaque point du milieu atteint par l'onde se comporte lui-même comme une source secondaire d'onde sphérique. Le nouveau front d'onde est défini comme l'enveloppe, au sens mathématique, des ondes issues de ces sources secondaires. Les rayons lumineux sont *perpendiculaires* à la surface d'onde, et ce, quel que soit le trajet que suit la lumière, aussi bien dans sa propagation rectiligne que dans la réflexion et la réfraction dans un milieu homogène, contrairement à Hooke qui avait émis l'hypothèse de l'inclinaison des « impulsions réfractées » par rapport au rayon réfracté. On peut remarquer que cette hypothèse servait à Hooke pour expliquer les couleurs. Huygens abandonne ce point de vue et ne tentera pas de demander à son modèle de donner une explication des couleurs.

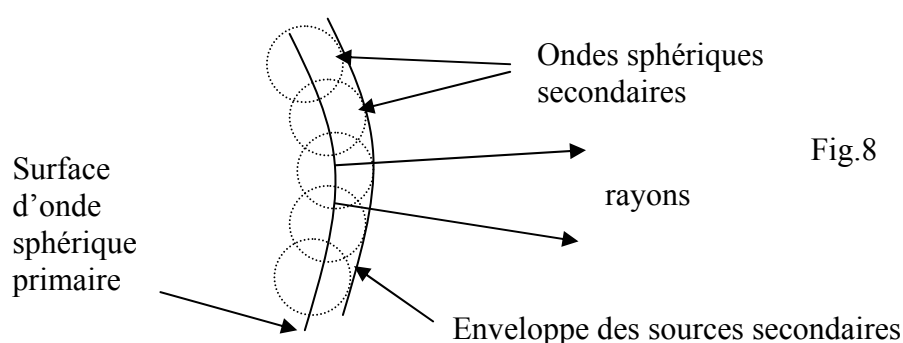
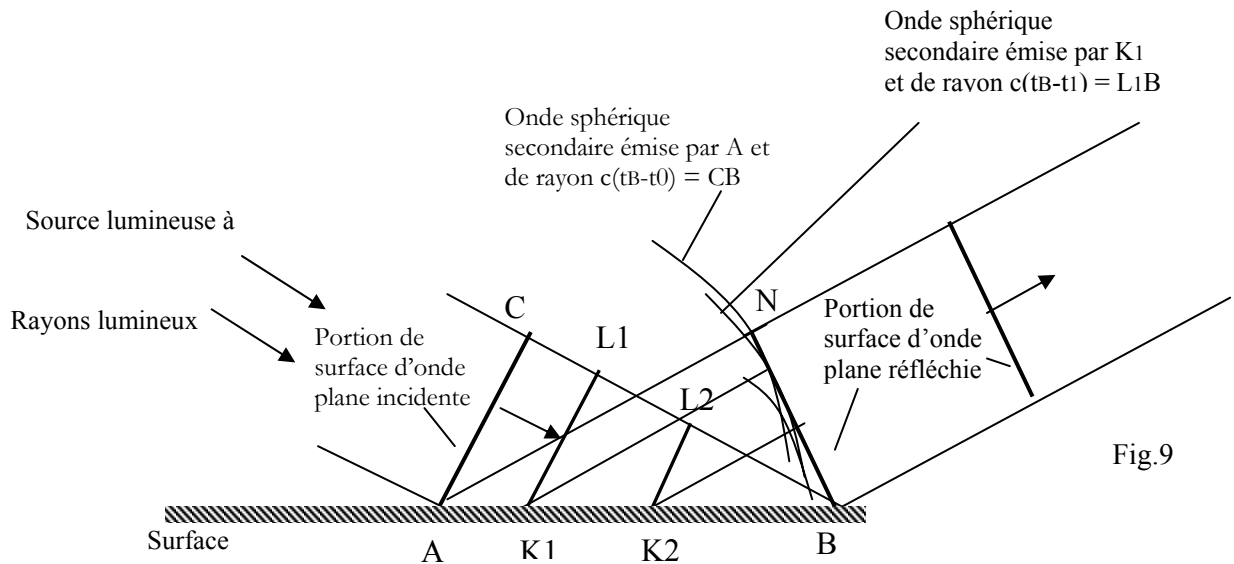


Fig.8

Les « *particules éthérées* » obéissent aux « *règles de la Percussion* » que Huygens a lui-même énoncées⁴⁰.

Afin de démontrer les lois de la réflexion et de la réfraction, Huygens utilise un schéma pour lequel la source lumineuse est rejetée à l'infini, si bien que les surfaces d'ondes sphériques incidentes sont assimilables à des plans. A l'instant t_0 la portion d'onde plane considérée arrive sur le plan réfléchissant au point A qui se comporte alors comme une source d'émission secondaire d'onde sphérique pour le demi-espace supérieur délimité par le plan de réflexion. A l'instant t_B ultérieur l'extrémité C du plan d'onde arrive en B sur ce même plan de réflexion. Dans le temps $t_B - t_0$ l'onde secondaire émise par A est une demi-sphère SN de centre A et de rayon $AN = c(t_B - t_0) = CB$, c désignant la vitesse de la lumière dans le milieu; tous les points K_i , $i=1,2,\dots$ atteints successivement aux temps t_i par l'ébranlement (le front d'onde) se comportent comme autant de sources d'émissions secondaires, qui génèrent des demi-sphères de rayons LiB dans le temps $t_B - t_i$.

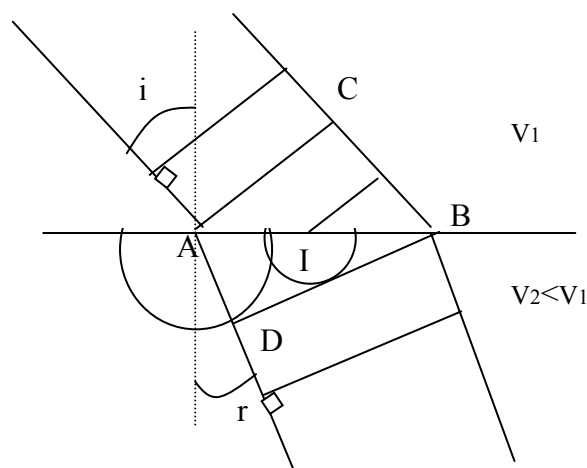
⁴⁰ Huygens n'introduit pas de périodicité dans l'onde qu'il considère, hypothèse qui permettra à ses « successeurs » de rendre compte des couleurs dans le cadre d'une théorie ondulatoire de la lumière.



Ces ondelettes ont une même enveloppe commune : la tangente BN aux sources secondaires; l'énergie lumineuse est importante sur BN et négligeable partout ailleurs. BN est la portion d'onde plane réfléchi correspondant à la portion AC de l'onde plane incidente. Les triangles ACB et BAN ont leurs angles (ACB) et (BNA) égaux à $\pi/2$: ACB et BNA sont deux triangles rectangles ayant leur base BA commune, et dont les longueurs des côtés AN et CB égales. Ces triangles sont semblables et les angles CBA et NAB égaux par conséquent. Or CB, perpendiculaire à AC est la direction d'un rayon incident et AN perpendiculaire à BN celle d'un rayon réfléchi : ces rayons sont également inclinés sur le plan d'incidence.

Une démonstration analogue est envisageable pour expliquer la réfraction des rayons lumineux, à la condition de considérer que la vitesse de la lumière est plus grande dans le milieu le moins dense, hypothèse qui cristallisera l'opposition des points de vue entre les théories corpusculaires, qui sont d'inspiration mécanistes, et théorie ondulatoire qui acquiert ses lettres de noblesse avec Huygens.

Le schéma ci-dessous illustre le raisonnement concernant la réfraction d'une surface d'onde plane dans un milieu plus réfringent.



Le temps que le plan d'onde parcourt la distance CB dans l'air, où sa vitesse est v_1 , le point A se comporte comme une source secondaire d'onde demi-sphérique de rayon plus petit, dans la proportion v_2/v_1 . Le point I milieu de AB émet une onde dont le rayon sera deux fois plus petit que celle de l'onde émise par A. L'enveloppe commune de ces surfaces d'ondes

secondaires est un plan. En notant t_1 le temps mis par le front d'onde pour aller de C à B, on a $CB=t_1.v_1$ et $AD=t_1.v_2$. En exprimant le côté AB commun aux triangles ADB et ACB en fonction des sinus des angles d'incidence i et de réfraction r , on obtient

$$\sin i / \sin r = v_1 / v_2$$

Huygens conclut sa démonstration des lois de la réfraction par le principe de Fermat qu'il voit comme une conséquence de son modèle:

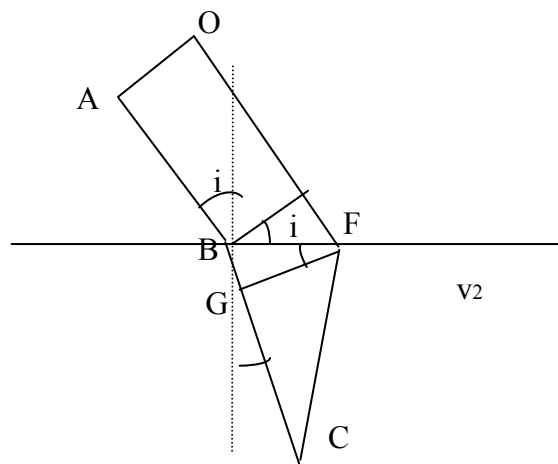
Cit. Je finirai cette théorie de la réfraction en démontrant une proposition remarquable qui en dépend; savoir qu'un rayon de lumière pour aller d'un point à un autre, quand ces points sont dans des diaphanes différents, se rompt en sorte à la surface plane qui joint ces deux milieux, qu'il emploie le moindre temps possible; tout de même qu'il arrive dans la réflexion contre une surface plane. M. Fermat a proposé le premier cette propriété des réfractions, tenant comme nous, et directement contre l'opinion de M. Descartes, que la lumière passe plus lentement à travers le verre et l'eau qu'à travers l'air.

Huygens utilise la démonstration suivante. Il considère le rayons incident AB dans l'air se réfractant en B sur la surface de séparation avec l'eau, et atteignant le point C dans l'eau. Soit i et r les angles d'incidence et de réfraction respectivement, comptés par rapport à la normale à la surface de séparation. Le rayon se réfracte suivant les lois précédemment établies.

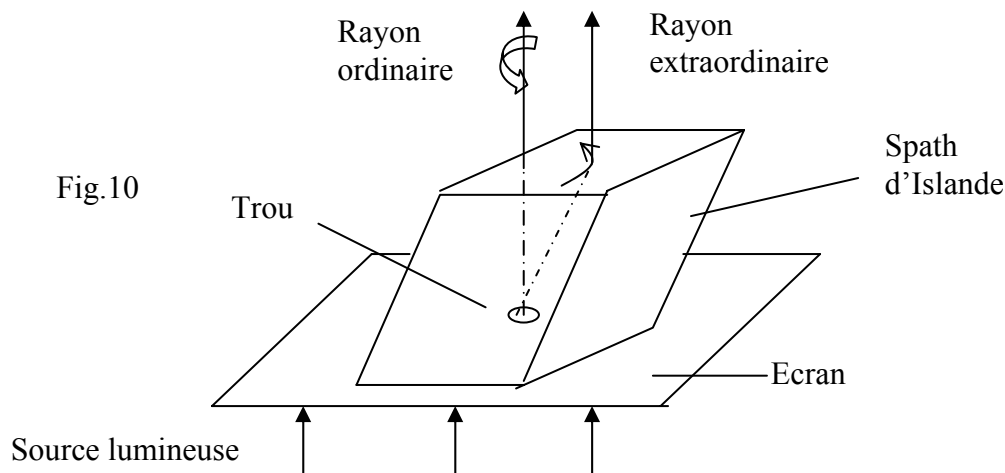
Huygens considère le rayon OF parallèle au rayon AB qui arrive sur le dioptre en F. Supposons que ce rayon se réfracte en F pour aller en C. Il ne vérifie alors plus les lois de la réfraction. Huygens se propose de montrer que le trajet OFC correspondant prend plus de temps que le trajet ABC.

Il trace la perpendiculaire BH aux rayons AB et OF et la perpendiculaire FG au rayon réfracté BC. Comme il est visible sur le schéma les triangles rectangles BHF et BGF ont leur hypoténuse commune et les angles en B et F sont respectivement égaux à i et à r . Par la loi des sinus, vérifiés par i et r , $HF/BG = v_1/v_2$ et les trajets se font dans le même temps entre H et F et entre B et G. Comme $AB = OH$ par construction, il vient $AG = OF$.

Or CF est plus long que CG et la lumière met plus de temps pour aller de F à C dans l'eau que de B à G. La lumière met donc plus de temps pour suivre le trajet OFC qu'elle n'en mettrait pour suivre le trajet ABC vérifiant la loi des sinus.



L'application la plus spectaculaire de la théorie de Huygens est l'explication de la *biréfringence* du spath d'Islande, un cristal de calcite, décrit par **Erasmus Bartholin** en 1669, qui a la propriété de dédoubler les images des objets. Puisque l'image extraordinaire dépend de l'orientation du cristal, le phénomène est dû à la structure de celui-ci. Huygens postule l'existence de deux vitesses de propagation différentes dans le cristal ce qui le conduit à envisager des surfaces d'ondes ellipsoïdales pour le rayon extraordinaire.



VIDÉO

Il place successivement deux cristaux de calcite. Le faisceau incident est dédoublé par le premier cristal; les faisceaux émergents constituent deux faisceaux incidents pour le second cristal. Huygens observe que chacun de ces faisceaux se dédouble en général, si bien qu'il obtient au final quatre faisceaux émergents comme il pouvait s'y attendre. Cependant ces faisceaux n'ont pas une intensité égale et pour une orientation particulière du second cristal deux d'entre eux s'éteignent. Il n'a pas d'explication de ce phénomène à proposer dans le cadre de la théorie ondulatoire qu'il a élaborée et écrit à ce sujet :

Cit. ... car bien que je n'en aie pas pu trouver jusqu'ici la cause, je ne veux pas laisser pour cela de l'indiquer, afin de donner occasion à d'autres de chercher. Il semble qu'il faudrait faire encore d'autres suppositions outre celles que j'ai faites ; qui ne laisseront pas pour autant de garder leur vraisemblance, après avoir été confirmées par tant de preuves .

Et encore :

Cit. Il semble qu'on est obligé de conclure que les ondes de lumière, pour avoir passé le premier cristal, acquièrent certaines formes ou disposition... mais dire comment cela se fait, je n'ai rien trouvé jusqu'ici qui me satisfasse.

VIDÉO

Bien que sur la bonne piste, Huygens ne pourra aller plus loin avec son modèle. La constatation de l'échec de sa théorie pour expliquer ce phénomène sera le véritable argument utilisé par les détracteurs d'une théorie corpusculaire.

VIII. Une première mesure indirecte de la vitesse de la lumière.

Olaf Roemer (1644-1710), publie en 1676 la première mesure (indirecte) de la vitesse de la lumière. Astronome d'origine danoise, il travaille alors à l'Observatoire de Paris. La méthode utilisée est décrite dans le *Journal des Sçavans*. Elle est fondée sur le relevé des dates d'immersion et d'émergence du premier satellite de Jupiter (Io).

La connaissance précise de ces dates est importante pour la détermination des longitudes, pour les marins notamment. Si elles sont précisément déterminées pour un méridien donné, la date d'observation du phénomène en un endroit quelconque permet d'en déduire le méridien de l'observateur. Plus cette connaissance est précise, meilleure est la détermination du lieu. C'est ce qui motive l'Astronome Cassini pour ré-examiner les trajectoires des satellites de Jupiter découverts par Galilée. Ainsi paraissent en août 1676, dans le même *Journal des Sçavans* les « Eclipses des Satellites de Iupiter dans les derniers mois de l'année 1676, proposées par Monsieur Cassini de l'Académie Royale des Sciences pour la détermination exacte des longitudes des lieux où elles sont observées ». Dans un autre article du même journal, intitulé « Extrait d'une lettre écrite par Monsieur Cassini de l'Académie R. des Sciences à l'auteur du Journal, contenant quelques advertissements aux Astronomes, touchant les configurations qu'il donne des satellites de Iupiter ès années 1676 et 1677 pour la vérification de leurs hypothèses », il est écrit en guise de conclusion :

Cit. Ces anciennes hypothèses [celles de Galilée entre autres sur les trajectoires des satellites] estoient donc bien éloignées de pouvoir servir à trouver les longitudes comme leurs auteurs se proposoient ; puis qu'il leur estoit impossible non seulement de marquer les Eclipses des Satellites pour quelques années à quelque heure prez, mais même de donner à connoître & distinguer en ce temps icy un Satellite de l'autre, au lieu que par le Système de Monsieur Cassini on peut prédire pour longues années les Eclipses des Satellites, avec autant de Iustesse, que les Eclipses du Soleil & de la Lune par les Tables Astronomiques.

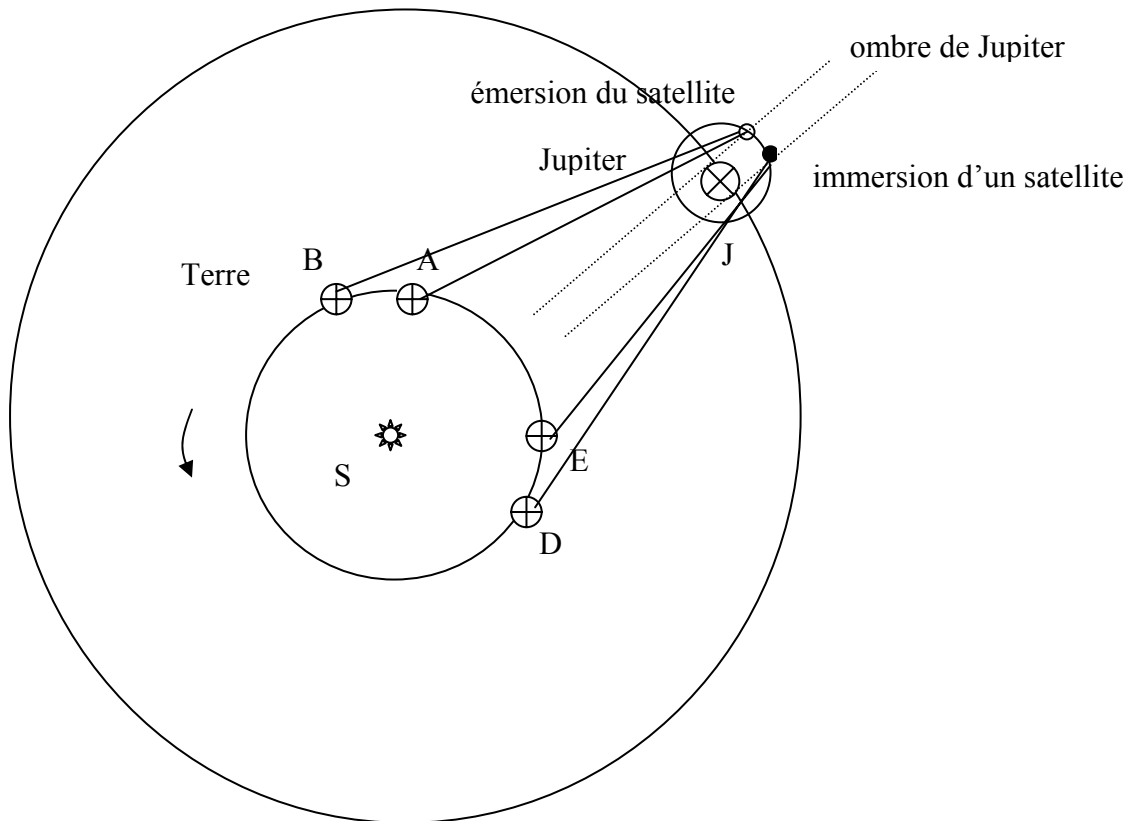
Entre autres, Cassini prévoit une immersion du premier satellite dans l'ombre de Jupiter le soir du 09 novembre 1676 à 5h 27 min.

Roemer remarque que si la lumière met du temps pour se propager, l'effet peut se faire sentir sur les dates des immersions et émergences du satellite perçues de la Terre.

Le schéma ci-dessous reproduit celui de Roemer. La Terre, suivant sa position sur son orbite, s'éloigne (positions AB) ou se rapproche (positions DE) de Jupiter.

Sur ce schéma, Jupiter est supposé fixe pendant la révolution annuelle de la Terre ; c'est à dire que l'on y néglige la variation de distance relative entre la Terre et Jupiter due au mouvement de Jupiter.

Soit A la position de la Terre sur son orbite lors de l'émergence d'un satellite de Jupiter hors de l'ombre. La durée séparant deux émergences consécutives est de 42.5h environ. Pendant ce temps, la Terre s'est déplacée sur son orbite d'un arc de 210 diamètres terrestres d'après les mesures dont dispose Roemer. La nouvelle émergence se produit lorsque l'observateur est en B. Si la lumière met du temps à se propager, cette émergence sera perçue avec un certain retard par l'observateur terrestre car le chemin qu'emprunte la lumière est plus long.



Les échelles ne sont pas respectées sur ce schéma. Jupiter est supposé ne pas se déplacer sensiblement sur son orbite pendant la durée de l'occultation .

Roemer commence par établir que si la lumière mettait 1 seconde pour parcourir une distance de 3000 lieues (un diamètre terrestre), cela se traduirait par un retard de 3min 30 (210 secondes) dans le cas d'une quadrature (angle BSJ droit) car dans cette configuration la longueur de l'arc est sensiblement égale au trajet supplémentaire parcouru par la lumière. Dans le cas opposé où la Terre se rapproche de Jupiter, la période observée des *immersions* du satellite dans l'ombre de Jupiter devrait être diminuée dans les mêmes proportions. On pourrait s'attendre à une variation « d'un demi quart d'heure » entre ces positions extrêmes, laquelle n'est pas observée. Roemer en conclut que la lumière se propage plus vite que supposé initialement.

Il remarque encore que ce qui n'était pas perceptible entre deux situations extrêmes le devient si l'on tient compte des « dérives » de la période observée cumulées sur quarante révolutions du satellite lorsque la Terre s'éloigne puis se rapproche. Il établit ainsi que la lumière met 22 minutes pour traverser le diamètre de l'orbite terrestre, soit 11 minutes pour la distance Terre-Soleil. Cette hypothèse est étayée par la prédiction de l'émersion du 09 novembre, rapportée par le *Journal des Sçavans* :

Cit. La nécessité de cette nouvelle équation du retardement de la lumière, est établie par toutes les observations, qui ont été faites à l'Académie Royale et à l'Observatoire depuis 8 ans ; & nouvellement elle a été confirmée par l'émersion du premier satellite, observée à Paris le 09 Novembre dernier à 5 heures, 35 minutes, 45 secondes du soir, 10 minutes plus tard qu'on ne l'eût dû attendre, en les déduisant de celles qui avoient

été observées au mois d’Août, lorsque la Terre étoit beaucoup plus proche de Jupiter, ce que Mr. Roemer avoit prédit à l’Académie dès le commencement de Septembre ...

C’est la première détermination de la vitesse de la lumière. Des mesures fondées sur le même principe conduisirent ultérieurement à une durée de 7 minutes pour franchir la distance Terre-Soleil. L’explication de Roemer fut sujette à débat, certains astronomes essayant d’expliquer le retard observé par des irrégularités du mouvement du satellite dues à des perturbations.

IX. L’Optique de Newton.

IX.1. L’attraction universelle.

L’opinion de Newton sur la réfraction et la réflexion de la lumière apparaît dans *Les Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle* en 1687. Newton essaie d’interpréter ces phénomènes en vertu d’une loi d’attraction de la matière sur la lumière, analogue à l’action à distance de la gravitation. Madame du Châtelet, dans sa traduction des *Principia*, résume les points de vue de Descartes et Fermat, puis celle de Newton. L’hypothèse suivant laquelle la vitesse de la lumière est plus grande dans le milieu le plus dense, trouvait une justification qui pouvait apparaître faible et contraire au sens commun dans la théorie cartésienne. Ces défauts sont levés dans la théorie Newtonienne, aux yeux de la traductrice de Newton, qui l’exprime ainsi :

Cit. Il est aisé de voir comment l’attraction donne le dénouement de cette difficulté ; car ce principe montre que le mouvement progressif de la lumière n’est pas seulement moins retardé dans le milieu le plus dense, comme le vouloit Descartes, mais qu’il est réellement accéléré, et cela par l’attraction du milieu plus dense lorsqu’il pénètre.

Ce n’est pas seulement lorsque le rayon a atteint le milieu réfringent et au point d’incidence, qu’il agit sur lui ; l’incurvation du rayon commence un peu auparavant, et elle augmente à mesure qu’il s’approche du milieu réfringent, et même dans l’intérieur de ce milieu jusqu’à une certaine profondeur.

Newton établit tout d’abord une première proposition générale, relative au mouvement des corps matériels:

Cit. Si deux milieux, dont chacun est homogène, sont séparés par un espace terminé de part et d’autre par des plans parallèles, et qu’un corps passant par cet espace soit attiré ou poussé perpendiculairement vers l’un ou l’autre de ces milieux, que de plus il n’éprouve aucune autre force qui le retarde ou l’accélère ; et que l’attraction soit toujours la même partout à des distances égales de l’un et de l’autre plan prises du même côté de ces plans ; le sinus d’incidence sur l’un ou l’autre plan sera en raison donnée au sinus d’émergence par l’autre plan. *Prop. XCIV. Th. XLVIII. Section 14. Livre I.*

La proposition suivante porte sur le rapport des vitesses à l’incidence et à l’émergence, dans le cadre du problème précédent :

Cit. Les mêmes choses étant posées, la vitesse du corps avant l’incidence est à la vitesse après l’émergence, comme le sinus d’émergence au sinus d’incidence.

Ainsi l’on note i l’angle d’incidence et r celui d’émergence, et v_i et v_e les vitesses à l’incidence et à l’émergence respectivement :

$$v_i / v_e = \sin r / \sin i$$

Si le corps émerge dans un milieu plus dense, l'angle r est plus petit que i et il s'ensuit que la vitesse à l'émergence est plus grande que celle à l'incidence.

Le point de vue que développe Newton repose sur l'analogie de la lumière avec un corps matériel soumis aux lois de la mécanique, c'est à dire à *l'attraction universelle* capable ici de courber les rayons lumineux. Dans la Scolie qui suit la proposition XCVI, Newton écrit que

Cit. [l'] on peut appliquer ces recherches sur l'attraction à la réflexion de la lumière et à la réfraction qui se fait, comme Snellius l'a découvert, en raison donnée des sécantes, et par conséquent en raison donnée des sinus, ainsi que Descartes l'a fait voir.

La diffraction découverte par Grimaldi illustre pour Newton le fait que la matière courbe la trajectoire des rayons lumineux : « les rayons ... s'infléchissent autour de ces corps comme s'ils étoient attirés ... ». Plus loin, il étend cette propriété à la réfraction :

Cit. Il en est de même des rayons qui tombent sur le verre : ainsi la réfraction ne se fait pas dans le seul point de l'incidence ; mais peu à peu par l'incurvation continue des rayons, laquelle se fait en partie dans l'air avant qu'ils atteignent le verre, et en partie, si je ne me trompe, dans le verre même après qu'ils y sont entrés ... *Principia*

La possibilité de développer une analogie mécanique de la lumière réside pour Newton dans le fait que la vitesse de la lumière est finie, comme il a été montré quelques années auparavant par Roemer et qu'elle suit donc un « mouvement progressif » comme un corps qui se déplace. Quant à la nature de la lumière, il ne se prononce pas :

Cit. Au reste, je ne m'embarasse point de la nature des rayons, je n'examine point s'ils sont matériels ou non ; mais je me contente de déterminer les trajectoires des corps qui peuvent être semblables à celles que décrivent les rayons. *Principia ou Optique?*

Les travaux de **Isaac Newton** (1642-1727) ne seront publiés dans le détail que plus tardivement, en 1704, dans le traité *Opticks*. Newton n'aura alors plus de contradicteur vivant puisque Hooke et Huygens sont décédés. Newton y donne sa définition d'un rayon lumineux :

Cit. Je nomme Rayons les moindres parties de la lumière, tant celles qui sont successives dans les mêmes lignes, que celles qui sont simultanées dans des lignes différentes.

Il est évident que la lumière est composée de parties successives et de parties simultanées : puisqu'à chaque instant on peut arrêter celles qui tombent sur un même endroit, et laisser passer celles qui y tombent l'instant d'après ; comme on peut, au même instant, les arrêter dans un endroit, et les laisser passer dans un autre. Or il est impossible que les parties interceptées et les parties transmises soient les mêmes. Ainsi, toute partie de lumière qui peut être arrêtée ou propagée seule, comme toute partie de lumière qui peut agir ou être effectuée indépendamment des autres, est ce que j'appelle un *Rayon*⁴¹. *Optique. Livre I. Définition I.*

⁴¹ By the rays of light I understand its least parts, and those as well successive in the same lines, as contemporary in several lines.

For it is manifest that light consists of parts, both successive and contemporary; because in the same place you may stop that which comes one moment and let pass that which pass presently after; and in the same time you

Le *rayon lumineux* est pour Newton une quantité élémentaire de lumière que l'on peut isoler sans modifier les propriétés globales du faisceau.

IX.2. Les couleurs.

Newton définit la notion importante dans la théorie Newtonienne de *réfrangibilité* des rayons lumineux:

Cit. La réfrangibilité des rayons de lumière est leur disposition à être détournés de leurs directions, en passant d'un milieu dans un autre ; et leur plus ou moins grande réfrangibilité est leur disposition à être plus ou moins détournés de leurs directions, à égales incidences sur le même milieu⁴². *Livre I. Définition II.*

Après d'autres définitions, Newton rappelle les propriétés connues de la lumière, qu'il considère comme des faits expérimentaux: égalité des angles d'incidence et de réflexion, loi des sinus pour la réfraction, principe de retour inverse de la lumière ... Il détaille également le trajet d'un rayon lumineux dans un prisme et une lentille. Il interprète la réfraction par une *force* au voisinage de la surface, plus importante dans le milieu le plus dense, qui dévie convenablement les rayons. Newton a donc besoin que la *vitesse de la lumière soit plus grande dans le milieu le plus dense*, comme le suggère l'analogie corpusculaire classique. Il ne donne aucun détail sur la nature de cette force dont semble-t-il, il recherchera infructueusement la caractérisation dans ses travaux d'alchimie.

S'ensuivent les propositions, débutant par la clef de voûte de la théorie Newtonienne des couleurs:

Cit. Les rayons qui diffèrent en couleur diffèrent aussi en réfrangibilité. *Livre I. Première proposition. Théorème I.*

La lumière du soleil est composée de rayons différemment réfrangibles⁴³. *Livre I. Première proposition. Théorème II.*

Ces propositions sont énoncées sur la base de neuf expériences à prismes de verre.

Newton se place dans une chambre où règne l'obscurité la plus totale, perce un trou circulaire de 5mm dans un volet et place derrière cet orifice un prisme de verre qui réfracte la lumière sur la paroi opposée de la chambre sur laquelle est placée une feuille de papier blanche.

VIDÉO

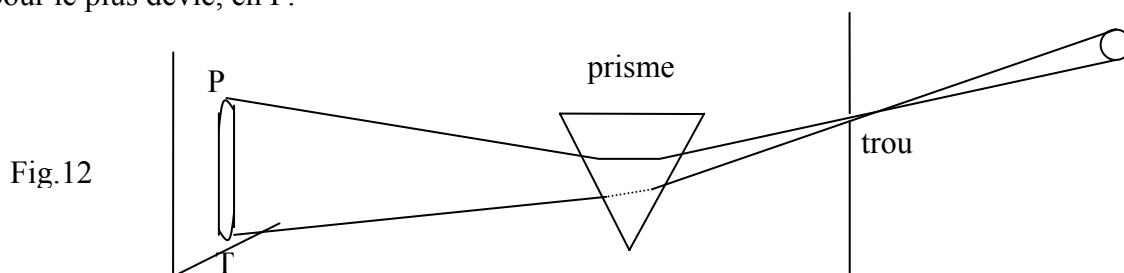
Dans toutes ses expériences, Newton se place au *minimum de déviation* du prisme: les angles que font les rayons lumineux avec la normale aux faces entrantes et sortantes du prisme sont égaux. Le réglage est difficile et Newton réitère ses mesures avant de donner des valeurs.

may stop it in any one place, and let it pass in any other. For that part of light which is stopped cannot be the same with that which is let pass. The least light or part of light, which may be stopped alone without the rest of the light, or propagated alone, or do or suffer anything alone, which the rest of the light does not or suffers not, I call a ray of light.

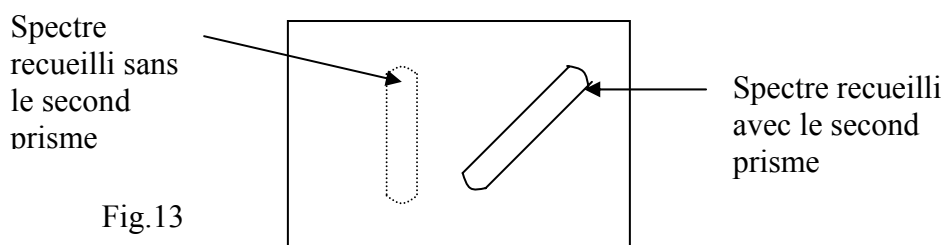
⁴² Refrangibility of the rays of light, is their disposition to be refracted or turned out of their way in passing out of one transparent body or medium into another. And a greater or less refrangibility of rays, is their disposition to be turned more or less out of their way in like incidences on the same medium.

⁴³ Light which differs in colour, differs also in degrees of refrangibility.
The light of the sun consists of rays differently refrangible.

Ci-dessous figure le schéma de la *troisième* de ses expériences. Le prisme devrait donner une « image » du soleil sur l'écran, vu angulairement sous un angle de $32'$. Or celle-ci est fortement étirée: cinq fois plus longue que large, colorée: rouge pour le moins dévié, en T, et violet pour le plus dévié, en P.



Dans sa *cinquième* expérience, il se penche sur l'effet d'un second prisme, disposé aussitôt après le premier, dans une direction perpendiculaire à celui-ci. Il observe la répartition de lumière suivante

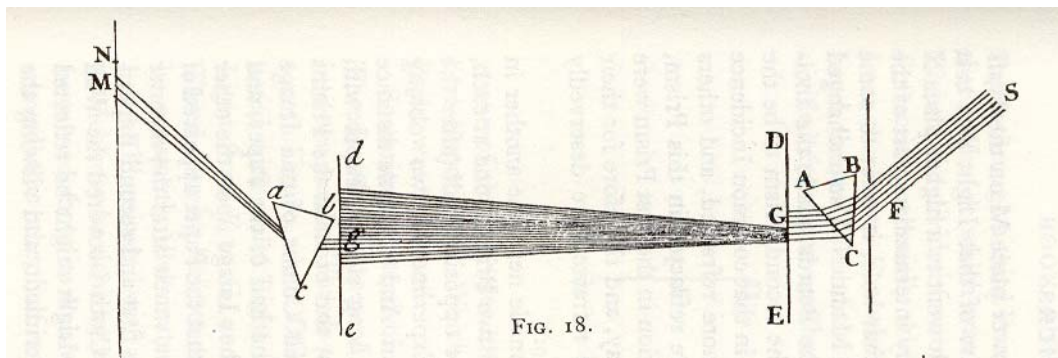


Ce qui lui prouve que les rayons lumineux ne sont pas « dilatés » par le prisme, et que le caractère « réfrangible » de chaque couleur est un caractère propre à elle-même: le violet, qui était le plus dévié par le premier prisme, l'est aussi par le second, alors que le rouge, qui l'était le moins le reste; ce qui explique la forme penchée de « l'image » obtenue par ce dispositif. L'image de la Fig.13 résulte donc de la juxtaposition d'images individuelles du soleil associées à différentes couleurs différemment réfrangibles.

Pour illustrer plus précisément que le degré de réfrangibilité de la lumière ne dépend que de la couleur, Newton réalise une nouvelle expérience, la sixième des neuf qu'il dédie à son propos, faisant intervenir deux prismes.

Cit. Ayant introduit dans ma chambre obscure un gros faisceau de rayons solaires, par un trou fait au volet, je le fis tomber sur un prisme peu distant ABC (Fig. 18), de manière à projeter le spectre au fond de la chambre. Proche de ce prisme j'élevai verticalement une planche mince DE, percée en G d'un trou rond de quatre lignes, afin de transmettre une partie de la lumière réfractée. Ensuite, environ à 12 pieds de cette planche, j'en élevai une autre *de* percée en g d'un âreil trou, afin de ne donner passage qu'à une partie de la lumière incidente. Immédiatement après le dernier trou, je fixai un second prisme *abc* pour réfracter les rayons transmis. Alors je revins promptement au premier : et le tournant peu à peu sur son axe, je fis monter et descendre l'image projetée sur la seconde planche ; en sorte que les rayons de toutes ses parties pouvaient passer successivement par le trou de cette planche, et tomber sur le prisme qui était derrière : en même temps je marquai sur le mur opposé les endroits MN où tombait chaque espèce de rayons, après avoir été réfractés par le second prisme ; et tandis que le premier tournait sur son axe, je remarquai que ces endroits placés au-dessus l'un de

l'autre changeaient sans cesse. Par leurs hauteurs respectives, je trouvai constamment que les rayons violets, qui avaient souffert la plus grande réfraction dans le premier prisme, souffraient aussi la plus grande réfraction dans le second prisme ; et ainsi des autres espèces. Cela se passait de la sorte, soit que les axes des deux prismes fussent parallèles, soient qu'ils fussent inclinés l'un à l'autre sur l'horizon, à angles quelconques. Puis donc que les planches du second prisme étaient immobiles, l'incidence des rayons hétérogènes était égale dans tous ces cas. Cependant les rayons étaient plus réfractés les uns que les autres : or ceux qui étaient les plus réfractés par le second prisme, étaient aussi les plus réfractés par le premier ; ils pouvaient donc, à juste titre, être réputés plus réfrangibles. Ce qui prouve la *première Proposition* aussi bien que la *seconde*⁴⁴.



VIDÉO

Il énonce alors la proposition suivante:

Cit. La blancheur de la lumière solaire résulte de toutes les couleurs primitives mêlées dans une juste proportion ; et avec des couleurs matérielles on peut composer le blanc, et tous les gris entre le blanc et le noir⁴⁵. *Livre I. Partie II. Prop. 5.*

Newton reconstitue un faisceau de lumière blanche en faisant se superposer les couleurs séparées par un prisme, qu'il disperse à nouveau pour en vérifier la composition (Prop.XI).

⁴⁴ In the middle of two thin boards I made round holes a third part of an inch in diameter, and in the window-shut a much broader hole being made to let into my darkened chamber a large beam of the sun's light ; I placed a prism behind the shut in that beam to refract it towards the opposite wall, and close behind the prism I fixed one of the boards, in such manner that the middle of the refracted light might pass through the hole made in it, and the rest be intercepted by the board. Then at the distance of about twelve feet from the first board I fixed the other board in such a manner that the middle of the refracted light which came through the hole in the first board, and fell upon the opposite wall, might pass through the hole in this other board, and the rest being intercepted by the board might paint upon it the coloured spectrum of the sun. And close behind this board I fixed another prism to refract the light which came through the hole. Then I returned speedily to the first prism, and by turning it slowly to and fro about its axis, I caused the image which fell upon that second board to move up and down upon that board, that all its parts might successively pass through the hole in that board and fall upon the prism and behind it. And in the mean time, I noted the places on the opposite wall to which that light after its refraction in the second prism did pass; and by the difference of the places I found that the light which being most refracted in the first prism did go to the blue end of the image, was again more refracted in the second prism than the light which went to the red end of that image, which proves as well the first proposition as the second...

⁴⁵ Whiteness and all grey colours between white and black, may be compounded of colours, and the whiteness of the sun's light is compounded of all the primary colours mixed in a due proportion.

VIDÉO

Newton remarque encore que la « lumière homogène » ne peut être changée ni par réflexion ni par réfraction et communique sa couleur aux objets qu'elle éclaire.

VIDÉO

IX.3. Les « lames minces ».

Newton est également célèbre en optique pour avoir étudié les *lames minces*⁴⁶

Cit. C'est une chose connue, que les corps transparents fort minces, tels que le verre, l'eau, l'air, etc ..., soufflés en bulles ou réduits en lamelles, produisent, suivant leur ténuité, diverses couleurs; alors qu'ils paraissent acolorés lorsqu'ils sont plus épais⁴⁷.
Livre second. Première partie.

De façon à se placer dans des conditions d'expériences reproductibles, Newton utilise un dispositif formé de deux lentilles, l'une de grande focale et l'autre de courte focale permettant d'assimiler le dispositif à une lentille sphérique posée sur un plan. Il presse une face contre l'autre et observe des *anneaux* par réflexion. Suivant la pression appliquée, les anneaux semblent disparaître dans l'anneau central noir ou, en relâchant la pression, naître à partir de celui-ci et grandir. Le dispositif, éclairé par une lumière blanche, produit des anneaux colorés. Le diamètre des anneaux progresse arithmétiquement comme la racine carrée des nombres impairs successifs, ce que Newton explique par la nature du contact entre les lentilles: une sphère sur un plan. Il peut alors calculer l'épaisseur d'air comprise entre les lentilles en chaque point et la relier à la mesure du diamètre des anneaux. Il rend son faisceau monochromatique en dispersant la lumière incidente à l'aide d'un prisme et sélectionne une couleur donnée par un diaphragme. Il observe alors par réflexion un plus grand nombre d'anneaux, de la couleur du faisceau incident. En transmission, il observe également un système d'anneaux, moins contrasté, les anneaux brillants se trouvant en lieu et place des anneaux sombres observés précédemment. L'anneau central est blanc.

VIDÉO

Newton mouille les lentilles et observe moins d'anneaux. Il interprète l'origine des anneaux dans la différence d'épaisseur de l'air compris entre les verres, qui se trouve ainsi « disposé » à réfléchir ou transmettre sélectivement la lumière, suivant sa couleur.

Il précise plus loin que cette propriété est associée aux rayons eux-mêmes, par leur réflexivité et leur réfrangibilité. Ce qui aboutit à la proposition suivante:

Cit. Tout rayon de lumière, traversant une surface réfringente quelconque, acquiert certaine disposition transitoire qui revient à intervalles égaux : à chaque retour, le

⁴⁶ les effets des lames minces seront décrits ultérieurement comme un *phénomènes d'interférences* dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière.

⁴⁷ It has been observed by others, that the transparent substances, as glass, water, air ... when made very thin by being blown into bubbles, or otherwise formed into plates, do exhibit various colours according to their various thinners, although at a greater thickness they appear very clear and colourless.

rayon passe au travers de la surface réfringente qui suit immédiatement, et à chaque intermission il est réfléchi par cette surface⁴⁸. *Livre II. Partie III. Prop. 12.*

Ce phénomène n'a lieu que dans le « coin d'air » formé par les lentilles en contact. A propos de l'alternance des réflexions et des transmissions, Newton montre qu'elle fait intervenir les deux faces des lentilles en regard, et qu'il doit y avoir quelque « action » ou disposition, qui se propage de l'une à l'autre et qui conditionne la réflexion ou la réfraction du rayon sur la seconde face. Il précise:

Cit. Mais en quoi consiste cette disposition? Tient-elle à un mouvement de vibration dans le rayon ou dans le milieu? Je n'entrerai pas ici dans l'examen de cette question; j'observerai seulement, pour ceux qui n'aiment point à admettre une nouvelle découverte qu'il leur est impossible d'expliquer par aucune hypothèse, qu'on peut supposer pour le présent que les rayons de lumière, venant à tomber sur une surface quelconque réfringente ou réfléchissante, produisent des vibrations dans le milieu ou dans le corps réfringent ou réfléchissant, comme des pierres jetées dans l'eau y excitent des ondulations, ou comme la percussion des corps en excite dans l'air. En excitant ces vibrations, les rayons agitent les parties solides du corps réfringent ou réfléchissant; de cette sorte, ils échauffent ces corps. Les vibrations ainsi excitées se propagent dans le milieu réfringent ou réfléchissant, à peu près de la même manière que celles du son se propageant dans l'air; elles ont donc un mouvement plus rapide que celui des rayons de sorte qu'elles les atteignent. Ainsi, lorsqu'un rayon se trouve dans cette partie de la vibration qui concourt avec son propre mouvement, il passe aisément à travers une surface réfringente; mais lorsqu'il se trouve dans la partie opposée de la vibration qui fait obstacle à son mouvement, il est aisément réfléchi: chaque rayon est donc successivement disposé à être réfléchi ou transmis par chaque vibration qui l'atteint⁴⁹. *Prop. 12.*

Apparaît dans ce passage une tentative d'explication originale dans laquelle apparaît un certain caractère ondulatoire pour rendre compte du caractère périodique du phénomène observé. Il est conduit à énoncer une nouvelle définition, qui traduit l'apparition d'un paramètre *ad hoc* dans la théorie:

Cit. Les retours de la disposition d'un rayon quelconque à être réfléchi, je les appelle *Accès de facile réflexion*; comme j'appelle *Accès de facile transmission*, les retours de

⁴⁸ Every ray of light in its passage through any refraction surface is put into a certain transient state, which in the progress of the rays returns at equal intervals, and disposes the ray at every return to be easily transmitted through the next refracting surface, and between the returns to be easily reflected by it.

⁴⁹ What kind of action or disposition this is, whether it consists in a circulating or a vibrating motion of the ray, or of the medium, or something else, I do not enquire here. Those that are averse from assenting to any new discoveries, but such as they can explain by an hypothesis, may for the present suppose, that as stones falling upon water put the water into an undulating motion, and all bodies by percussion excite vibrations in the air; so the rays of light, by impinging on any refracting or reflecting surface, excite vibrations in the refracting or reflecting medium or substance, and by exciting them agitate the solid parts of the refracting or reflecting body, and by agitating them cause the body to grow warm or hot; that the vibrations thus excited are propagated in the refracting or reflecting medium or substance, much after the manner that vibrations are propagated in the air for causing sound, and move faster than the rays so as to overtake them; and that when any ray is in that part of the vibration which conspires with its motion, it easily breaks through a refracting surface, but when it is the contrary part of the vibration which impedes its motion, it is easily reflected; and, by consequence, that every ray is successively disposed to be easily reflected, or easily transmitted, by every vibration which overtakes it. But whether this hypothesis be true or false I do not here consider.

sa disposition à être transmis. Quant à l'espace qui se trouve entre les deux retours, je le nommerai *Intervalle des Accès*⁵⁰. Prop. 12 .

Newton espère pouvoir expliquer aussi la réflexion partielle à partir de cette proposition. Il réalise une mesure de « l'intervalle de ces accès »⁵¹.

IX.4 . L' « inflexion de la lumière ».

Ainsi s'achève le second livre de l'optique; le troisième s'intéresse à un sujet encore moins clair: celui de la diffraction découvert par Grimaldi, que Newton analyse en termes « d'inflexions » car il veut expliquer ce phénomène par une force déviant le rayon lumineux de sa trajectoire au voisinage d'un objet *matériel*, une force analogue à la gravitation. En guise de source lumineuse, il utilise un trou de 0.35 mm percé à l'aide d'une aiguille dans une plaque de laiton, sur lequel arrive la lumière solaire. Il place un objet (cheveu, couteau..) trois ou quatre mètres plus loin et recueille « l'image » sur un écran situé quelques centimètres derrière l'objet, qu'il déplacera graduellement par la suite. Il observe la formation des franges et leur irisation. Il réalise des expériences similaires en lumière monochromatique. Il note le brouillage et la disparition du phénomène avec l'augmentation de la taille du trou. Newton attribue donc l'« inflexion » du faisceau à une force, évitant de discuter les expériences de Grimaldi, lequel avait montré que la matière de l'obstacle n'influe pas sur les franges observées. Dans la série de questions qui terminent son ouvrage, comme autant de problèmes non résolus, Newton écrit

Cit. Les corps n'agissent-ils pas à certaine distance sur la lumière, de manière à infléchir ses rayons; et (toutes choses d'ailleurs égales) l'énergie de cette action n'augmente-t-elle pas à mesure que la distance diminue⁵² ? *Livre troisième. Question I.*

Le support de cette action serait un *éther* qui baignerait tous les corps, dont il suppose la densité croître au fur et à mesure que l'on s'éloigne du corps matériel, ce milieu se condensant. Un éther extrêmement subtil, pour expliquer qu'il ne freine pas les astres. Un éther qui expliquerait à la fois l'origine de la force de gravitation et la diffraction. Il soulève également le problème rencontré par Huygens avec deux cristaux de calcite et introduit la notion de côté des rayons lumineux, pour expliquer leur disposition à se dédoubler après la traversée d'un second cristal biréfringent.

Les expériences de Newton ont été menées avec beaucoup de savoir-faire et les idées sur la couleur sont désormais précisées. L'étude des lames minces a été avancée et quantifiée grâce à l'expérience des « anneaux de Newton ».

⁵⁰ The returns of the disposition of any ray to be reflected I will call its Fits of easy reflection, and those of its disposition to be transmitted its Fits of easy refraction, and the space between every return and the next return, the Interval of these Fits.

⁵¹ Cet ordre de grandeur correspond à un facteur deux près à la longueur d'onde de la théorie ondulatoire.

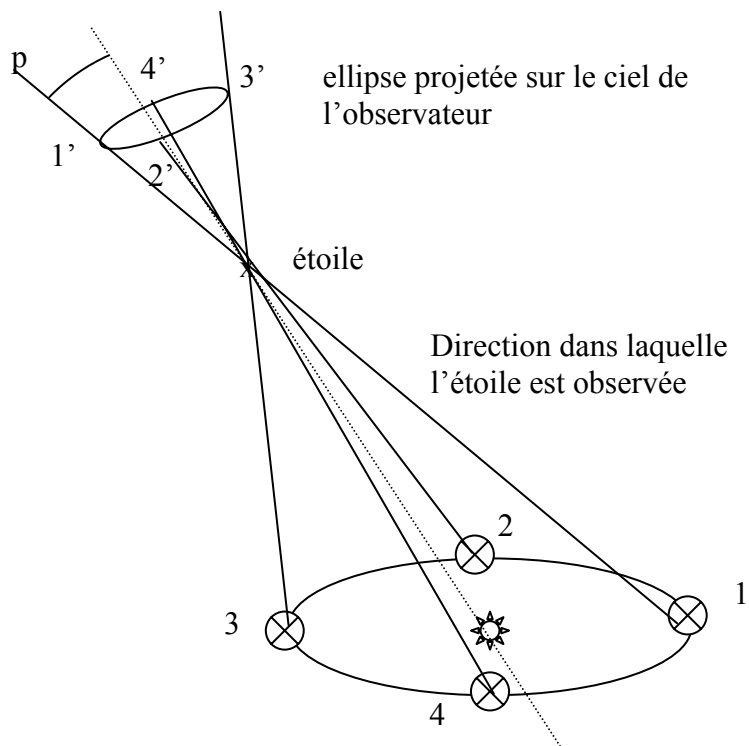
⁵² Do not bodies act upon light at a distance, and by their action bend its rays; and is not this action strongest at a least distance?

X. La lumière au siècle des lumières.

X.1. Bradley et la vitesse de la lumière.

Une nouvelle détermination astronomique de la vitesse de la lumière, plus précise, est faite quelques décennies plus tard : l'astronome anglais **James Bradley** (1693-1762) commence à travailler en 1725 avec Samuel Molyneux, lequel s'est lancé dans la détermination de la parallaxe des étoiles. A la mort de ce dernier, Bradley continuera les observations. Le phénomène de parallaxe est une conséquence du mouvement annuel de la Terre autour du Soleil. La justification du système héliocentrique s'étaye jusqu'alors sur les lois de Kepler et la théorie Newtonienne, mais il n'y a pas de preuve expérimentale directe du mouvement orbital de la Terre.

L'effet de la parallaxe stellaire est le suivant: la Terre se déplace au cours de son mouvement orbital par rapport aux étoiles; par conséquent celles-ci doivent être vues dans des directions légèrement différentes suivant la position de la Terre sur son orbite. Le mouvement apparent qui s'ensuit doit être une projection de l'orbite de la Terre sur le plan du ciel, dont l'amplitude angulaire dépend de la distance entre le soleil et l'étoile considérée. Le mouvement apparent de l'étoile est opposé au mouvement de la Terre, comme le montre le schéma ci dessous :



L'étoile, supposée fixe, est vue dans la direction 11' quand la Terre est en 1 ... L'orbite de la Terre se projette sur le ciel sous la forme d'une ellipse. L'angle sous lequel est vu le demi-grand axe de cette ellipse est la parallaxe de l'étoile. Plus l'étoile est lointaine, plus cet angle est petit. L'ellipse est décrite dans le sens opposé à l'orbite terrestre.

La détermination de la parallaxe est de la plus grande importance: non seulement elle est une détection directe du mouvement orbital de la Terre, mais elle fournit le moyen de connaître la distance des étoiles.

A l'époque de Bradley, certains astronomes pensent avoir décelé ce mouvement de parallaxe. Molyneux a fait construire un instrument très précis, un « tube zénithal » destiné à mettre en évidence la parallaxe suspectée de l'étoile γ Draconis. La position de l'étoile est relevée au

zénith le 3 décembre 1725, puis les 5, 11, et 12 décembre. Aucun mouvement spécifique n'est observé. Ces observations, ainsi que les suivantes, sont décrites dans l'article des *Philosophical Transactions* de 1728 (n. 406, p. 637). A son retour, Bradley réitère les observations:

Cit. It was chiefly therefore curiosity that tempted Mr. Bradley, being at Kew, where the instrument was fixed, to prepare observing the star on Dec. 17, when having adjusted the instrument as usual, he perceived that it passed a little more southerly this day than when it was observed before.

Dans un premier temps, Bradley vérifie qu'il ne s'agit pas d'une erreur expérimentale. En refaisant les observations le 20, il observe un déplacement encore un peu plus prononcé vers le Sud. Le plus surprenant est que le déplacement observé est *opposé* à l'effet attendu pour la parallaxe.

Bradley examine s'il ne peut s'agir de problèmes avec les matériaux dont est constitué le télescope. Il continue ses observations. En Mars 1726, γ Draconis est décalée de 20'' vers le Sud, puis elle prend un mouvement apparent vers le Nord.

Bradley se demande s'il ne peut s'agir du phénomène de nutation, prédit par la théorie Newtonienne, dû à la perturbation par la Lune de la direction de l'axe de rotation terrestre. Si tel était le cas, le phénomène devrait être le même pour les différentes étoiles. Parallèlement à γ Draconis, Bradley observe une autre étoile qui présente un mouvement apparent analogue, mais l'amplitude bien moindre de ce mouvement contredit l'hypothèse de la nutation.

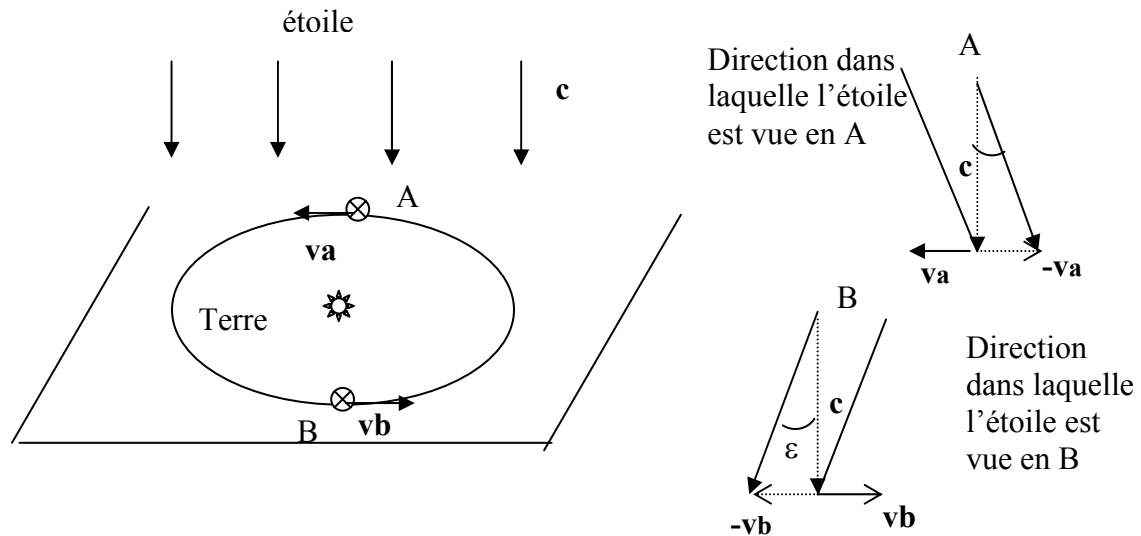
Bradley détermine des mouvements apparents de plusieurs étoiles. Il se fait construire un instrument permettant de pointer dans des directions plus variées, et a ainsi accès à une douzaine d'étoiles brillantes tout au long de l'année. Il entreprend ses nouvelles observations le 19 août 1727. La précision du pointage de son télescope est de 0.5 seconde d'arc. Il remarque que les étoiles sont animées d'un mouvement dont l'amplitude dépend de leur hauteur sur l'horizon. Si les mouvements apparents des différentes étoiles sont tous ramenés à la direction du pôle de l'écliptique (donné par l'étoile polaire), les amplitudes sont sensiblement égales à 40.4''.

Bradley avait beaucoup travaillé sur l'observation des satellites de Jupiter. Il était conscient du fait que la lumière mettait un certain temps à se propager. Il réalise que le phénomène qu'il observe est dû à la composition du mouvement de la lumière avec le mouvement de l'observateur, entraîné avec la Terre. C'est le phénomène *d'aberration* de la lumière. Le schéma ci-dessous est destiné à illustrer cet effet.

La lumière qui provient de l'astre observé se déplace avec une certaine vitesse notée c dont la valeur a été estimée par Roemer. La Terre se déplace sur son orbite avec une vitesse v de l'ordre de 30 km/s. Du point de vue de l'observateur terrestre, la lumière reçue de l'étoile est vue dans une direction déterminée par la composition de ces deux vitesses⁵³, qui ont des directions différentes en général. Le schéma suivant illustre cette composition (supposée classique) des vitesses dans le cas de l'observation d'une étoile située dans une direction

⁵³ La composition galiléenne des vitesses illustrée ici n'est en fait pas rigoureuse. La loi de composition est celle de la relativité restreinte. Pour des directions perpendiculaires comme indiqué, et un faible rapport des vitesses, la correction est cependant mineure.

perpendiculaire au plan de l'orbite terrestre, à six mois d'intervalle. Le déplacement apparent de l'étoile se fait dans le sens de parcours de l'orbite terrestre.



En première approximation, l'angle ε est donné par le rapport v/c . Aussi la mesure de l'amplitude du mouvement apparent, $2\varepsilon = 40.4''$, conduit-elle à une mesure de la vitesse de la lumière en unités de la vitesse de déplacement de la Terre sur son orbite. Bradley établit que ce rapport vaut 10210, d'où il s'ensuit que la lumière met 8 minutes 12 secondes pour nous parvenir du Soleil. De plus, la non observation de la parallaxe stellaire donne une valeur à la borne inférieure de la distance des étoiles. Bradley l'estime à au moins 400000 fois la distance au soleil.

Le phénomène d'aberration des étoiles établit à la fois le mouvement annuel de la Terre sur une base observationnelle, et donne une valeur précise à la vitesse de la lumière, dont la détermination absolue résulte de la bonne connaissance de la distance Terre-Soleil.

Une fois ce phénomène élucidé, les observations peuvent en être corrigées. Le mouvement résiduel restant permettra à Bradley de découvrir ultérieurement le phénomène de nutation précédemment mentionné. Ce n'est qu'en 1838 que Friedrich Bessel mesure la première parallaxe, de $0.31''$, sur l'étoile 61 Cygni, ce qui place celle-ci à 657700 fois la distance Terre-Soleil, soit environ 10 années lumière.

X.2. Maupertuis : genèse du principe de moindre action.

Pierre Louis Moreau de **Maupertuis** (1698-1759) est convaincu par la démonstration Newtonienne de la réfraction. Mais il souhaite trouver une formulation qui ait l'élégance d'un principe général finaliste. C'est ce qui va le motiver à énoncer le "principe de moindre action". Maupertuis s'était déjà inspiré de la découverte d'un principe général dans le domaine de la dynamique, la conservation de la « force vive », pour rechercher un principe général susceptible de décrire l'équilibre des corps au repos :

Cit. Ce n'est que dans ces derniers temps qu'on a découvert une loi dont on ne saurait trop vanter la beauté & l'utilité, c'est que *dans tout système de corps élastiques en mouvement, qui agissent les uns sur les autres, la somme des produits de chaque masse par le carré de la vitesse, ce qu'on appelle la force vive, demeure inaltérablement la même.*

En méditant sur la nature de l'équilibre, j'ai cherché s'il n'y auroit pas dans la statique quelque loi de cette espèce ; s'il n'y auroit pas pour les corps tenus en repos par des

forces, une loi générale, nécessaire pour leur repos ; & voici celle que j'ai trouvé que la Nature observe. *Mém. académie des sciences. 20 février 1740.*

Il énonce ensuite la *loi du repos* :

Cit. Soit un système de corps qui pèsent ou qui soient attirés vers des centres par des forces qui agissent chacune sur chacun comme des fonctions quelconques de leurs distances aux centres : pour que les corps demeurent en repos, il faut que la somme des produits de chaque masse par l'intensité de la force, & par l'intégrale de chaque fonction multipliée par l'élément de la distance au centre (qu'on peut appeler la somme des forces au repos) fasse un minimum. *Loi du repos. Addition.*

Les forces sont ici « proportionnelles à quelques fonctions des distances ». Ce sont ces *fonctions* qui sont intégrées le long du trajet entre le point d'application et le centre dans la citation précédente. Ce principe, que Maupertuis établit sur la base du calcul différentiel et intégral, permet de retrouver les lois de la statique. La justification de l'existence d'un tel principe échappe pour Maupertuis au domaine de la physique :

Cit. Quant aux démonstrations *à priori* de ces sortes de principes [loi du repos ; conservation de la force vive...], il ne paroît pas que la Physique les puisse donner ; elles semblent appartenir à quelque science supérieure.

Ceci ne remet pas en cause l'utilité des principes, car une fois découverts, leur universalité permet de décrire le comportement de la Nature dans des circonstances données.

Maupertuis est à la recherche d'un principe universel qui lui permette de décrire toutes les lois de la nature. Il aborde le cas de la lumière dans son mémoire lu à l'Académie Royale le 15 avril 1744 :

Cit. Depuis le renouvellement des Sciences, depuis même leur première origine, on n'a fait aucune découverte plus belle que celle des loix que suit la lumière, soit qu'elle se meuve dans un milieu uniforme, soit que rencontrant des corps opaques elle soit réfléchie par leur surface, soit que des corps diaphanes l'obligent de changer son cours en les traversant. Ces loix sont les fondements de toute la science de la lumière & des couleurs.

Maupertuis, rend hommage à la description de la réfraction par Newton qui « explique de la manière la plus exacte & la plus rigoureuse les phénomènes de la réfraction » par l'hypothèse de l'*attraction*. Mais pour lui, ce ne peut être que la conséquence d'un principe plus général.

Maupertuis rappelle qu'un tel principe existe pour la propagation en ligne droite ou la réflexion de la lumière :

Cit. Voilà donc le mouvement direct et le mouvement réfléchi de la lumière, qui paroissent dépendre d'une loi métaphysique qui porte, que *la Nature dans la production de ses effets agit toujours par les moyens les plus simples*. Si un corps doit aller d'un point à un autre sans rencontrer nul obstacle, ou s'il n'y doit aller qu'après avoir rencontré un obstacle invincible, la Nature l'y conduit par le chemin le plus court & le temps le plus prompt.

Il note que le principe de *temps le plus prompt* permet à Fermat de traiter le cas de la réfraction. Mais l'hypothèse de Fermat, suivant laquelle la lumière se déplace plus vite dans

les milieux les moins denses est contraire à l'analyse Newtonienne que Maupertuis cautionne. Il lui faut donc rejeter le principe de Fermat et y substituer un autre principe. Maupertuis écrit à propos de Fermat :

Cit. Si donc, comme il étoit assez raisonnable de le supposer, la lumière se mouvoit plus vite dans les milieux plus rares que dans les milieux plus denses ; si elle se mouvoit plus vite dans l'air que dans l'eau, elle suivroit ici la route qu'elle doit suivre pour arriver le plus promptement du point d'où elle part au point où elle doit parvenir. Ce fut par ce principe que Fermat résolut le problème, par ce principe si vraisemblable, que la lumière qui dans sa propagation & sa réflexion va toujours par le temps le plus court qu'il est possible, suivoit encore cette même loi dans la réfraction, & il n'hésita pas à croire que la lumière ne se meuve avec plus de facilité & plus vite dans les milieux les plus rares que dans ceux où, pour un même espace, elle trouvoit une plus grande quantité de matière : en effet, pouvoit-on croire au premier aspect que la lumière traversoit plus facilement & plus vite le cristal & l'eau que l'air & le vuide ?

Au demeurant Maupertuis n'a pas plus de preuve en faveur de l'hypothèse suivant laquelle la lumière se déplace plus vite dans les milieux denses, que n'en avait Fermat pour formuler l'hypothèse inverse, si ce n'est que Maupertuis est convaincu par l'explication Newtonienne qui repose sur l'accélération du corpuscule dans un milieu dense.

Une dizaine d'années après les travaux de Maupertuis, d'Alembert, dans son article sur l'« action » de l'Encyclopédie, résume ainsi la situation à laquelle était confronté Maupertuis :

Cit. [à propos de Fermat et Leibniz] Cette explication, quoique fort ingénieuse, est sujette à une grande difficulté, c'est qu'il faudroit que le corpuscule s'approchât de la perpendiculaire dans les milieux où la vitesse est moindre, & qui par conséquent lui résistent davantage ; ce qui paroît contraire à toutes les explications mécaniques qu'on a données jusqu'à présent de la réfraction des corps, & en particulier de la réfraction de la lumière.

L'explication entr'autres qu'a imaginée M. Newton, la plus satisfaisante de toutes celles qui ont été données jusqu'ici, rend parfaitement compte du rapport constant des sinus, en attribuant la réfraction à la force attractive des milieux ; d'où il s'ensuit que les milieux plus denses, dont l'attraction est plus forte, doivent approcher le rayon de la perpendiculaire : ce qui est en effet confirmé par l'expérience. Or l'attraction du milieu ne sauroit approcher le rayon de la perpendiculaire sans augmenter sa vitesse, comme on peut le démontrer aisément : ainsi, suivant M. Newton, la réfraction doit se faire en s'approchant de la perpendiculaire lorsque la vitesse augmente ; ce qui est contraire à la loi de MM. Fermat & Leibniz⁵⁴.

M. de Maupertuis a cherché à concilier l'explication de M. Newton avec les principes métaphysiques.

Maupertuis nous livre lui-même sa réflexion :

Cit. En méditant profondément sur cette matière [la réfraction de la lumière], j'ai pensé que la lumière, lorsqu'elle passe d'un milieu dans un autre, abandonnant déjà le chemin le plus court, qui est celui de la ligne droite, pouvait bien aussi ne pas suivre celui du temps le plus prompt; en effet, quelle préférence devoit-il y avoir ici du

⁵⁴ D'Alembert amalgame les explications de Fermat et Leibniz, qui sont différentes, comme nous l'avons souligné.

temps sur l'espace? La lumière ne pouvant plus aller tout-à-la-fois par le chemin le plus court, & par celui du temps le plus prompt, pourquoi iroit-elle plutôt par un de ces chemins que par l'autre? aussi ne suit-elle aucun des deux, elle prend une route qui a un avantage plus réel ; *le chemin qu'elle tient est celui par lequel la quantité d'action est la moindre.*

Il faut maintenant expliquer ce que j'entends par la quantité d'action. Lorsqu'un corps est porté d'un point à un autre, il faut pour cela une certaine action, cette action dépend de la vitesse qu'a le corps & de l'espace qu'il parcourt, mais elle n'est ni la vitesse ni l'espace pris séparément. La quantité d'action est d'autant plus grande que la vitesse du corps est plus grande, & que le chemin qu'il parcourt, est plus long, elle est proportionnelle à la somme des espaces multipliés chacun par la vitesse avec laquelle le corps les parcourt.

C'est cela, c'est cette quantité d'action qui est ici la vraie dépense de la Nature, & ce qu'elle ménage le plus qu'il est possible dans le mouvement de la lumière.

Énoncé en ces termes, le principe de moindre action s'apparente au principe énoncé par Leibniz, avec l'identification de la résistance des milieux à la vitesse. D'un point de vue scientifique, Maupertuis ne fait guère plus que Leibniz, dont il assimilait les travaux à ceux de Fermat. Ce sera la source d'une querelle virulente avec Koenig, ancien élève de Leibniz. Voltaire, qui fut l'ami de Maupertuis, écrira contre lui une satire violente. D'Alembert, dans son article de l'Encyclopédie sur la Cosmologie, ne prend pas position mais détaille le contexte de cette querelle :

Cit. Leibniz s'étant formé une idée particulière de la force des corps en mouvement, dont nous parlerons au mot *force*, l'a appelée force vive, & a prétendu qu'elle était le produit de la masse par le carré de la vitesse, ou ce qui revient au même, qu'elle était comme le carré de la vitesse en prenant la masse pour l'unité.

M. Wolf, dans les *Mém. De Petersbourg, tome I*, a imaginé de multiplier la force vive par le temps, & il a appelé ce produit *action*, supposant apparemment que l'action d'un corps est le résultat de toutes les forces qu'il exerce à chaque instant, & par conséquent la somme de toutes les forces vives instantanées.

[...] Nous pouvons en attendant admettre comme une définition de nom arbitraire cette idée de l'action ; & nous remarquerons d'abord qu'elle revient au même que celle de M. de Maupertuis. Car le produit de l'espace par la vitesse, est la même chose que le produit du carré de la vitesse par le temps. M. de Maupertuis, dans les ouvrages que nous avons cités au mot *action*, ne dit point s'il avoit connoissance de la définition de M. Wolf ; il y a apparence que non.

Maupertuis avance le caractère métaphysique d'un tel principe:

Cit. Tous les phénomènes de la réfraction s'accordent maintenant avec le grand principe, *que la Nature, dans la production de ses effets, agit toujours par les voies les plus simples* [...]. On ne peut douter que toutes choses ne soient réglées par un Être suprême qui, pendant qu'il a imprimé à la matière des forces qui dénotent sa puissance, l'a destinée à exécuter des effets qui marquent sa sagesse ; & l'harmonie de ces deux attributs est si parfaite, que sans doute tous les effets de la Nature se pourroient déduire de chacun pris séparément. Une mécanique aveugle & nécessaire suit les desseins de l'Intelligence la plus éclairée & la plus libre ; & si notre esprit étoit plus vaste, il verroit également les causes des effets Physiques, soit en calculant les

propriétés des corps, soit en recherchant ce qu'il y avoit de plus convenable à leur faire exécuter.

Le premier de ces moyens est le plus à notre portée, mais il ne nous mène pas fort loin. Le second quelquefois nous égare, parce que nous ne connoissons point assez quel est le but de la Nature, & que nous pouvons nous méprendre sur la *quantité* que nous devons regarder comme la dépense dans la production de ses effets⁵⁵.

Sûr de son fondement métaphysique, dans *Les loix du mouvement et du repos, déduites d'un principe métaphysique*, Maupertuis retourne son argumentation pour tenir pour preuve de l'existence d'une intelligence supérieure la validité de son principe :

Cit. J'aurois pu partir de ces loix, telles que les Mathematiciens les donnent, & telles que l'expérience les confirme ; & y chercher les caractères de la sagesse et de la puissance de l'Etre suprême. Cependant, comme ceux qui nous les ont données, se sont appuyés sur des hypothèses qui n'étoient pas purement géométriques, & que par là leur certitude ne paroît pas fondée sur des démonstrations rigoureuses ; j'ai cru plus sûr & plus utile de déduire ces loix des attributs d'un Etre tout puissant & tout sage. Si celles que je trouve par cette voie, sont les mêmes qui sont en effet observées dans l'Univers, n'est-ce pas la preuve la plus forte que cet Etre existe, & qu'il est l'auteur de ces loix ?

Inspiratrice de la recherche d'un principe apte à décrire l'équilibre des corps, se trouvait la dynamique. Maupertuis y revient, achevant ainsi sa généralisation :

Cit. Après tant de grands hommes qui ont travaillé sur cette matière, je n'ose presque dire que j'ai découvert le principe universel, sur lequel toutes les loix sont fondées ; qui s'étend également aux Corps durs & aux Corps élastiques ; d'où dépend le Mouvement & le Repos de toutes les substances corporelles.

C'est le principe de la *moindre quantité d'action* : principe si sage et si digne de l'Etre suprême, & auquel la nature paroît si constamment attachée ; qu'elle l'observe non seulement dans tous ses changements mais que dans la permanence, elle tend encore à l'observer. *Dans le choc des corps, le Mouvement se distribue de manière que la quantité d'action, que suppose le changement arrivé, est la plus petite qu'il soit possible. Dans le Repos, les Corps qui se tiennent en équilibre, doivent être tellement situés, que s'il leur arrivoit quelque petit mouvement, la quantité d'action seroit moindre.*

Le principe est alors énoncé sous la forme générale suivante :

Cit. *Lors qu'il arrive quelque changement dans la Nature, la Quantité d'Action, nécessaire pour ce changement est la plus petite qu'il soie possible.*

La *Quantité d'Action* est le produit de la Masse des Corps, par leur vitesse & par l'espace qu'ils parcourent. Lorsqu'un Corps est transporté d'un lieu dans un autre, l'Action est d'autant plus grande, que la masse est plus grosse ; que la vitesse est plus rapide ; que l'espace, par lequel il est transporté, est plus long.

⁵⁵ La dernière phrase de la citation précédente vise Fermat. En fait, elle pourrait s'appliquer à Maupertuis directement, dans la formulation qu'il donne ici au principe de moindre action, puisque la vitesse de la lumière est bien plus grande dans les milieux plus denses. Le principe devra être reformulé en termes de quantité de mouvement.

Par rapport à la précédente version concernant la lumière, apparaît la masse des corps comme facteur multiplicatif. Pour la lumière, s'agissant du même « objet » passant d'un milieu à l'autre, il n'y avait pas lieu de faire intervenir des masses différentes. Sous cette forme, le principe de moindre action permet à Maupertuis de traiter avec succès le repos, et les chocs, et ainsi de retrouver le principe de conservation « de la force vive ».

D'Alembert marque ses distances par rapport à l'explication métaphysique même s'il reconnaît à Maupertuis d'y attacher un sens précis, et de ne pas se livrer à un abus un peu aveugle d'explications finalistes. Il souligne cependant que dans des cas comme la réflexion sur un miroir concave, la lumière suit le trajet qui maximise son chemin *et* également son action. L'action n'est donc pas toujours *moindre*. D'autre part, dans le cas des chocs des corps, Maupertuis doit construire une action en prenant comme variable les vitesses relatives des mobiles avant et après le choc, afin de retrouver les lois connues. Il lui semble donc qu'il y a une certaine latitude dans la combinaison des variables que l'on peut faire, pour construire ce qui est l'action, dans un cas donné, et que le principe de moindre action tient plus d'une élégance mathématique, que d'un principe métaphysique destiné à mettre en évidence les desseins du Créateur. Il ne faut pas donner non plus une origine métaphysique intrinsèque au mot *action* :

Cit. Nous pensons, comme nous l'avons déjà insinué plus haut, que la définition de la *quantité d'action* est une définition de *nom purement mathématique & arbitraire*. On pourroit appeler *action*, le produit de la masse par la vitesse ou par son carré, ou par une fonction quelconque de l'espace & du temps ; l'espace & le temps sont les deux seuls objets que nous voyons clairement dans le mouvement des corps, on peut faire tant de combinaisons mathématiques qu'on voudra de ces deux choses, & on peut appeler tout cela *action* ; mais l'idée primitive et métaphysique du mot *action* n'en sera pas plus claire. *Encyclopédie. art. Cosmologie.*

Ainsi, le principe de moindre action s'apparente plus à une propriété de simplicité mathématique une fois supposées connues, par d'autres moyens « plus à notre portée », les lois que le principe permet de retrouver dans des cas particuliers.

X.3 Euler.

X.3.1. Euler et le principe de moindre action.

Léonhard Euler (1707-1783), qui travaille à l'Académie des sciences de Berlin que Maupertuis préside, rend plus explicite la notion de moindre action, en recherchant la courbe qui, reliant deux points, assure le minimum ou le maximum d'une intégrale d'une fonction donnée d'une variable et des dérivées de cette fonction par rapport à cette variable.

Maupertuis écrit à propos des travaux d'Euler :

Cit. M. le Professeur Euler donna à la fin de la même année son excellent livre : *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*. Dans le Supplément qu'il y avait ajouté, cet illustre géomètre démontre ; Que dans les trajectoires, que des corps décrivent par des forces centrales, la vitesse multipliée par l'élément de la courbe, fait toujours un *minimum*.

Cette remarque me fit d'autant plus plaisir, qu'elle est une belle application de mon principe au mouvement des Planètes ; dont ce principe en effet est la règle.

Euler ouvre la voie à la formulation analytique de Lagrange.

X.3.2. Euler et la lumière.

Euler publie la *Nova Theoria Lucis et Colorum* en 1746. Il s'oppose à la théorie corpusculaire de l'émission des newtoniens, et considère, comme Descartes et Huygens notamment, qu'un fluide très subtil, l'éther, remplit tout l'espace. La lumière consisterait alors en une vibration de cet éther. La vision résulterait de la vibration communiquée par l'éther à la rétine. Euler a beaucoup travaillé sur le son et a étudié les cordes vibrantes ; il fait l'analogie entre le son et la lumière « la lumière étant dans l'éther la même chose que le son dans l'air ». Euler envisage la propagation d'ondes sinusoïdales élastiques dans l'éther⁵⁶. Il introduit la notion de fréquence de la vibration lumineuse pour expliquer les couleurs, à l'image de la vibration qui définit la tonalité d'un son. Il finit par attribuer la plus haute fréquence de la vibration lumineuse au violet et la plus basse au rouge. Le son contourne les obstacles, et c'est ce qui est observé pour la lumière dans le cas de la diffraction. La diffraction, ou l'inflexion, de la lumière, accrédite pour Euler l'analogie avec le son, et par conséquent la théorie ondulatoire. Il tente une explication des couleurs des lames minces, pour lesquelles Newton avait lui-même introduit une certaine périodicité.

L'éther joue un rôle fondamental pour Euler. Il lui permet d'envisager une unification entre les phénomènes physiques. Ainsi, il propose que l'éther lumineux puisse expliquer les phénomènes électrique et magnétiques. Les conceptions d'Euler dans ce domaine peuvent avoir influencé Faraday⁵⁷. Il propose, à l'image de ce qu'avait pu laisser entendre Newton dans ses Questions de l'Optique, que l'éther pourrait aussi expliquer l'attraction gravitationnelle. Il pensait même pouvoir établir un lien entre cet éther et le principe de moindre action.

Il attaquera les conclusions newtoniennes en établissant que la réfrangibilité des rayons lumineux n'est pas proportionnelle à la dispersion du verre, ce qui lui permet d'établir sur un plan théorique la possibilité d'achromats, association de deux lentilles, l'une convergente et l'autre divergente, pour limiter les irisations produites à la traversée du verre. L'impossibilité d'achromats avait conduit Newton à imaginer un dispositif destiné à remplacer la lunette astronomique : le télescope...

X.4. Nicolas de Malebranche.

La conception de la lumière comme les vibrations d'un certain milieu est aussi l'idée qu'avait adoptée auparavant **Nicolas de Malebranche** (1638-1715). Malebranche détaille ses conceptions sur la lumière dans un mémoire lu à l'Académie des Sciences à l'occasion de son élection en 1699. Il complète ce mémoire dans les *XVIe Éclaircissements* qu'il ajoute en 1712 à son ouvrage *À la recherche de la vérité*. Il se place dans la lignée de Descartes mais entreprend de « réformer et perfectionner ce qu'il y a de général dans le système de M. Descartes ». Pour Descartes⁵⁸, les milieux transparents peuvent être considérés comme remplis par le « second élément » (l'éther) dont les parties invisibles sont sphériques et très dures. Cette hypothèse fait douter Malebranche de la possibilité que des rayons de différentes couleurs puissent se croiser sans se modifier. Il considère que le second élément est plutôt

⁵⁶ R. W. Home. *Leonhard Euler's « Anti-Newtonian » Theory of Light*.

⁵⁷ D. Speiser in *Roemer et la vitesse de la lumière*.

⁵⁸ Descartes. *Les Principes de la philosophie*.

constitué d'une infinité de tourbillons « très fluides » qui tournent à une très grande vitesse. Une force centrifuge résulte de cette rotation et exerce une pression sur les tourbillons voisins. Le milieu ainsi constitué, en équilibre, presse continûment sur l'œil, jusqu'au nerf optique. Ce que l'on voit correspond à une « vibration de pression » excitée par la source lumineuse dans le milieu. Malebranche développe une analogie complète avec le son, les vibrations dans l'air qui viennent heurter le tympan étant remplacées par les vibrations de pression du milieu éthéré sur la rétine et le nerf optique. Malebranche dote chacune de ces vibrations d'une *force* qui traduit un *éclat*, et d'une *promptitude* caractéristique de la couleur :

Cit. Ainsi il en est de la lumière et des diverses couleurs comme du son et des différents tons. La grandeur du son vient du plus et du moins de force des vibrations de l'air grossier, et la diversité des tons du plus ou moins de promptitude de ces mêmes vibrations comme tout le monde en convient. La force ou l'éclat des couleurs vient donc aussi du plus et du moins de force des vibrations, non de l'air, mais de la matière subtile ; et les différentes espèces de couleurs du plus et du moins de promptitude de ces mêmes vibrations. Malebranche. *Œuvres*. Rodis-Lewis. p. 1020.

Il rend ainsi compte par sa théorie des vibrations « des couleurs simples homogènes ou primitives, comme le rouge, le jaune, le bleu, etc. » et des « couleurs composées, et même la blancheur qui est la plus composée de toutes, selon les divers mélanges des rayons dont les vibrations auront diverses promptitudes ». En faisant du blanc un mélange, Malebranche intègre les expériences de Newton sur les couleurs.

Alors que le son se transmet « assez lentement » à travers l'air, les vibrations de pression correspondant à la lumière se transmettent très vite parce que :

Cit. ... toutes les parties de la matière éthérée se touchent, qu'elles sont très fluides, et surtout parce qu'elles sont comprimées par le poids, pour ainsi dire, de tous les tourbillons qui sont eux-mêmes comprimés par une force infinie qui répond à la puissance infinie du Créateur, ou du moins par une force comme infinie. De sorte que les vibrations de pression, ou l'action du corps lumineux, se doit communiquer de fort loin en un instant ou en très peu de temps. Malebranche. *Œuvres*. Rodis-Lewis. p. 1020.

X.5. Modèles corpusculaires et ondulatoires.

En ce milieu de XVIII^{ème} siècle, aucune des interprétations concernant la nature de la lumière, « corpusculaire » ou « ondulatoire », ne semble véritablement prévaloir. Comme l'écrit encore d'Alembert dans son article sur la lumière, dans l'Encyclopédie :

Cit. Les deux opinions, il faut l'avouer, ne sont démontrées ni l'une ni l'autre ; et la plus sage réponse à la question de la matière & de la propagation de la lumière, seroit peut-être de dire que nous n'en savons rien.

Et un peu plus loin :

Cit. Avec ces propositions bien simples [propagation rectiligne, lois de la réflexion et de la réfraction], la théorie de la lumière devient une science purement géométrique, & on démontre les propriétés sans savoir ni en quoi elle consiste, ni comment se fait sa propagation, à peu près comme le professeur Saunderson donnait des leçons d'optique, quoiqu'il fût presque aveugle de naissance.

XI. Un nouveau phénomène? La polarisation de la lumière.

Etienne Louis Malus (1775-1812) approfondit les connaissances sur la double réfraction des substances cristallisées. Il rédige sur ce thème un mémoire en réponse au prix lancé par l'académie des sciences portant sur la biréfringence. Ce mémoire est couronné lors de la séance du 02 janvier 1810. Malus y entreprend une étude expérimentale systématique des caractéristiques du rayon réfracté extraordinairement par le spath d'Islande et d'autres substances cristallisées. Il retrouve la loi énoncée par C.Huyghens, et établie par celui-ci sur la base de la théorie ondulatoire. Il rend à Huyghens un hommage alambiqué, car le point de vue adopté par Malus quant à la nature de la lumière est corpusculaire. Aussi interprète-t-il tous les phénomènes dont il est question dans son mémoire sur la base de l'action de forces agissant à distance sur les « molécules lumineuses ». Le mode d'action de ces forces doit être tel que celles-ci rendent compte des phénomènes observés: elles sont un paramètre *ad hoc* du modèle corpusculaire. Malus écrit cependant :

Cit. On a vu comment la loi à laquelle il [Huyghens] est parvenu peut-être dépouillée du système des ondulations qui répugne aux notions actuelles de la physique. Cette loi considérée en elle-même et débarrassée de l'explication à laquelle Huyghens l'avait attachée, est une des plus belles découvertes de ce célèbre géomètre. P.497. Tome 33. *CR des séances de l'académie des sciences.*

Il relève la désinvolture (la malhonnêteté ?) de Newton à l'égard des travaux de Huyghens :

Cit. Newton, dans les questions qui suivent son *Traité d'Optique*, a consacré plusieurs pages à la double réfraction. Il connoissait l'ouvrage de Huyghens ; cependant il substitue à la loi de ce géomètre une loi plus simple en apparence, mais absolument contraire aux phénomènes, comme M. Haüy l'a remarqué et démontré le premier. On a peine à expliquer le peu de cas que Newton fit, dans cette circonstance, d'une loi que Huyghens avait déclarée conforme à ses expériences ; il est probable qu'il n'en répéta aucune avec le soin qu'il était accoutumé à mettre dans ses travaux physiques, et que, dédaignant l'hypothèse des ondulations qu'il avait combattue et terrassée par ses théories, il enveloppa dans le même jugement et la loi et l'explication qui semblait l'appuyer. pp. 499-500

Cette interprétation est assez favorable à Newton, car le point de vue newtonien évolue constamment dans le traité mentionné et devient très flou. On ne peut en aucun cas considérer que Newton ait « terrassé » par ses vues la théorie ondulatoire, si ce n'est que son interprétation mécaniste utilisant une interaction à distance entre la matière et le rayonnement ont séduit ses successeurs. Malus remarque encore que Wollaston a retrouvé la loi donnée par Huyghens et écrit

Cit. Ce célèbre physicien ajoute que ces résultats sont trop conformes à la théorie de Huyghens pour qu'il soit permis de la négliger. Il est le premier qui, après un siècle d'oubli, ait pensé à vérifier, par quelques expériences directes, la théorie que ce grand géomètre regardait comme incontournable, et que Newton avait rejetée sans examen. p.502

Ainsi, dans un souci d'objectivité, Malus cite-t-il un travail qui accrédite la prédiction théorique du système des ondulations et tend à le réhabiliter aux yeux de ses contemporains.

Au secours de la théorie corpusculaire, Malus, comme Newton, utilise les propres doutes de Huygens sur un point précis. Malus écrit :

Cit. Tous les phénomènes ordinaires de l'optique peuvent s'expliquer, soit dans l'hypothèse de Huygens qui les suppose produites par les ondulations d'un fluide éthéré, soit dans l'hypothèse de Newton qui les suppose produits par l'action des corps sur les molécules lumineuses considérées elles-mêmes comme appartenant à une substance soumise aux forces attractives et répulsives qui servent à expliquer les autres phénomènes de la physique. Les lois relatives à la marche des rayons dans la double réfraction, peuvent encore s'expliquer dans l'une et l'autre hypothèse ; mais Huyghens a avoué lui-même que son hypothèse ne suffisait pas pour expliquer les phénomènes que présente la lumière déjà réfractée extraordinairement, lorsqu'on la soumet à l'action d'un second cristal.

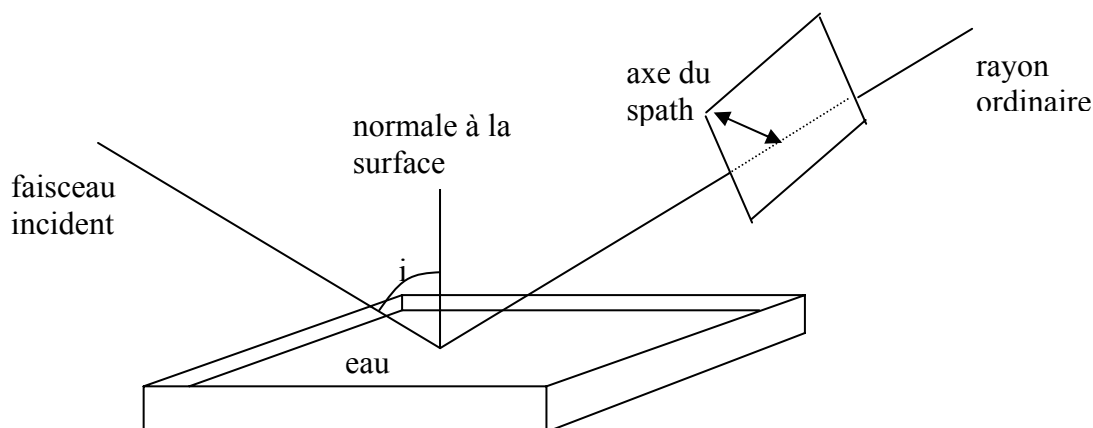
Huyghens semble encore avant tout victime de l'honnêteté avec laquelle il avait porté à la connaissance de ses contemporains un phénomène dont ne rendait pas compte sa théorie ; mais pour lequel il espérait que d'autres trouveraient la solution dans le cadre de la théorie ondulatoire.

Le mémoire de Malus est loin de se limiter à l'analyse des travaux de Huygens. Il met en évidence un comportement commun de la lumière à la double réfraction et la réflexion sur la surface d'un corps transparent. La « légende » dit que Malus observait de son appartement, au travers d'un cristal de calcite, le reflet du soleil couchant sur une fenêtre du palais du Luxembourg ; pour une orientation appropriée du cristal de calcite l'une des deux images du soleil disparaissait, alors qu'après une rotation de 90° c'était au tour de l'autre image de disparaître. Cette légende est née de l'éloge de Malus à l'Académie des sciences, rédigée par François Arago en 1854 et lue l'année suivante après la mort de ce dernier. Dans les conditions expérimentales décrites, il paraît peu probable que Malus ait pu observer un dédoublement des images.

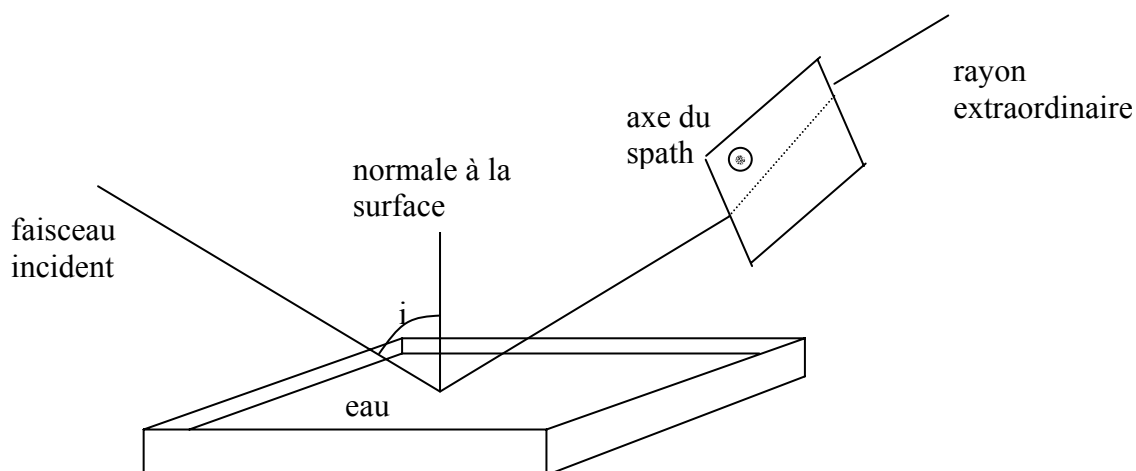
Quoi qu'il en soit, Malus réalise des expériences dans lesquelles il observe les propriétés de la lumière après une réflexion sur la surface d'une cuve remplie d'eau, vis-à-vis de la double réfraction avec un spath :

Cit. Si on fait tomber un faisceau de lumière sur la surface d'une eau stagnante et sous l'angle de $52^\circ 45'$ avec la verticale, la lumière réfléchie a tous les caractères d'un des faisceaux produits par la double réfraction d'un cristal. Elle n'est plus susceptible, comme la lumière directe, de se diviser constamment en deux faisceaux, en tombant sur un rhomboïde de spath d'Islande, et de même que la lumière qui a déjà éprouvé l'action d'un premier cristal, cette faculté dépend de l'angle compris entre les sections principales des deux cristaux, de même elle dépend ici de l'angle compris entre le plan de réflexion et celui de la section principale du cristal qui reçoit la lumière réfléchie. *p. 430.*

Malus fait se réfléchir directement la flamme de la bougie sur la surface de l'eau d'une cuve et place un cristal de calcite sur le trajet de la lumière réfléchie. Pour l'incidence particulière de $52^\circ 45'$ de la lumière, et une orientation spécifique du spath, il constate que l'image ne se dédouble pas. La lumière a donc acquis lors de la réflexion une propriété similaire à celle que lui donnait la traversée d'un premier spath dans les expériences de Huygens.



Lorsque le spath est disposé de façon à ce que son axe principal⁵⁹ soit dans le plan d'incidence⁶⁰, seul un rayon ordinaire est réfracté par le spath comme l'indique le schéma ci-dessus. Dans le cas où l'axe du spath est perpendiculaire au plan d'incidence, seul un rayon extraordinaire est réfracté par le spath comme l'indique le schéma ci-dessous.



Le spath permet dans les expériences précédentes d'*analyser* la lumière réfléchi par la surface de l'eau. Un phénomène analogue est observé si l'on remplace l'eau par une lame de verre. Il en est de même pour « tout corps diaphane », seule la valeur de l'angle d'incidence change.

VIDÉO

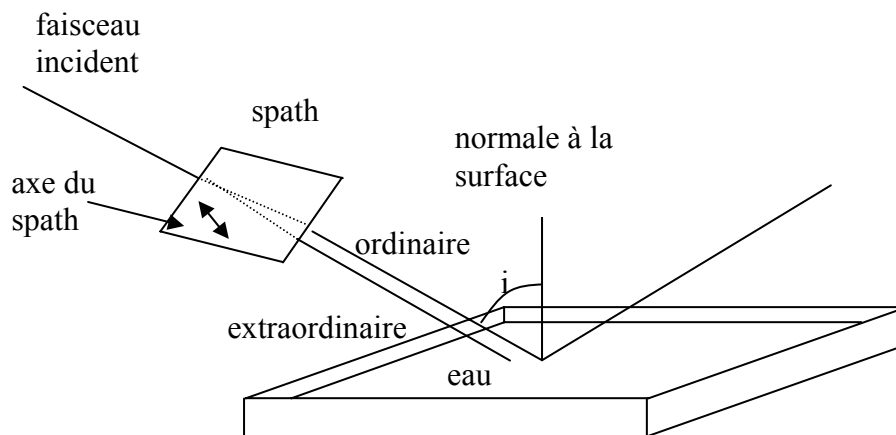
Malus poursuit ses expériences:

⁵⁹ axe de symétrie pour des rotations de 120°

⁶⁰ plan défini par le rayon réfléchi et la normale à la surface de l'eau

Cit. Pour analyser complètement ce phénomène, j'ai disposé verticalement la section principale d'un cristal, et après avoir divisé un rayon lumineux à l'aide de la double réfraction, j'ai reçu les deux faisceaux qui en provenaient sur la surface de l'eau et sous l'angle de $52^{\circ}45'$. Le rayon ordinaire, en se réfractant, a abandonné à la réflexion partielle une partie de ses molécules, comme l'eût fait un faisceau de lumière directe ; mais le rayon extraordinaire a pénétré en entier le liquide.

Le schéma suivant illustre cette expérience. Le faisceau incident est dédoublé par le spath et arrive sur la surface de l'eau. Pour la valeur particulière mentionnée de l'angle d'incidence, lorsque l'axe principal du spath est dans le plan de réflexion, seul le faisceau ordinaire est partiellement réfléchi. Le faisceau extraordinaire quant à lui se réfracte totalement dans l'eau.



Ces phénomènes illustrent une propriété commune de la lumière, qui se révèle à la traversée d'un spath ou dans la réflexion sur un dioptré. Les nouveaux phénomènes découverts par Malus appartiennent à la même classe que l'expérience des deux spaths. Ils mettent en échec la théorie ondulatoire aux yeux de Malus.

Malus adapte l'explication corpusculaire développée par Newton pour rendre compte de l'expérience des deux spaths. Il dote les *corpuscules lumineux* de propriétés structurales: l'une relative à la direction de propagation et les deux autres dans le plan perpendiculaire à cette direction. Malus cherche à se convaincre de l'existence de propriétés microscopiques des corpuscules qui puisse entraîner leur orientation sous l'action d'une force répulsive au voisinage de la surface réfléchissante, sans pour autant dévier de leur trajectoire. Cette force agit sur les *pôles* des molécules, au sens de directions d'axes particuliers dans l'espace : c'est le phénomène de *polarisation*. Les rayons réfléchis ou ayant traversé le spath sont dits « polarisés ».

Cette terminologie est encore utilisée bien qu'elle sous-tende une interprétation bien différente.

Les *rayons lumineux* newtoniens acquièrent une structure de plus en plus compliquée sans que le modèle résultant conduise à des résultats quantitatifs. Les forces n'ont pas de caractéristiques bien précises. La résultante de toutes les interactions doit simplement être telle qu'elle amène à ce qui est observé.

XII. Les interférences de la lumière.

Pratiquement un siècle s'écoule entre la parution de l'ouvrage de Newton et la découverte du « principe d'interférences » de la lumière. L'homme par qui cette découverte extrêmement importante voit le jour est **Thomas Young** (1773-1829).

Une pierre que l'on jette dans une mare produit des petites vagues qui traduisent la propagation d'une onde à la surface de l'eau. Deux pierres jetées ensemble vont produire des ondes qui vont se superposer. Newton a en outre expliqué un phénomène de marée peu ordinaire dans la baie du port de Batsha en vertu de cette observation: quand deux séries de vagues, venues d'origines différentes, se superposent, les minima et maxima des vibrations se produisent là où les différences de chemin parcouru depuis les sources sont des nombres impairs ou pairs de la demi-période de l'ondulation.

Young avait beaucoup travaillé sur le son. Il avait remarqué que, contrairement à l'idée reçue à son époque, l'intensité du son produit par un nombre donné d'instruments de musique identiques n'est pas en proportion du nombre d'instruments: il y a des endroits où le son est moins intense (et d'autres où il est plus intense). L'idée fondamentale de Young est qu'il doit en être de même pour la lumière: la lumière peut interférer. Deux lumières qui s'ajoutent (dans des conditions bien précises) peuvent donner lieu à de l'obscurité ce qui semble en contradiction avec le sens commun. Young énonce ainsi le principe d'interférences de la lumière dans ses *Lectures* du 12 novembre 1801

Cit. Lorsque deux vibrations de provenances différentes, coïncident exactement ou ont des directions très proches, leur effet conjugué est une combinaison du mouvement propre à chacune d'elles⁶¹.

Young recherche une explication simple et unifiée des phénomènes optiques. Il veut interpréter les expériences de Newton restées sans véritable justification théorique tels que les anneaux apparaissant dans l'étude des lames minces. C'est avec cet objectif que Young commence ses *Lectures*

Cit. Alors que la formulation d'hypothèses vraisemblables, sans lien avec l'expérience, est de peu d'utilité dans le développement des sciences expérimentales; toutefois la découverte de principes simples et unificateurs, par lesquels un grand nombre de phénomènes apparemment disparates se trouvent expliqués par des lois cohérentes et universelles, doit être considéré comme fondamental dans le progrès de l'esprit humain⁶².

Cette introduction de Young constitue un plaidoyer. Il sait qu'il aura du mal à convaincre les newtoniens qui campent sur des positions résolument corpusculaires, alors que le principe d'interférences implique une interprétation ondulatoire. Aussi, n'attaque-t-il pas le « maître » de front, mais développe-t-il dans un long préambule sa propre lecture de passages de Newton

⁶¹ When two Undulations, from different Origins, coincide either perfectly or very nearly in Directions, their joint effect is a Combination of the motion belonging to each.

⁶² Although the invention of plausible hypotheses, independent of any connection with experimental observations is of very little use in the promotion of natural knowledge; yet the discovery of simple and uniform principles, by which a great number of apparently heterogeneous phenomena are reduced to coherent and universal laws, must ever be allowed to be of considerable importance towards the improvement of the human intellect.

auxquels il peut se référer favorablement. Il précise n'avoir rien accompli de nouveau, si bien qu'il n'a pas même besoin de réaliser de nouvelles expériences. Il écrit avoir trouvé dans l'œuvre de Newton la confirmation de ses intuitions

Cit. Un examen plus attentif des couleurs des lames minces, comme elles sont décrites dans l'optique de Newton, a converti mon attirance pour la théorie ondulatoire de la lumière en une conviction très forte de sa validité et de sa généralité⁶³. [...] Une étude plus complète des différents écrits de Newton m'a montré qu'il fut en fait le précurseur d'une théorie telle que celle que je vais m'efforcer de développer.

En fait, pour Young, une lecture biaisée des travaux de Newton a été faite. Il est vrai qu'à y regarder de près, il n'y a pas de théorie physique univoque de la lumière chez Newton. Les points clefs du raisonnement de Young peuvent être résumés dans les propositions suivantes:

Cit. Un éther luminifère remplit l'univers, hautement élastique et ténu.
Des vibrations sont excitées dans cet éther à chaque fois qu'un corps devient lumineux.
La sensation qu'il y a des couleurs différentes dépend des différences de fréquences dans les vibrations que la lumière engendre sur la rétine.
Toutes les impulsions se propagent avec une même célérité dans un milieu élastique homogène.
L'ondulation résultant de la vibration d'une particule unique doit s'étendre dans un milieu homogène sous la forme d'une sphère⁶⁴ ...

Puis suivent des propositions visant à expliquer par cette théorie les phénomènes de réflexion et de réfraction.

La différence fondamentale avec la théorie de Huygens est que les vibrations sont périodiques, et qu'il ne s'agit plus d'impulsions. Young se donne ainsi le moyen d'expliquer les couleurs, grâce aux *longueurs d'ondes* caractéristiques de ces « ondulations ». Il bénéficie de l'apport d'Euler dans ce domaine.

Young peut ainsi expliquer les couleurs apparaissant dans les bulles de savon, les anneaux de Newton en lumière blanche, les arc-en-ciel « surnuméraires », ou les couleurs des surfaces striées... Il réalise pour cette dernière classe de phénomène un prototype de réseau de diffraction qui lui permet de mesurer précisément les longueurs d'onde des différentes couleurs et de se faire précurseur de la spectrographie.

Il propose le dispositif dit des « trous d'Young » pour illustrer les interférences de la lumière.

⁶³ A further consideration of the colours on thin plates, as they are described in Newton's Opticks, has converted that prepossession which I before entertained for the undulatory system of light, into a very strong conviction of its truth and sufficiency.

A more extensive examination of Newton's various writings has shown me, that he was in reality the first that suggested such a theory as I shall endeavour to maintain...

⁶⁴ A luminiferous Ether pervades the Universe, rare and elastic in a high degree.

Undulations are excited in this Ether whenever a Body becomes luminous.

The sensation of different colours depends on the different frequency of Vibrations, excited by light in the Retina.

All impulses are propagated in a homogeneous elastic Medium with an equable Velocity.

An Undulation conceive to originate from the vibration of a single particle, must

Expand through a homogeneous medium in a spherical form ...

VIDÉO

Les travaux de Young sont réputés difficiles à lire, car morcelés et parfois confus. Ainsi, existe-t-il cinq ou six versions du principe d'interférences. Les conditions expérimentales ne sont pas toujours bien dégagées : ce qui sera nommé ultérieurement cohérence temporelle et spatiale, nécessité d'une même source d'origine, absence de battements temporels analogues au son ... phénomènes d'interférences à deux ondes et de diffraction se trouvent mélangés La théorie de Young reçoit un accueil glacial de la part de physiciens (qui font une lecture erronée de ses travaux), tels que Lord Brougham qui écrit à ce propos

Cit. L'une des hypothèses les plus incompréhensibles qui ait été formulée par l'esprit humain. [...] Le nouveau cas des couleurs a été observé un millier de fois ; et le seul [de Young] mérite est d'en donner une explication absurde et contradictoire⁶⁵.

Young répond à ses détracteurs dans ses *Lectures* notamment

Cit. L'expérience de Grimaldi [...] a été ignorée de Newton. Ceux qui sont attachés à une théorie newtonienne de la lumière, ou aux hypothèses des opticiens modernes, lesquelles reposent sur des vues encore moins larges, feraient bien de tâcher d'imaginer un embryon d'explication pour ces expériences à partir de leurs propres doctrines ; et, s'ils échouent dans cette tentative, qu'ils s'abstiennent à tout le moins de déclarations sans fondements à l'encontre d'un système qui repose sur son acuité à expliquer tous ces phénomènes, et des milliers d'autres analogues⁶⁶.

Young réalise une expérience d'interférences avec les rayons (Ultra-Violet) qui viennent d'être découverts par Ritter, et avance l'hypothèse que lorsque les appareils de détection seront adaptés, les rayons (Infra-Rouge) découverts par Herschel obéiront également au principe d'interférences.

Les travaux de Young demeureront une dizaine d'années dans l'oubli pour prendre un nouvel essor, en France, avec Augustin Fresnel.

XIII. Fresnel et le triomphe de la théorie ondulatoire.

XIII.1. Fresnel : une nouvelle théorie ondulatoire.

Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) conçoit la lumière comme un phénomène ondulatoire.

Il conclura son second mémoire sur la diffraction ainsi :

⁶⁵ One of the most incomprehensible suppositions that we remember in the history of human hypotheses [...]. The new case of colours has been observed a thousand times; and he [Young] has the only merit of giving an absurd and contradictory explanation.

⁶⁶ The experiment of Grimaldi [...] has been left unnoticed by Newton. Those who are attached to the Newtonian theory of light, or to the hypotheses of modern opticians, founded on views still less enlarged, would do well to endeavour to imagine any thing like an explanation of these experiments, derived from their own doctrines; and, if they fail in the attempt, to refrain at least from idle declamation against a system which is founded on the accuracy of its application to all these facts, and to a thousand others of a similar nature.

Cit. Je crois avoir prouvé que la lumière se propage par les ondulations d'un fluide infiniment subtil répandu dans l'espace, et c'est à la démonstration de ce grand principe que je me suis particulièrement attaché ; c'est le but vers lequel j'ai dirigé mes efforts. §47.

Les partisans de la théorie de l'émission avaient objecté que si la lumière se comportait comme une onde, il devait y avoir de la lumière dans l'ombre d'un obstacle. Cet argument tenait à ce qu'on entend les voix bien qu'un obstacle, un mur par exemple, puisse être interposé. Le son contourne donc les obstacles et il devrait en être de même de la lumière dans son analogie avec une onde dans un fluide particulier. Cependant, les expériences sont beaucoup plus difficiles à réaliser avec la lumière ... et bien que Grimaldi ait mentionné la présence de lumière dans la zone d'ombre géométrique portée par un fil, et surtout celles de franges à l'intérieur de cette ombre, cette observation n'a pas été rapportée par Newton. Ces franges sont plus difficiles à observer. L'explication de leur formation eût été encore plus délicate pour le système Newtonien. D'autre part, le doute que Fresnel conçoit vis-à-vis de la théorie ondulatoire tient à ce que si la lumière était constituée de molécules, celles-ci devraient être éjectées avec des vitesses différentes par le soleil, par exemple. La vitesse d'une molécule devrait probablement être liée à sa couleur. Il en résulterait une dispersion des vitesses au cours de la propagation et donc une dispersion des couleurs, ce qui est en contradiction avec l'observation.

XIII.2. Diffraction et Interférences.

Fresnel développe une théorie analytique de la diffraction dans son Mémoire couronné par l'Académie des Sciences. Le système ondulatoire conduit à des formulations analytiques compliquées, certes en accord avec l'expérience, mais que Fresnel tente aussi de justifier d'un point de vue plus philosophique : il écrit en introduction de son Mémoire

Cit. La nature ne s'est pas embarrassée des difficultés d'analyse ; elle n'a évité que la complication des moyens. Elle paraît s'être proposé de faire beaucoup avec peu : c'est un principe que le perfectionnement des sciences physiques appuie sans cesse de preuves nouvelles. §1.

Mais, si ce principe général de la philosophie des sciences physiques ne conduit pas immédiatement à la connaissance de la vérité, il peut néanmoins diriger les efforts de l'esprit humain, en l'éloignant des systèmes qui rapportent les phénomènes à un trop grand nombre de causes différentes, et en lui faisant adopter de préférence ceux qui, appuyés sur le plus petit nombre d'hypothèses, sont les plus féconds en conséquences.

Sous ce rapport, le système qui fait consister la lumière dans les vibrations d'un fluide universel a de grands avantages sur celui de l'émission. Il permet de concevoir comment la lumière est susceptible de recevoir tant de modifications diverses. §2-3.

Jusqu'à Fresnel, coexistent une théorie de l'émission héritée de Newton et une théorie ondulatoire encore incomplète. La théorie ondulatoire repose essentiellement sur les travaux de Huygens et Young, ce dernier étant contemporain de Fresnel. Huygens avait introduit la notion de sources secondaires, chaque point de l'espace atteint par une onde se comportant lui-même comme le centre d'émission d'une onde sphérique. La justification apportée par Huygens pour concevoir l'onde primaire comme l'enveloppe des ondes secondaires était heuristique ; de plus elle ne permettait pas de rendre compte de la diffraction. D'autre part cette théorie ne donnait pas d'explication des couleurs ni ne rendait compte de ce qui allait être nommé phénomènes de polarisation. Ses succès pour expliquer la biréfringence étaient en partie oubliés. Young a découvert le principe des interférences de la lumière. L'onde

envisagée par Young est périodique et sa longueur d'onde rend compte de la couleur. Mais l'explication de la diffraction par Young est incomplète.

Fresnel va commencer par mettre ses pas dans ceux de Young, n'ayant pas connaissance des travaux de ce dernier. Il n'y aura accès que tardivement par F. Arago et sera tributaire de son propre frère pour la traduction. Les rapports avec Young seront un peu tendus dans un premier temps. En réponse au second mémoire de Fresnel adressé par F. Arago à Young, ce dernier répond :

Cit. Mais je ne peux totalement adhérer à votre expression ... suivant laquelle ce mémoire puisse être « considéré comme la démonstration de la doctrine des interférences : » car ni moi ni les rares personnes familières avec mes écrits n'y ont trouvé un simple fait *nouveau* de la moindre importance⁶⁷ ... *Le Dr young à F. Arago, 12 janvier 1817.*

Piqué au vif, Fresnel aura toujours le souci que justice lui soit rendue concernant l'originalité de ses travaux en Angleterre. En réponse à une métaphore de Young, Fresnel écrit :

Cit. Cependant, entre nous, je ne suis pas persuadé de la justesse de ce mot spirituel par lequel vous vous compariez à un *arbre* et moi à une *pomme* que cet arbre aurait produite : j'ai la conviction intérieure que la pomme aurait poussé sans l'arbre, car les premières explications que je me suis données des phénomènes de la diffraction et des anneaux colorés, des lois de la réflexion et de la réfraction, je les ai tirées de mon propre fonds, sans avoir lu votre ouvrage ni celui de Huyghens. *A. Fresnel au Dr Young, 26 novembre 1824.*

Young veillera à une certaine reconnaissance des travaux de Fresnel. Il contribuera à ce que lui soit décerné un prix prestigieux, la *médaille du comte de Rumford*, que Fresnel recevra peu avant de mourir prématurément, en 1827.

Dans le premier mémoire qu'il adresse à l'Académie des Sciences le 15 octobre 1815, Fresnel relate des observations précises. Il perce un très petit trou dans un écran opaque et utilise une lentille de très courte focale pour réaliser un « point lumineux ». Ne disposant pas de lentille suffisamment convergente, il dépose une goutte de miel sur le trou par lequel entre la lumière solaire (il utilisera plus tard un héliostat pour suivre le soleil). Il place un fil de l'ordre de 1mm de large sur le trajet de la lumière et observe l'ombre portée. Afin de pouvoir suivre l'évolution des franges dans les meilleures conditions, il les observe directement à l'aide d'une lentille de courte focale qui lui sert de loupe. Il place au foyer objet de la loupe un réticule réalisé à partir de fils très fins placés sur un cadre. Ce réticule lui sert à mesurer la distance entre les franges. Il peut ainsi suivre les franges de 2.8cm de l'obstacle à plusieurs mètres de celui-ci. Il s'intéresse tout d'abord aux franges qui se forment à l'extérieur de l'ombre géométrique, dans la partie éclairée, et qui sont les plus aisées à observer. En suivant l'évolution d'une de ces franges en fonction de la distance du fil au micromètre, il remarque que celle-ci ne décrit pas une ligne droite.

Son intérêt se porte alors sur les franges à l'intérieur de l'ombre :

⁶⁷ But I cannot fully adopt your expression ... that this memoir may be « considéré comme la démonstration de la doctrine des interférences : » for neither I nor any of those few who were acquainted with what I have written can find a single *new* fact in it of the least importance ...

Cit. Je me suis longtemps arrêté aux franges extérieures, qui sont les plus faciles à observer, sans m'occuper des franges intérieures. Ce sont celles-ci qui m'ont enfin conduit à l'explication du phénomène.

J'avais déjà collé plusieurs fois un petit carré de papier noir sur un côté du fil de fer dont je me servais dans mes expériences, et j'avais toujours vu les franges de l'intérieur de l'ombre disparaître vis-à-vis de ce papier : mais je ne cherchais que son influence sur les franges extérieures et je me refusais en quelque sorte à la conséquence remarquable où me conduisait ce phénomène. Elle m'a frappé dès que je me suis occupé des franges intérieures, et j'ai fait sur-le-champ cette réflexion : puisque en interceptant la lumière d'un côté du fil on fait disparaître les franges intérieures, le concours des rayons qui arrivent des deux côtés est donc nécessaire à leur production. §15. p.17. *Premier mémoire sur la diffraction.*

VIDÉO

Cette remarque avait déjà été faite par Young, comme le soulignera F. Arago dans son rapport sur le mémoire de Fresnel, couronné par l'Académie des Sciences. Fresnel en tire la conclusion suivante :

Cit. A l'extérieur les franges sont produites par le croisement des rayons partant du point lumineux et des bords du fil, et dans l'intérieur de l'ombre elles proviennent du croisement des rayons infléchis de chaque côté par les bords du fil. J'ai considéré le point lumineux, et les deux bords du fil, comme des centres d'ondulation régulière, et les intersections de leurs cercles devaient me donner la position des franges. §16.

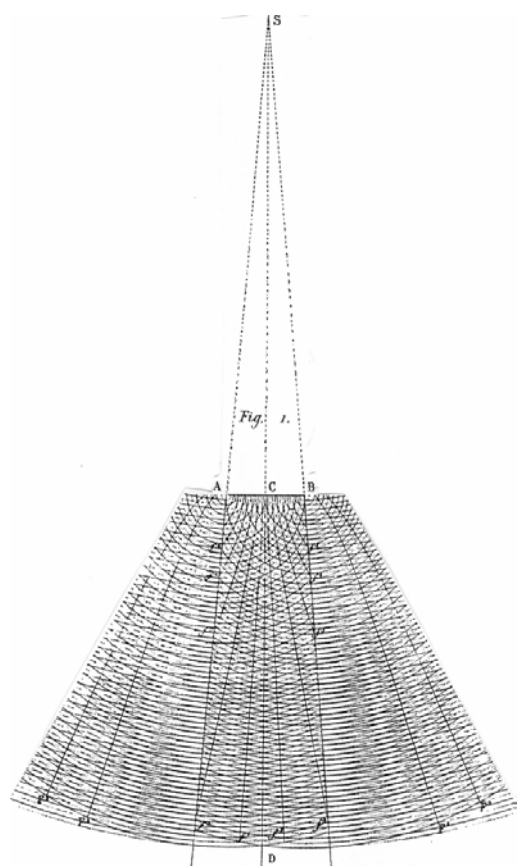
Les cercles auxquels fait référence Fresnel correspondent à l'intersection avec le plan de la figure d'ondulations sphériques émises dans l'espace par les points. Or les intersections de deux cercles se font suivant des branches d'hyperbole « dont les foyers sont le point lumineux et un des bords du fil, pour les franges extérieures ». L'emplacement des franges prédit par l'équation cartésienne de cette hyperbole en fonction des différents paramètres (la largeur de l'obstacle, la distance du fil au point lumineux et à l'écran) s'accorde très bien au relevé des observations. Pour certaines mesures, elle dépasse cependant assez largement la précision théorique du micromètre, mais Fresnel met l'écart observé sur le compte d'une mauvaise observation entre les limites du rouge et du violet dont il se sert pour déterminer la position des franges, car les franges sont colorées, puisqu'il travaille avec la lumière du soleil. Il préconise l'utilisation d'une lumière d'une seule couleur pour réaliser des observations ultérieures. Il reste que l'écart atteint $1/5^{\text{ème}}$ de mm par rapport à la propagation rectiligne des franges. Cette valeur est très petite, mais bien supérieure à la précision de $1/40 mm$ du micromètre. Quant aux franges intérieures, le calcul analytique montre en première approximation que « la distance entre les franges intérieures est indépendante de celle du fil au point lumineux, et c'est ce que confirme l'expérience ». Là encore, la valeur prédite semble en bon accord avec l'expérience.

Fresnel donne le schéma explicatif suivant (*cf.* fig. ci-dessous). Il y est visible que les concavités des franges sont tournées vers l'intérieur pour les franges extérieures et vers l'extérieur pour les franges intérieures et « on voit par l'inspection même de la figure pourquoi l'ombre contient d'autant plus de franges intérieures qu'on la reçoit plus près du fil. ». Fresnel situe en fait l'endroit précis de la naissance des franges au voisinage des bords de l'obstacle :

Cit. Lorsque j'ai observé les franges jusqu'à leur naissance, à l'aide d'une forte loupe, elles m'ont paru partir des bords du corps qui portait ombre ; mais cela tenait, sans doute, à l'extrême petitesse de l'intervalle qui les en séparait ; car, d'après la théorie même que j'ai adoptée, le bord du corps est le foyer et non pas le sommet des hyperboles suivant lesquelles les franges se propagent ; en sorte que la première frange, par exemple, en est éloignée à sa naissance de la longueur d'une ondulation.
Lettre de Fresnel à Arago. 3 décembre 1815.

Cependant il observe que, pour rendre compte des franges extérieures, il faut que les ondulations émises par le bord de l'obstacle correspondant et l'ondulation directe rayonnée par le point source soit décalées d'une demi-ondulation l'une par rapport à l'autre. C'est ce dont rend compte le schéma ci-dessous :

Cit. La frange extérieure du premier ordre étant donnée par l'intersection de deux cercles, dont l'un a pour centre le point lumineux et l'autre le bord du fil, et dont les origines sur le rayon tangent sont à une demi-ondulation l'une de l'autre, *il faut en conclure que la réflexion a changé d'une demi vibration les ondulations qui ont pour centre le bord du fil ; autrement elles seraient d'accord dans l'endroit même où se trouve la partie la plus sombre de la frange.* §33.



La terminologie de « réflexion » indique une réflexion de nature un peu particulière, qui se fait dans toutes les directions, et qui s'assimilerait plutôt à un processus de diffusion par les bords de l'obstacle.

Fresnel donne une interprétation possible pour justifier ce décalage d'une demi-ondulation :

Cit. Pour compléter cette théorie des vibrations, il serait aussi bien nécessaire d'expliquer comment les rayons changent d'une demi-ondulation en éprouvant l'inflexion. Je serais assez porté à croire que dans l'inflexion et la réflexion ce sont les molécules⁶⁸ mêmes des corps qui reproduisent les mouvements vibratoires imprimés par les rayons incidents. Cette manière d'envisager le phénomène conduirait peut-être à son explication.

Il termine son mémoire par les explications des phénomènes de réflexion et de réfraction dans le cadre de la théorie ondulatoire, examinée en vertu de l'accord ou du désaccord des vibrations incidentes. L'accord des vibrations conduit aux lois observées pour ces phénomènes. A propos de la réfraction, il écrit :

Cit. Je tire de cette théorie une conséquence absolument opposée à Newton : c'est que la marche de la lumière est plus lente dans le verre que dans l'air, suivant le rapport du sinus de réfraction à celui d'incidence ; car il faut admettre que chaque vibration de la lumière dans le verre s'accomplit dans le même intervalle de temps que chaque vibration dans l'air, autrement il y aurait discontinuité ou discordance entre les ondulations qui précèderaient et celles dont elles seraient suivies. §42.

et que :

Cit. Une conséquence remarquable de ce principe, c'est que le chemin que suit la lumière en se réfractant est celui qui l'amène le plus promptement possible d'un point pris dans l'air à un point pris dans le verre. [Fermat, Leibniz]. § 44.

Finalement, il laisse paraître son futur projet :

Cit. Cette théorie des vibrations et de l'influence des rayons les uns sur les autres, qui lie déjà tant de phénomènes séparés dans celle de Newton, ne doit-elle pas conduire à la véritable explication de la polarisation ?

Le mémoire de Fresnel commençait par une critique en règle de la théorie Newtonienne de l'émission et plus particulièrement de la théorie des accès. Il se termine par une explication unifiée de divers phénomènes par la théorie des *interférences* entre rayons lumineux, donnant une première tentative pour inclure le phénomène de diffraction au sein de ces phénomènes d'interférences.

Fresnel précise en quoi réside cette *influence* des rayons les uns sur les autres et dans quelles conditions le phénomène est observable :

Cit. On conçoit aisément, en effet, que deux ondulations qui se croisent sous un petit angle doivent se contrarier et s'affaiblir lorsque les nœuds dilatés des unes répondent aux nœuds condensés des autres, et se fortifier mutuellement, au contraire, lorsque leurs mouvements sont en harmonie ; c'est ce qu'amène sans doute le croisement des rayons à l'extérieur de l'ombre comme dans son intérieur. Lorsqu'on éclaire les corps par un point lumineux, les ondulations partent d'une même source ; les points d'accord

⁶⁸ Une autre alternative eût été que ce soient les particules d'éther présentes dans le corps qui donneraient naissance à l'onde diffusée ou réfléchi. Par des arguments qualitatifs, Fresnel attribue la contribution notable à la génération de ces ondes aux molécules au voisinage de la surface des corps. De telles considérations le conduiront à énoncer les lois de la réflexion en fonction de la polarisation de la lumière incidente.

et de discordances se trouvent toujours sur les mêmes lignes : le phénomène est constant, et peut être aperçu. La même chose n'a plus lieu lorsque les ondulations qui se rencontrent proviennent de deux sources différentes ; car s'il n'y a aucune dépendance entre les deux vibrations, l'instant du départ d'un système d'onde ne sera pas lié à l'instant du départ des ondes voisines, puisque la cause quelconque qui les engendre n'opère pas des changements simultanés dans les deux points lumineux ; dès lors les lignes d'accord et de discordance varieront de place continuellement, et l'œil n'aura plus que la sensation d'une lumière uniforme ; c'est ce qui a sans doute empêché pendant si longtemps de connaître l'influence que des rayons lumineux exercent les uns sur les autres. §6. *Second mémoire sur la diffraction. 23 octobre 1815.*

Les expériences précises menées par Fresnel visent en fait à confirmer ce qu'il conçoit d'un point de vue théorique. Ainsi écrit-il :

Cit. Car, je dois le dire, ce n'est point l'observation mais la théorie qui m'a conduit à ce résultat que l'expérience a ensuite confirmé. Des anomalies m'avaient bien fait soupçonner auparavant que ces franges [de diffraction] ne se propageaient pas suivant une ligne droite, mais je pouvais attribuer d'aussi légères différences à l'inexactitude de mes observations. *Lettre de Fresnel à Arago. 12 novembre 1815.*

Les observations font cependant finalement douter Fresnel de l'hypothèse suivant laquelle les centres d'ondulation sont localisés sur les bords de l'obstacle et le font revenir sur sa première intuition:

Cit. En cherchant la cause de cette différence [écarts entre les franges] entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience, quelques réflexions et observations nouvelles m'ont fait douter de l'exactitude d'une hypothèse dont j'étais parti pour calculer mes formules : que le centre d'ondulation de la lumière réfléchie était toujours au bord même du corps opaque, ou, ce qui revient au même, que la lumière infléchie ne pouvait provenir que des rayons qui ont touché sa surface.

Ce doute est attisé par l'expérience suivante : plus la lumière passe par une fente étroite, plus la zone éclairée au delà de la fente est large. Fresnel commente :

Cit. L'analogie m'a conduit à supposer que, dans l'expérience ordinaire du diaphragme, la lumière infléchie ne provient pas seulement de celle qui a rasé les biseaux, mais encore des rayons qui en sont passés à des distances sensibles. Car enfin, lorsque l'ouverture est très étroite, l'intervalle clair du milieu étant très large, la petite quantité de rayons qui ont touché les bords, ainsi répandue dans un grand espace, ne pourrait produire qu'une teinte extrêmement faible, au milieu de laquelle on devrait distinguer une ligne brillante tracée par le pinceau des rayons directs. Il n'en est pas ainsi cependant, et la teinte blanche paraît d'une intensité à peu près uniforme dans un espace beaucoup plus grand que l'ombre géométrique du diaphragme ; elle s'affaiblit ensuite, mais par degrés, jusqu'aux bandes obscures du 1^{er} ordre.

VIDÉO

Fresnel envisage désormais que chaque point de l'éther atteint par une vibration lumineuse se comporte lui-même comme le centre d'une vibration secondaire car « à la vérité, à chaque

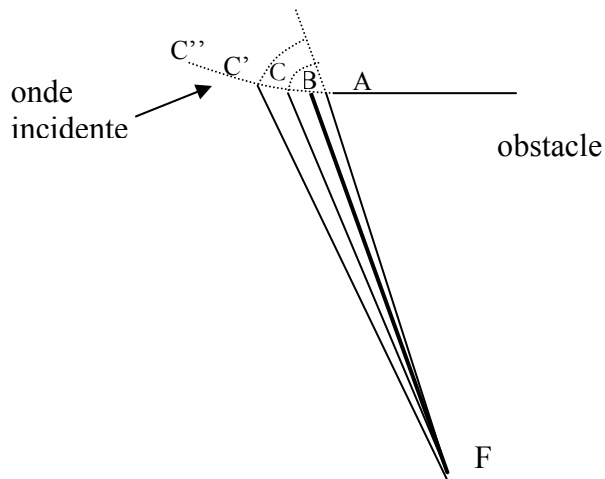
point de l'espace où l'éther s'est condensé il presse et tend à se dilater dans tous les sens ». Dans un milieu homogène, les mouvements latéraux se compensent et le mouvement rétrograde est annulé par l'impulsion initiale dans une direction privilégiée. Ne subsiste alors qu'un mouvement de l'onde dans la direction initiale. Le principe est énoncé de manière qualitative. Voici comment Fresnel exprime sa conception de l'éther, le milieu qui sert à propager les ondes lumineuses :

Cit. Dans le système des ondulations, où la lumière n'est autre chose que les vibrations d'un fluide universel agité par les mouvements rapides des particules des corps lumineux, il faut considérer chaque particule comme exécutant toujours, pendant quelques instants, une série nombreuse d'oscillations semblables avant de s'arrêter, ou de changer de nature de vibration, c'est-à-dire, supposer une certaine persistance de mouvement dans les centres d'ébranlement, comme on l'observe de tous les corps élastiques qui, après avoir été tirés de l'état de repos, n'y reviennent jamais instantanément... Nous supposerons donc sur chaque rayon lumineux une succession nombreuse et même indéfinie d'ondulations semblables [...]. On conçoit que la durée de chaque oscillation d'une particule éclairante, et par conséquent la longueur des ondulations qu'elle produit dans l'éther, doivent varier en raison inverse du degré d'intensité des forces auxquelles cette particule est soumise dans l'instant que l'on considère, et qui tendent à la ramener à sa position d'équilibre. Ainsi une même particule éclairante peut produire successivement des ondes de différentes longueurs, ou des rayons de diverses couleurs ... §1. Note XII (G).

Et il définit ainsi le principe de Huygens :

Cit. ...on peut donc dire que l'agitation de l'éther dans un point quelconque d'une onde lumineuse est égale à la résultante de toutes les vibrations qu'y enverraient, en agissant isolément, toutes les parties de la même onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures. Les mouvements obliques, que nous considérons ici, n'ont pas réellement lieu dans le fluide, parce que les ébranlements générateurs étant contigus et simultanés s'influencent dès l'origine, et que leurs pressions transversales se font équilibre. Mais ils naissent aussitôt que l'on isole par la pensée les éléments de l'onde génératrice ; car, quoique les vitesses imprimées soient toutes dans le même sens et parallèles à la normale, il est clair que les condensations et les raréfactions, qui ont lieu dans chaque élément supposé isolé, tendent à se propager dans toutes les directions, et que, s'il n'y a pas de mouvement rétrograde, cela tient uniquement à ce que les dilatations en arrière se trouvent exactement compensées par les vitesses imprimées en avant, mais que l'ébranlement doit se répandre dans toute la demi-sphère en avant, avec des intensités variables selon l'obliquité des rayons par rapport à la direction des vitesses imprimées. La loi de ces variations serait sans doute très difficile à déterminer par l'analyse. Heureusement qu'on peut, sans la connaître, tirer déjà beaucoup de conséquences du principe que nous venons d'exposer, dont la première idée est due à Huyghens. §1. Note XII (G).

Ainsi si l'on place un obstacle dans la course de l'onde, les points atteints par la vibration dans le voisinage du bord de l'obstacle envoient de la lumière dans toutes les directions. La théorie alors formulée par Fresnel n'est pas encore analytique et il développe une argumentation qualitative, basée sur la notion de « rayons efficaces » pour décrire les phénomènes de diffraction suivant le schéma suivant :



Les points C, C', C'' appartiennent à l'onde sphérique incidente à l'instant où elle arrive sur l'obstacle dont le bord est A. Ces points sont construits géométriquement : soit F un point à l'intérieur de l'ombre géométrique où l'on désire connaître l'éclairement. Fresnel augmente le trajet FA d'une demi-vibration, dans le prolongement de FA, et trace le cercle de centre F et de rayon FA plus une demi-ondulation. Soit C le point correspondant sur l'onde incidente. En augmentant successivement FA dans des proportions successives d'une demi-ondulation, il obtient les points C', C'' ...

Cit. Alors toutes les vibrations qui partiront de l'arc CC' dans cette direction oblique seront en discordance complète avec les vibrations partant des points correspondants de AC. Mais toutes celles qui prennent naissance sur CC' sont déjà très affaiblies par celles de l'arc suivant C'C'', et ne peuvent produire probablement une diminution de plus de moitié dans les mouvements ondulatoires qui émanent de AC : excepté cet arc extrême, chaque partie de l'onde directe se trouve comprise entre deux autres qui détruisent les rayons obliques qu'elle tend à produire. C'est donc le milieu B de l'arc AC qui doit être considéré comme le centre principal des ondulations qui se font sentir au point F.... ainsi le rayon BF qui part du milieu de cet arc, est presque exactement la moyenne entre les deux rayons extrêmes CF et AF. On voit que le rayon efficace BF, et par conséquent le chemin parcouru par la lumière infléchie, sera plus long d'un quart d'ondulation que le chemin compté à partir du bord même du corps AG. §38. *Second Mémoire sur la diffraction.*

Cette théorie des rayons efficaces semble à Fresnel en accord avec les observations. Pour les franges à l'extérieur de l'ombre, les rayons efficaces provenant de part et d'autre de l'obstacle ont une différence d'une demi-ondulation pour une frange sombre. Quant aux franges à l'intérieur de l'ombre, les différences d'une demi-ondulation de part et d'autre des bords de l'obstacle se compensent et tout se passe comme dans la version précédente de la théorie.

Les pensées de Fresnel atteignent leur maturité dans le nouveau Mémoire sur la diffraction qu'il adresse en réponse à un prix proposé au concours par l'Académie. Son mémoire sera couronné. Le micromètre dont dispose Fresnel lui permet désormais une précision de $1/100^{\text{ème}}$ de *mm* dans la mesure des positions relatives des franges. Il réalise ses observations avec une lumière « d'une seule couleur », comme il en avait vu la nécessité dans son premier mémoire, en filtrant la lumière solaire à l'aide d'un verre de vitrail particulier, que lui avait remis Arago. Il lui semble hors de doute que des écarts sensibles se font désormais sentir entre les

positions des franges, aussi bien extérieures qu'intérieures, prévues par sa théorie et celles observées. Il jette les bases de sa nouvelle interprétation :

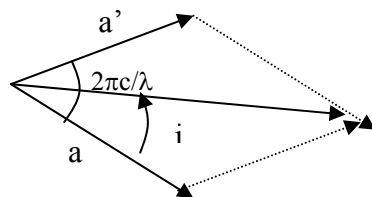
Cit. ... je vais faire voir maintenant qu'on peut en [les phénomènes de diffraction] donner une explication satisfaisante et une théorie générale dans le système des ondulations, sans le secours d'aucune hypothèse secondaire, et en s'appuyant seulement sur le principe de Huyghens et sur celui des interférences, qui sont l'un et l'autre des conséquences de l'hypothèse fondamentale [hypothèse ondulatoire]. § 33.

Ainsi le principe de Huygens se complète-t-il en envisageant les interférences de toutes les sources secondaires entre elles. Il justifie tout d'abord plus précisément le grand nombre d'oscillations « à peu près égales » que peut accomplir une particule éclairante dans l'éther :

Cit. ... il suffit de supposer que sa densité est beaucoup plus grande que celle du fluide dans lequel elle oscille. C'est ce qu'on devait déjà conclure de la régularité des mouvements planétaires au travers de ce même fluide, qui remplit les espaces célestes.

En supposant une force de rappel de la molécule vibrante proportionnelle à l'amplitude, ce qui est toujours faisable en première approximation, et en appliquant la seconde loi de Newton, il obtient l'expression analytique d'une vibration : $u = a \sin [2\pi(t-x/\lambda)]$. a est l'amplitude de la vibration, t le temps dont l'origine est prise comme « celle du mouvement », λ la longueur d'onde de « l'ondulation lumineuse », x est la distance entre du point atteint par la vibration au point source du mouvement. Il est atteint à l'instant ultérieur x/λ par l'onde émise par le point source à l'instant t .

Fresnel donne la règle d'addition de deux vibrations d'amplitudes respectives a et a' provenant de deux chemins différant de la distance c . Il ramène en fait l'addition des deux « vitesses des molécules éthérées », les vibrations $u = a \sin [2\pi(t-x/\lambda)]$ et $u' = a' \sin [2\pi(t-(x+c)/\lambda)]$, à la somme de « deux forces » d'intensité a et a' faisant un angle $2\pi c/\lambda$ entre elles. Il s'agit d'une addition que l'on qualifierait de vectorielle :



On obtient ainsi la résultante $A \sin [2\pi(t-x/\lambda) - i]$ avec $A = (a^2 + a'^2 + 2aa' \cos(2\pi c/\lambda))^{1/2}$ et i est défini par les relations $a + a' \cos(2\pi c/\lambda) = A \cos i$ et $a' \sin(2\pi c/\lambda) = A \sin i$.

Les vibrations s'additionnent donc comme des forces pour Fresnel. Dans les règles d'addition des forces, celles-ci sont décomposées en deux composantes « rectangulaires » ce qui se traduit pour les vibrations en une décomposition sur la direction d'une vibration et sur une autre en quadrature. C'est ce principe que Fresnel applique à la diffraction.

Il considère l'onde arrivant sur l'obstacle. Il ne mène pas le calcul depuis la source elle-même, mais choisit cette configuration comme une situation donnée. Il le justifie ainsi :

Cit. En prenant l'onde, au contraire, au moment où elle arrive en A, les éléments du calcul sont très simples, parce que toutes ses parties ont encore la même intensité, et

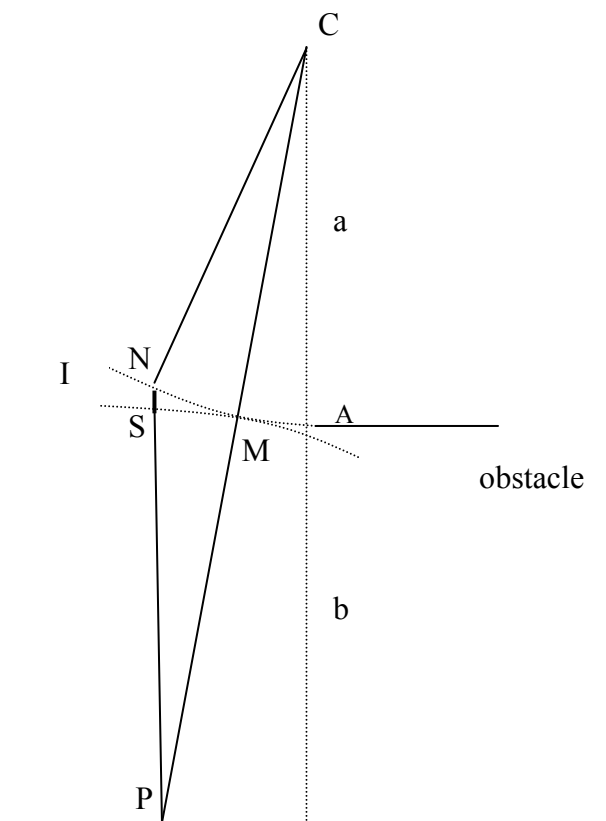
qu'en outre les ondes élémentaires qui en émanent ne peuvent plus éprouver d'altération de la part du corps opaque.

Si l'on voulait suivre l'onde depuis la source, « il faudrait déterminer l'effet produit par l'interposition du corps AG sur chacune des ondes élémentaires émanées ... ». Il suffit donc d'évaluer la différence de chemin entre deux rayons provenant de deux sources « émanées » par l'onde au point d'observation, conformément au schéma suivant :

Le calcul repose sur la différence de longueur entre le trajet direct CMP du rayon pour arriver en P où a lieu l'observation et le trajet CNP où NP est le rayon émané par une source infinitésimale sur l'onde incidente. Cela revient à estimer la petite différence NS entre les deux sphères tangentes en M et centrées respectivement sur le point source et le point d'observation. Or cette distance s'exprime en fonction du carré de la distance z de la petite source en N à M. Elle s'exprime par $\frac{1}{2} z^2(a+b)/ab$. Ainsi, pour la « composante que l'on considère, rapportée à l'onde émanée du point M », la contribution de la source en N d'extension dz est $dz \cos(\pi z^2(a+b)/ab\lambda)$ et pour sa composante « rapportée à une onde distante d'un quart d'ondulation de la première » par $dz \sin(\pi z^2(a+b)/ab\lambda)$.

En faisant décrire au point N toute la portion d'onde incidente, l'amplitude en P résulte d'un processus d'intégration. L'intensité lumineuse est donnée par le carré de l'amplitude lumineuse et vaut

$$I = [(\int dz \cos(\pi z^2(a+b)/ab\lambda))^2 + (\int dz \sin(\pi z^2(a+b)/ab\lambda))^2]$$



Les valeurs de ces intégrales sont calculées pour un certain nombre de points par Fresnel, qui applique son calcul aux cas usuels des expériences. Ainsi dans le calcul de la distance entre

les franges extérieures dans le cas de l'ombre d'un fil, Fresnel trouve un coefficient numérique 1.873 qui vient se substituer au coefficient 2 que lui donnait sa précédente théorie. L'écart est petit, mais là encore, significatif vis-à-vis de la précision du micromètre. Désormais, les prévisions théoriques et les observations s'accordent à $1/100 \text{ mm}$ pour des dizaines de mesures.

Poisson, qui fut rapporteur avec Arago du Mémoire de Fresnel, fit la remarque que les formules analytiques de Fresnel prévoyaient un point lumineux dans l'ombre d'un petit disque opaque. C'est ce que Fresnel confirmera expérimentalement. La controverse avec Poisson perdurera cependant.

VIDÉO

Fresnel invitera Poisson à rendre publique cette controverse de manière à ce que les objections soient débattues. Fresnel ne voudra pas remettre en cause une intuition qui l'a guidé vers d'importantes découvertes ; Poisson s'en tiendra à ses considérations mécaniques. Poisson montre que dans le calcul de Fresnel, il faut également tenir compte d'un facteur d'amplitude des oscillations qui est inversement proportionnel à la longueur d'onde. Le facteur numérique $1/\lambda$ apparaît. Poisson y voit un problème pour la théorie ondulatoire, dont Fresnel rendra compte qualitativement.

Fresnel précise à quelles conditions doit satisfaire la source lumineuse dans son extension spatiale pour que le phénomène de diffraction soit observable :

Cit. Jusqu'à présent j'ai supposé que toutes les ondes émanaient d'un centre unique. Les points lumineux, dans les expériences de diffraction, sont toujours un assemblage d'une infinité de centres de vibrations, et c'est à chacun d'eux en particulier qu'on doit appliquer ce qui a été dit précédemment. Tant qu'ils sont peu éloignés les uns des autres, les franges qu'ils produisent coïncident sensiblement : mais les bandes obscures des uns se mêlent avec les bandes brillantes des autres à mesure qu'on augmente les dimensions du point éclairant, et elles finissent par s'effacer complètement. *XV(A). 1816.*

Fresnel a ainsi expliqué la diffraction sur la base d'un principe d'interférences, ou d'influence des rayons lumineux. Ses recherches le conduisent, avec F. Arago, à tenter des expériences d'interférences avec des rayons polarisés, par la réflexion sur une vitre ou la traversée d'un spath.

XIII.3. Lumière polarisée.

Fresnel relate ses premières observations :

Cit. J'avais essayé vainement de produire des franges au moyen de deux images d'un point lumineux devant lequel j'avais placé un rhomboïde de spath calcaire, malgré l'attention que j'avais eue de faire traverser au faisceau extraordinaire une plaque de verre, dont l'épaisseur était déterminée de manière à compenser à peu près la différence entre les nombres des ondulations formées dans le cristal par les rayons ordinaires et extraordinaires, en sorte qu'en l'inclinant légèrement je pouvais établir une compensation exacte. §3. *XV(A). 1816.*

Les tentatives pour améliorer le dispositif ne conduisent toujours pas à l'obtention de franges, et amènent Fresnel à la conjecture suivante :

Cit. Je commençai alors à soupçonner qu'il était possible que les deux systèmes d'ondes produites par la lumière dans les cristaux doués de la double réfraction n'eussent aucune influence l'un sur l'autre, ou du moins que leur action mutuelle ne pût avoir de résultat apparent. §4. XV(A). 1816.

Et la conclusion suit :

Cit. Ils [les rayons ordinaires et extraordinaires] ont été polarisés dans deux plans rectangulaires. Il faut donc en conclure que des rayons polarisés en sens contraires n'exercent pas l'un sur l'autre la même influence que les rayons non modifiés ou polarisés dans le même sens. §8. XV(A). 1816.

Fresnel s'appuie sur une autre expérience, utilisant une plaque de cuivre dans laquelle deux fines fentes parallèles ont été aménagées. C'est l'expérience des fentes d'Young. Il la modifie en plaçant deux fines lamelles issues d'une même substance biréfringente, derrière les fentes, de manière à ce que les axes des lames soient « dans des directions rectangulaires ». Quatre faisceaux sont alors a priori susceptibles d'interférer : les rayons ordinaires issus d'une lame avec les rayons extraordinaires issus de l'autre, et réciproquement, et au centre, un système de franges dû à la superposition au même endroit des faisceaux ordinaires entre eux et des faisceaux extraordinaires entre eux. Trois systèmes de franges devraient donc être visibles. Or Fresnel n'observe pas le système de franges intermédiaire : il en conclut que les rayons ordinaires issus d'une lame interfèrent avec les rayons extraordinaires issus de la lame dont l'axe est perpendiculaire à la première, mais que les rayons ordinaires (ou extraordinaires) ayant été polarisés rectangulairement n'interfèrent plus entre eux.

Plus que cela, il ne suffit pas de placer une troisième lame à 45° des deux autres et ainsi faire se recombinaison des polarisations dans un même plan, pour observer les franges. Il faut également les polariser à 45° *avant* la décomposition par les lames avec les axes rectangulaires.

Fresnel et Arago résument ainsi leurs expériences sur *l'influence des rayons de lumière polarisée* :

Cit. Les expériences que nous venons de rapporter conduisent donc en définitive aux conséquences suivantes :

1° Dans les mêmes circonstances où deux rayons de lumière ordinaire paraissent mutuellement se détruire, deux rayons *polarisés en sens contraires* n'exercent l'un sur l'autre aucune action appréciable.

2° Les rayons de lumière polarisés dans un seul sens agissent l'un sur l'autre comme les rayons naturels : en sorte que, dans ces deux espèces de lumières, les phénomènes d'interférences sont absolument les mêmes ;

3° Deux rayons *primitivement polarisés en sens contraires* peuvent ensuite être ramenés à un même plan de polarisation, *sans néanmoins acquérir par là la faculté de s'influencer* ;

4° Deux rayons *polarisés en sens contraires*, et ramenés ensuite à des polarisations analogues, s'influencent comme les rayons naturels, *s'ils proviennent d'un faisceau primitivement polarisé dans un seul sens* ;

VIDÉO

XIII.4. Une nouvelle théorie ondulatoire.

Ces faits demandent une interprétation théorique nouvelle. Ils demandent de savoir en quoi consiste plus précisément les phénomènes de polarisation, et derrière cette question se cache celle sur la nature de la lumière. Dans une première *Note* non datée, Fresnel émet prudemment une hypothèse : celle de la transversalité des vibrations lumineuses

Cit. Si les oscillations des molécules éthérées dans les ondes polarisées s'exécutaient perpendiculairement à la normale à l'onde, et seulement dans le plan de polarisation, il serait aisé de concevoir comment ce retournement des plans de polarisation produit une discordance complète entre des rayons qui ont parcouru des chemins égaux, ou, ce qui revient au même, qui diffèrent dans leur marche d'un nombre entier d'ondulations, puisqu'alors les oscillations transversales auraient lieu en sens contraires ... La même hypothèse expliquerait encore d'une manière très satisfaisante comment deux faisceaux lumineux polarisés à angle droit ne s'influencent pas, puisqu'alors leurs mouvements oscillatoires seraient toujours perpendiculaires entre eux.

Fresnel y met les formes en utilisant un conditionnel qui appuie le caractère très hypothétique de cette interprétation. Les théories ondulatoires de la lumière développées par Huygens, Young, et Fresnel se basaient jusqu'à présent sur une analogie avec le son, la lumière étant perçue comme une onde de compression dans un milieu, l'éther. Les variations de densité y accompagnent alors le rayon lumineux dans sa course. Dans l'hypothèse qu'émet Fresnel, le rayon lumineux n'indique plus que la direction du mouvement, et le signal lumineux correspond à une élongation transverse à cette direction.

Fresnel interprète les couleurs des lames cristallisées avec l'hypothèse de la transversalité des ondes lumineuses dans sa *Note sur le calcul des teintes que la polarisation développe sur les lames cristallisées*.

VIDÉO

Il revient sur l'hypothèse de la transversalité :

Cit. Nous sentîmes l'un et l'autre [Ampère] que ces phénomènes s'expliqueraient avec la plus grande simplicité, si les mouvements oscillatoires des ondes polarisées n'avaient lieu que dans le plan même de ces ondes. Mais que devenaient les oscillations longitudinales suivant les rayons ? Comment se trouvaient-elles détruites par l'acte de polarisation

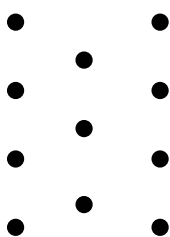
Ce n'est que depuis quelques mois qu'en méditant avec plus d'attention sur ce sujet, j'ai reconnu qu'il était probable que les mouvements oscillatoires des ondes lumineuses s'exécutaient uniquement suivant le plan de ces ondes, pour la lumière directe comme pour la lumière polarisée. §10. XXII. Mai 1821.

Fresnel est relativement isolé. Comment concevoir raisonnablement la propagation d'une onde transverse dans un fluide infiniment subtil ? Il faudrait qu'il soit aussi infiniment rigide,

et par conséquent doué de propriétés mécaniques antagoniques. Fresnel précise qu'un tel modèle transverse apparaît, de manière vague, chez Young :

Cit. Je dois dire ici qu'un article d'une lettre de M. Young, en date du 29 avril 1818, qui m'avait été communiqué par M. Arago, a contribué à me faire douter de l'existence des oscillations longitudinales. M. Young concluait des propriétés optiques des cristaux à deux axes, découvertes par M. Brewster, que les ondulations de l'éther pourraient ressembler à celles d'une corde tendue d'une longueur indéfinie, et se propager de la même manière.

Cependant, il semble que Young considère cette interprétation comme une commodité de représentation, mais ne cherche pas à la justifier par les propriétés mécaniques du milieu⁶⁹. Fresnel propose un mécanisme de propagation d'onde transverses dans un fluide, suivant le schéma ci-dessous :



Les particules d'éther sont ici dans une configuration de repos correspondant à l'absence de lumière. Elles sont équidistantes, rangées par files, et soumises à des forces répulsives mutuelles. Dans ces conditions :

Cit. ... si l'on dérange un peu la file intermédiaire en la faisant glisser sur elle-même, mais seulement d'une quantité très petite par rapport à l'intervalle de deux molécules consécutives, et qu'ensuite on la laisse libre, chacun de ses points matériels reviendra vers sa première situation ... et oscillera de part et d'autre comme un pendule qui a été écarté de la verticale.

Ce modèle n'est pas pleinement satisfaisant. Poisson examine les hypothèses mécaniques de propagation d'ondulations dans les fluides, et établit qu'une particule vibrant dans un fluide ne peut générer des ondes telles que celles que Fresnel utilise.

Poisson écrit en guise de conclusion à une lettre adressée à Fresnel le 6 mars 1823:

Cit. La théorie de l'émission et celle des ondulations présentent toutes deux de grandes difficultés ; le temps et les travaux futurs des physiciens et des géomètres finiront peut-être par lever tous les doutes et éclaircir entièrement la question ; mais je crois qu'on peut assurer dès à présent que si la seconde théorie est la vérité, ce n'est certainement pas pour les raisons qu'on a données jusqu'ici pour l'appuyer, et pour expliquer les phénomènes de l'optique.

Le modèle d'éther élaboré permet cependant à Fresnel de poursuivre ses investigations. Il en déduit alors en quoi consiste l'acte de polarisation de la lumière :

⁶⁹ note de E. Verdet, a), p.635, tome I

Cit. Il résulte de mon hypothèse sur la génération des ondes lumineuses qu'un rayon émanant d'un seul centre d'ébranlement se trouve polarisé suivant un certain plan, à un instant déterminé. Mais, un instant après, la direction du mouvement change, et avec elle le plan de polarisation ; et ces variations se succèdent aussi rapidement que les perturbations des vibrations de la particule éclairante ; en sorte que, lors même qu'on pourrait séparer la lumière qui en émane de celle des autres points lumineux, on n'y reconnaîtrait sans doute aucune apparence de polarisation. Si l'on considère maintenant l'effet produit par la réunion de toutes les ondes qui émanent des différents points d'un corps éclairant, on sentira qu'à chaque instant, et pour un point déterminé de l'éther, la résultante générale de tous les mouvements qui s'y croisent aura une direction déterminée, mais que cette direction variera d'un instant à l'autre. Ainsi la lumière directe peut être considérée comme la succession rapide de systèmes d'ondes polarisés suivant toutes les directions. D'après cette manière d'envisager les choses, l'acte de polarisation ne consiste plus à créer ces mouvements transversaux, mais à les décomposer suivant deux directions rectangulaires invariables, et à séparer les deux composantes l'une de l'autre ; car alors, dans chacune d'elles, les mouvements oscillatoires s'opéreront toujours suivant le même plan.

Fresnel remarque en outre que cette hypothèse de la transversalité des ondes lumineuses ne remet pas en cause son interprétation de la diffraction.

XIII.5. L'entraînement de l'éther par les corps en mouvements.

Le milieu de propagation des vibrations lumineuses, le « fluide universel », l'éther, avait déjà causé quelque souci à Fresnel. Comment rendre compte des propriétés de l'éther vis-à-vis des corps en mouvements ? Est-il entraîné par le corps en mouvement ou bien ne subit-il aucun effet d'entraînement ?

A ce titre le phénomène de l'aberration de la lumière des étoiles, découvert par Bradley, avait beaucoup préoccupé Fresnel. Dans la théorie corpusculaire, dite de l'émission, il est facile de concevoir l'aberration. La vitesse propre des corpuscules se compose avec la vitesse de la Terre sur son orbite pour donner une résultante inclinée d'un certain angle avec la direction d'origine (*cf* §X.1.). On donne souvent l'analogie des gouttes de pluie qui tombent verticalement par rapport à la voie d'un chemin de fer, mais que l'on voit tomber avec une certaine inclinaison par la fenêtre d'un train en mouvement.

Pour expliquer ce phénomène dans le cadre de la théorie ondulatoire, il faut faire l'hypothèse que le milieu de propagation des ondes lumineuses, l'éther, n'est pas entraîné de manière sensible par la Terre et que dans l'observation avec une lunette astronomique, l'éther passe librement, ou quasi-librement, à travers la Terre et le corps de la lunette. Ainsi un « courant d'éther » doit traverser les corps. Si l'éther était totalement entraîné par les corps en mouvement, il partagerait le mouvement de l'observateur, et la lumière se propagerait toujours de la même manière pour cet observateur : il n'y aurait pas de modulation annuelle dans la direction d'observation d'une étoile, ce qui est contraire au phénomène de l'aberration. Au contraire, dans l'hypothèse d'un éther libre, non entraîné par le mouvement de la Terre, c désignant la vitesse⁷⁰ de la lumière dans l'éther et v celle de la Terre sur son orbite, la lumière se propage⁷¹ à la vitesse $c-v$ à une période donnée de l'année et $c+v$ six mois

⁷⁰ Notation vectorielle : grandeur et sens de propagation.

⁷¹ Dans le cadre de cette théorie « classique ».

plus tard, pour l'observateur terrestre; ce qui rend compte du phénomène d'aberration. Fresnel écrit⁷² à ce propos :

Cit. ... je n'ai pu, jusqu'à présent du moins, concevoir nettement ce phénomène qu'en supposant que l'éther passe librement au travers du globe, et que la vitesse communiquée à ce fluide subtil n'est qu'une petite partie de celle de la terre, n'en n'excède pas le centième par exemple. *Fresnel à Arago.*

Il s'intéresse à nouveau au problème de l'entraînement de l'éther suite à une demande de F. Arago. Ce dernier avait montré que la réfraction de la lumière dans un prisme ne dépendait pas de manière sensible du mouvement du prisme. La lumière venait d'une étoile et le prisme, fixé sur la lunette, était entraîné par le mouvement de la Terre. Dans le cadre de la théorie corpusculaire, les couleurs peuvent s'expliquer par une différence de masse ou une différence de vitesse des corpuscules lumineux. Aussi la composition des vitesses des corpuscules lumineux associés aux différentes couleurs avec la vitesse de la Terre sur son orbite devrait entraîner une modification du spectre observé. Arago déduisait de ses observations des contraintes strictes sur les différences de vitesse des corpuscules, ce qui portait préjudice à la théorie corpusculaire. Comment interpréter l'observation dans le cadre de la théorie ondulatoire ? C'est la question posée par Arago à Fresnel. Fresnel écrit :

Cit. Si l'on admettait que notre globe imprime son mouvement à l'éther dont il est enveloppé, on concevrait aisément pourquoi le même prisme réfracte toujours la lumière de la même manière, quel que soit le côté d'où elle arrive. *p. 628.*

La lumière aurait dans ce cas toujours la même vitesse⁷³ pour l'observateur et il n'y aurait pas d'effet à attendre. Cette explication n'est cependant pas acceptable car elle serait en totale contradiction avec l'hypothèse d'un éther libre, nécessaire à l'interprétation de l'aberration. Fresnel envisage alors la possibilité d'un entraînement partiel de l'éther. Dans un premier temps, afin de s'appuyer sur une argumentation raisonnable, il précise qu'un « courant d'éther » est envisageable et il fait la distinction entre un « courant d'éther » et l'absence de « lumière » :

Cit. Le mouvement lumineux n'est point un courant, mais une vibration de l'éther. On conçoit que les petites ondes élémentaires dans lesquelles la lumière se divise en traversant les corps peuvent, dans certains cas, se trouver en discordance lorsqu'elles se réunissent, en raison de la différence des chemins parcourus ou des retards inégaux qu'elles ont éprouvés dans leur marche ; ce qui empêche la propagation des vibrations, ou les dénature de façon à leur ôter la propriété d'éclairer, ainsi que cela a lieu d'une manière bien frappante dans les corps noirs ; tandis que les mêmes circonstances n'empêcheraient pas l'établissement d'un courant d'éther. *p. 629.*

Cette hypothèse est étayée par l'extrême porosité qui caractérise la matière, laissant entrevoir la possibilité d'un courant d'éther à travers tous les corps. Fresnel écrit alors :

⁷² Les citations suivantes sont extraites de la lettre de Fresnel à Arago intitulée *Sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique. Annales de Chimie et de physique, t. IX, p.57. Septembre 1816*, figurant dans le *Tome II des Oeuvres complètes* d'Augustin Fresnel.

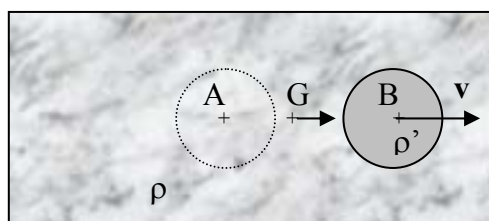
⁷³ En module. Le sens dépend bien évidemment de l'endroit d'où vient la lumière.

Cit. L'opacité de la terre n'est donc pas une raison suffisante pour nier l'existence d'un courant d'éther entre ses molécules, et l'on peut la supposer assez poreuse pour qu'elle ne communique à ce fluide qu'une très-petite partie de son mouvement. *P. 629.*

Cette justification vise à rendre compte de l'aberration dans le cadre de la théorie ondulatoire. Fresnel avance que le problème est différent dans le cas des corps transparents dont les propriétés diffèrent des corps opaques. Il envisage que l'éther ne subit alors qu'un entraînement partiel par un corps transparent en mouvement. Il lui faut maintenant quantifier ce point de vue. Il tente donc de relier les propriétés de l'entraînement de l'éther avec les propriétés physiques de ces corps. L'idée autour de laquelle s'articule son raisonnement est la suivante : dans le mouvement d'un corps dans l'éther, il ne faut prendre en compte que le déplacement de l'excédent de « densité » du corps par rapport au milieu environnant, un peu à la manière du poids apparent d'un corps dans un fluide, qui en vertu de la poussée d'Archimède, est égale à son poids dans le vide auquel on soustrait le poids du volume de fluide déplacé par le corps. Fresnel écrit, en revenant au cas du prisme entraîné :

Cit. Si ce prisme entraînait avec lui tout l'éther qu'il contient, la totalité du milieu qui sert de véhicule aux ondes partageant ainsi le mouvement terrestre, la vitesse des ondes lumineuses serait celle qu'elles devraient avoir dans le milieu supposé immobile, augmentée de la vitesse de la terre⁷⁴. Mais le cas dont il s'agit est plus compliqué ; ce n'est qu'une partie de ce milieu qui est entraînée par notre globe, celle qui constitue l'excès de sa densité sur l'éther environnant. L'analogie indique que, lorsqu'une partie seulement du milieu se déplace, la vitesse de propagation des ondes ne doit être augmentée que de la vitesse du centre de gravité du système. *p. 631.*

Le schéma ci-dessous tente de rendre compte de cette analogie. Une balle homogène de densité ρ' se déplace à la vitesse \mathbf{v} dans un fluide immobile de densité ρ . Soit A le centre de la balle à un instant t_0 et B la position de ce centre à un instant Δt ultérieur. La balle a laissé derrière elle un volume de fluide égal au sien, avec la densité ρ . Considérons le système formé par la masse de fluide en A et l'excédent de masse dû à l'excédent de densité $\rho' - \rho$ par rapport au fluide en B. La masse totale de ce système est égale à celle de la balle. Soit G le centre de gravité de ce système.



Par rapport à un point O dans le fluide immobile, la définition du barycentre conduit $\mathbf{OG} = (\rho/\rho')\mathbf{OA} + [(\rho' - \rho)/\rho']\mathbf{OB}$. A étant fixe et B se déplaçant à la vitesse \mathbf{v} , on en déduit la relation sur les vitesses : $\mathbf{v}_G = [(\rho' - \rho)/\rho']\mathbf{v}$. Cette vitesse correspond à la variation de vitesse des ondes entraînées par le mouvement du corps transparent, dans la théorie de Fresnel.

Fresnel précise sa théorie dans le cas où la lumière se propage dans le même sens que le prisme (p.632) :

Cit. Cela posé, le milieu prismatique étant en équilibre de tension avec l'éther environnant (je suppose, pour plus de simplicité, que l'expérience est faite dans le

⁷⁴ par rapport à l'éther environnant

vide), on peut considérer le retard de la lumière dans le prisme lorsqu'il est immobile, comme résultant uniquement d'une plus grande densité ; ce qui donne le moyen de déterminer le rapport de densité des deux milieux ; car on sait qu'il doit être inverse de celui des carrés des vitesses de propagation des ondes. Soient d et d' les longueurs d'ondulation de la lumière dans l'éther environnant et dans le prisme ; Δ et Δ' les densités de ces deux milieux ; on a donc la proportion :

$$d^2/d'^2 = \Delta'/\Delta$$

d'où

$$\Delta' = (d^2/d'^2) \Delta$$

et par conséquent

$$\Delta' - \Delta = \Delta [(d^2 - d'^2)/d'^2]$$

Telle est la densité de la partie mobile du milieu prismatique. Si l'on représente par l l'espace que parcourt la terre pendant la durée d'une oscillation lumineuse, le déplacement du centre de gravité de ce milieu pendant le même intervalle de temps, que je prends pour unité, ou la vitesse de ce centre de gravité, sera :

$$l[(d^2 - d'^2)/d'^2]$$

Par conséquent la longueur d'ondulation d'' dans le prisme emporté par la terre sera égale à

$$d' + l[(d^2 - d'^2)/d'^2]$$

Fresnel a attribué à la « densité de la partie mobile du milieu prismatique » la vitesse barycentrique du système, ce qui fait intervenir un rapport Δ/Δ' et donc un rapport d'^2/d^2 en facteur, qui le conduit à l'expression mentionnée. La longueur d'onde d'une ondulation est égale au produit de sa vitesse dans le milieu considéré par la période de la vibration (indépendante du milieu). En notant n l'indice de réfraction du prisme, c la vitesse de la lumière dans le vide et c_i la vitesse de la lumière dans le référentiel immobile, v la vitesse de la terre, avec $d' = d/n$, on peut ré-écrire cette expression sous la forme d'une relation de composition des vitesses :

$$c_i = c/n + v.(1 - 1/n^2)$$

dans le milieu transparent en mouvement à la vitesse v par rapport à l'éther extérieur immobile. Ainsi la loi de composition des vitesses n'est pas une simple loi d'additivité galiléenne⁷⁵. Nous reviendrons sur l'intérêt de cette formule en décrivant l'expérience d'entraînement de l'éther réalisée par Fizeau en 1851.

Ces considérations permettent à Fresnel de rendre compte des conclusions d'Arago, dans le cadre de la théorie ondulatoire, en attribuant un entraînement partiel à l'éther par les corps transparents en mouvement, tout en rendant compte de l'aberration par le fait que l'éther passe librement à travers les corps opaques comme la Terre ou le corps de la lunette qui sert à l'observation. L'entraînement partiel de l'éther dans les corps transparents en mouvements permet de aussi de prévoir que dans le cadre d'une expérience proposée par Bosovich, dans laquelle le phénomène d'aberration est observé avec une lunette remplie d'un milieu beaucoup plus réfringent que l'air, de l'eau par exemple, l'angle d'aberration reste inchangé. Dans la théorie de Fresnel, cela est dû encore à l'entraînement partiel de l'éther par le liquide.

⁷⁵ Elle correspond à l'approximation de la loi de composition des vitesses de la relativité restreinte d'Einstein dans un calcul approché au premier ordre en v/c .

XIII.6. Conclusion sur les travaux de Fresnel.

Les travaux de Fresnel ne se limitent pas à ceux qui viennent d'être décrits. Fresnel établit que la coloration des lames minces cristallisées, examinées par Biot et Arago, se ramène à un phénomène d'interférences. Son interprétation sera la source d'une vive polémique avec Biot, qui avait postulé des propriétés spécifiques des molécules lumineuses pour expliquer ces phénomènes. Fresnel recevra le support d'Arago qui toutefois n'accepte pas l'hypothèse de la transversalité des ondes lumineuses. Fresnel montrera que du verre ordinaire peut acquérir des propriétés de biréfringence en le soumettant à des contraintes mécaniques, ce qui lui permet d'étayer l'explication de la biréfringence par un alignement privilégié des molécules dans la substance. Il prédit, à l'aide de son modèle de la polarisation, quelles doivent être les proportions de lumières réfléchies par un dioptre suivant la polarisation de la lumière incidente et l'angle d'incidence, par des considérations énergétiques et mécaniques.

Fresnel était ingénieur de formation. Après avoir été élève à l'Ecole Polytechnique, et les Mines, il s'était retrouvé chargé de l'amélioration de l'état des routes. Il s'acquittait consciencieusement de son devoir, suivant les propres mots d'Arago et effectuait ses recherches dans le temps qu'il avait de libre. A la fin de sa vie, il sera nommé au service des Phares et ses derniers travaux porteront sur l'amélioration de l'éclairage des phares. Il y remplacera les réflecteurs paraboliques par des lentilles à échelon et travaillera aussi sur la source lumineuse, avec Arago, de manière à disposer de plus de lumière avec moins de carburant. Son système, testé sur le phare de Cordouan en Gironde sera généralisé à l'ensemble des phares. Fresnel était atteint de tuberculose. Il s'éteint le 14 juillet 1827.

XIV. Les vérifications expérimentales.

XIV.1. L'« expérience cruciale » de Léon Foucault.

Les travaux de Fresnel avaient considérablement étayés la théorie ondulatoire de la lumière, puisque Fresnel donnait une explication ondulatoire de la diffraction, de la réflexion partielle, et des couleurs des lames cristallisées qui venaient s'ajouter aux autres phénomènes de la lumière dont cette théorie rendait préalablement compte.

Aussi la théorie corpusculaire n'était-elle plus vraiment dans une situation de rivaliser avec la théorie ondulatoire, et les détracteurs de la théorie corpusculaire, à l'image de Poisson, ne pouvaient que soulever des problèmes inhérents à la description de l'éther, le milieu de propagation de la lumière. Cependant, les deux théories ne s'affrontaient encore que sur un plan théorique : la simplicité et la généralité de l'explication qu'une théorie pouvait donner en regard des différents phénomènes observés.

Il y avait cependant une prédiction contradictoire et vérifiable expérimentalement que faisait chacune des théories, et qui avait opposé en leur temps des gens comme Descartes, Fermat, Leibniz, Newton ... : la théorie *ondulatoire* prévoyait que *la vitesse de la lumière dans l'eau est plus petite que dans l'air*, alors que l'interprétation mécaniste corpusculaire faisait la prédiction inverse.

En regard de ces prédictions, il peut sembler qu'une *expérience cruciale*⁷⁶ consiste à mesurer les vitesses de la lumière respectivement dans l'eau et dans l'air et de les comparer.

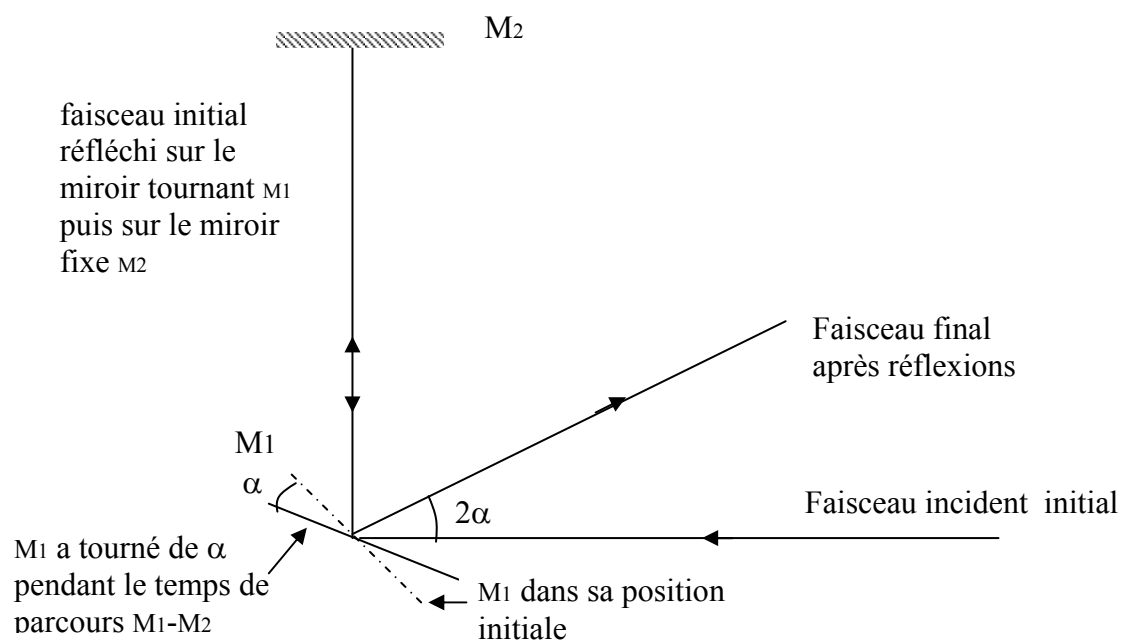
⁷⁶ Le concept d'expérience cruciale est délicat. Une expérience n'est cruciale qu'en regard de la validité ou non de certaine hypothèses sur lesquelles les théories sont construites, et ne permet pas forcément de trancher sur la *nature* même du phénomène considéré. Ainsi, l'interprétation corpusculaire n'est invalidée par l'expérience de Foucault que dans sa formulation classique. Si l'expression classique de la quantité de mouvement classique est

A une époque où la technologie permet de visualiser les effets du temps de propagation de la lumière à l'échelle du laboratoire, l'expérience *cruciale* peut être envisagée.

La proposition de cette expérience avait été faite par F. Arago, qui avait alors encouragé Hippolyte Fizeau et Léon Foucault sur cette voie. Initialement amis, les deux chercheurs allaient se lancer dans une concurrence acharnée pour réaliser l'expérience.

Léon Foucault (1819-1868) parvient à sa réalisation quelques semaines avant H. Fizeau, et en fait le compte rendu lors de la séance du 08 mai 1850 de l'Académie des Sciences.

L'idée sur laquelle repose l'expérience est la suivante : lorsqu'un faisceau lumineux tombe sur un miroir, il est réfléchi avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Si ce faisceau réfléchi opère lui-même un aller-retour sur un autre miroir orthogonal au faisceau, et que pendant le temps que met la lumière à revenir sur le premier miroir, celui-ci a tourné, la direction du faisceau résultant ne coïncidera plus avec sa direction d'origine, conformément au schéma ci-dessous.



Foucault réalise alors le dispositif suivant :

Cit. Un faisceau de lumière directe, pénétrant par une ouverture carrée, traverse presque aussitôt un réseau, présentant onze fils verticaux de platine au millimètre ; de là il se dirige vers une excellente lentille achromatique à long foyer ... après avoir traversé la lentille, le faisceau tombe avant sa convergence en foyer sur la surface du miroir tournant, et, entraîné d'un mouvement angulaire double de celui du miroir, il forme dans l'espace une image du réseau qui se déplace avec une grande rapidité. Dans une portion assez limitée de son trajet, cette image rencontre la surface d'un miroir concave ayant son centre de courbure sur le centre de figure et sur l'axe de rotation du miroir tournant, et pendant tout le temps qu'elle se promène à sa surface, la lumière qui a concouru à la former rebrousse chemin et vient retomber sur le réseau

remplacée par sa formulation quantique, il n'y a plus de problèmes : la vitesse dans l'eau est la même pour le corpuscule photon et l'onde associée : l'expérience n'a plus rien de crucial en regard de la théorie corpusculaire.

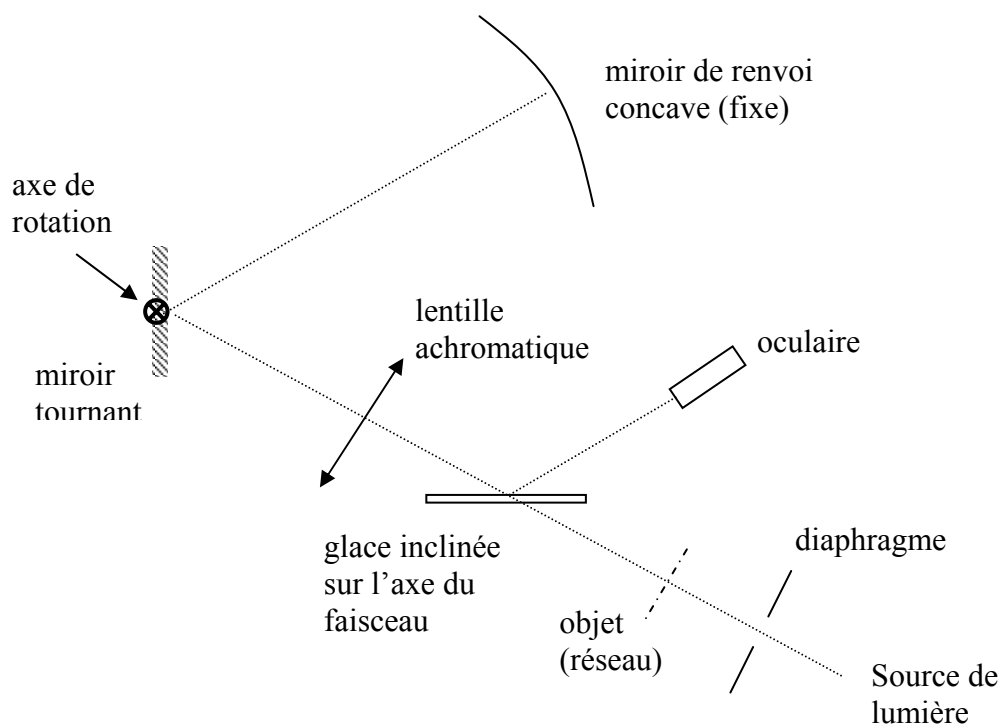
lui-même en une image d'égale grandeur. Pour observer cette image sans masquer le faisceau d'origine, on place obliquement sur le faisceau, une glace parallèle [...] et l'on observe avec un puissant oculaire les images déjetées sur le côté.

Le miroir tourne, et l'image ne se forme qu'une fois par tour. Cependant, pour une rotation stabilisée du miroir, supérieure à 30 tours par seconde, la persistance rétinienne fait que l'observateur a l'impression de voir toujours la même image « et l'image apparaît absolument calme ».

Le phénomène observé est alors le suivant :

Cit. ... la lumière qui s'échappe entre les mailles du réseau n'y revient qu'après avoir subi sur le le miroir tournant deux réflexions séparées par la durée de son double parcours du miroir tournant au miroir concave. Or, si le miroir tourne très vite, la durée de ce va-et-vient, même dans une longueur restreinte de 4 mètres, ne peut passer pour nulle, et le miroir a le temps de changer sensiblement de position, ce qui se trahit par le déplacement de l'image formée par le rayon réfléchi au retour.

Le schéma ci-dessous illustre le dispositif utilisé :



Le point délicat du montage est la réalisation du miroir tournant susceptible d'atteindre des vitesses de rotation de 600 à 800 tours par seconde, de manière continue, stable, et de pouvoir mesurer cette vitesse de rotation.

La précision de la mesure de la position de l'image du réseau formée par le dispositif atteint 1/100 ème de millimètres. Foucault réalise une première mesure dans l'air. Il ne donne pas de valeur de la vitesse de la lumière, car son dispositif n'est alors pas assez précis pour prétendre à une détermination absolue de celle-ci.

Il relève aussi le déplacement de l'image du réseau lorsque la lumière ne s'est pas propagée dans l'air uniquement, mais dans une «colonne de ce liquide maintenu entre deux glaces dans un tube métallique conique». Il place ainsi un dispositif analogue à la première partie du

précédent, où la lumière traverse une colonne d'eau de 3 mètres avant de tomber sur la lentille achromatique. Il note alors que l'image est plus déviée, c'est-à-dire que la lumière a mis plus de temps pour parcourir un trajet équivalent dans l'eau :

Cit. ... j'ai déjà constaté, par deux observations successives, que la déviation de l'image après le parcours de la lumière dans l'air est moindre qu'après son parcours dans l'eau.

Pour ce faire, il a dû réaliser les expériences successivement et faire tourner le miroir à la même vitesse. Mais la détermination de la vitesse de rotation du miroir est assez heuristique. Aussi, Foucault réalise-t-il une « expérience confirmative » :

Cit. ... qui consistait à observer l'image formée en partie par la lumière qui a traversé l'air, et en partie par la lumière qui a traversé l'eau. Pour des vitesses faibles, les rayures de l'image mixte étaient sensiblement continues les unes aux autres, et par l'accélération du mouvement de rotation, l'image s'est transportée, et les rayures se sont rompues à la ligne de jonction de l'image aérienne et de l'image aqueuse ; les rayures de celles-ci prenant l'avance dans le sens de la déviation générale. De plus, en tenant compte des longueurs d'air et d'eau traversées, les déviations se sont montrées sensiblement proportionnelles aux indices de réfraction. Ces résultats accusent une vitesse de la lumière moindre dans l'eau que dans l'air, et confirment pleinement, selon les vues de M. Arago, les indications de la théorie des ondulations.

XIV.2. Les travaux d'Hippolyte Fizeau.

XIV.2.1 La mesure directe de la vitesse de la lumière.

Hippolyte Fizeau (1819-1896) réalise pour la première fois en 1849 une mesure directe de la vitesse de la lumière. La valeur obtenue rejoint celles que l'on pouvait déduire des mesures astronomiques réalisées par O.Roemer et J.Bradley. Fizeau expose sa méthode expérimentale devant l'Académie des Sciences au cours de la séance du 25 juillet 1849.

Cit. Je suis parvenu à rendre sensible la propagation de la lumière par une méthode qui me paraît fournir un moyen nouveau d'étudier avec précision cet important phénomène. Cette méthode est fondée sur les principes suivants :

Lorsqu'un disque tourne dans son plan autour de son centre de figure avec une grande rapidité, on peut considérer le temps employé par un point pour parcourir un espace angulaire très-petit, 1/1000 de la circonférence, par exemple.

Lorsque la vitesse de rotation est assez grande, ce temps est généralement très court ; pour dix et cent tours par seconde, il est seulement de 1/10000 et 1/100000 de seconde.

Si le disque est divisé à sa circonférence, à la manière des roues dentées, en intervalles égaux alternativement vides et pleins, on aura, pour la durée du passage de chaque intervalle par un même point de l'espace, les mêmes fractions très petites.

Pendant des temps aussi courts la lumière parcourt des espaces assez limités, de 31 kilomètres pour la première fraction, 3 kilomètres pour la seconde.

En considérant les effets produits lorsqu'un rayon de lumière traverse les divisions d'un tel disque en mouvement, on arrive à cette conséquence, que si le rayon, après son passage, est réfléchi au moyen d'un miroir et renvoyé vers le disque, de manière qu'il le rencontre de nouveau dans le même point de l'espace, la vitesse de propagation de la lumière pourra intervenir de telle sorte, que le rayon traversera ou

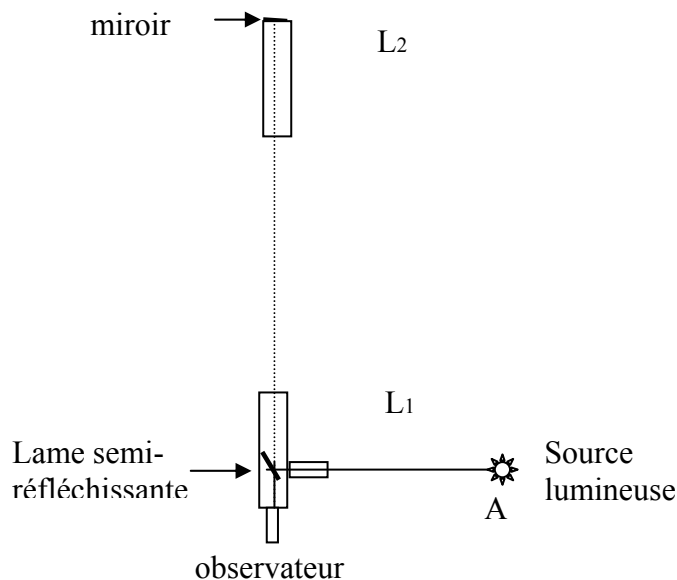
sera intercepté suivant la vitesse du disque et la distance à laquelle aura lieu la réflexion. *Compte rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences 1849.*

Le dispositif de renvoi de la lumière revêt alors l'aspect suivant :

Fizeau place deux lunettes astronomiques en regard, qui se visent mutuellement.

En A, la lumière d'une source très intense pénètre dans la lunette L_1 perpendiculairement à son axe. Une glace inclinée à 45° renvoie le faisceau dans l'axe de la lunette. Le faisceau émergent traverse l'objectif de la lunette L_2 , au foyer de laquelle Fizeau a placé un miroir.

La lumière est réfléchiée et parcourt un trajet analogue à celui de l'aller, entrant cette fois par l'objectif de L_1 . Elle est observée à l'oculaire de L_1 à travers la glace.



Les lunettes ont une ouverture de 6cm, car « la distance [entre les lunettes] peut être de 8 kilomètres sans que la lumière soit trop affaiblie ». Fizeau décrit l'image qui se forme à travers ce dispositif :

Cit. On voit alors un point lumineux semblable à une étoile, et formé par de la lumière qui est partie de ce point, a traversé un espace de 16 kilomètres, puis est revenue passer exactement par le même point pour parvenir à l'œil.

Le cœur de l'expérience est alors le suivant :

Cit. C'est sur ce point même qu'il faut faire passer les dents d'un disque tournant pour produire les effets indiqués ; l'expérience réussit très-bien, et l'on observe que, suivant la vitesse plus ou moins grande de la rotation, le point lumineux brille avec éclat ou s'éclipse totalement. Dans les circonstances où l'expérience a été faite, la première éclipse se produit vers 12,6 tours par seconde. Pour une vitesse double, le point brille de nouveau ; pour une vitesse triple, il se produit une deuxième éclipse ; pour une vitesse quadruple, le point brille de nouveau, et ainsi de suite.

La lunette L_1 est placée à Suresne sur la terrasse de la maison de Fizeau et L_2 sur la terrasse d'un ami à Montmartre à 8633 mètres de L_1 . La roue dentée comporte 720 dents. Fizeau écrit :

Cit. Ces premiers essais fournissent une valeur de la vitesse de la lumière peu différente de celle qui est admise par les astronomes. La moyenne déduite des 28 observations qui ont pu être faites jusqu'ici donne, pour cette valeur, 70948 lieues⁷⁷ de 25 au degré.

Ce qui correspond à une vitesse de 315364 km/s. Une détermination plus précise sera donnée par L. Foucault en 1862, avec la valeur de 298000 km/s.

XIV.2.2 Fizeau et l'entraînement de l'éther.

Hippolyte Fizeau poursuit ses investigations expérimentales sur la vitesse de la lumière. Après avoir réalisé la première mesure directe de celle-ci, et confirmé l'année suivante l'observation de Foucault suivant laquelle la lumière se propage moins vite dans l'eau que dans l'air, en proportion des indices de réfraction des milieux respectifs, Fizeau cherche maintenant à déterminer la vitesse de la lumière dans un milieu en mouvement. L'expérience réalisée est décrite dans les *Compte Rendu des séances de l'Académie des Sciences* du ... 1851. L'article s'intitule *Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur*. L'éther est le milieu de propagation des vibrations lumineuses de la théorie ondulatoire. Quand un corps se déplace, entraîne-t-il l'éther avec lui ? L'expérience proposée est destinée à trancher entre différentes situations envisageables. Fizeau écrit :

Cit. En effet, en l'absence de notions certaines sur les propriétés de l'éther lumineux et sur ses rapports avec la matière pondérable, il a fallu faire des hypothèses, et, parmi celles qui ont été proposées, il en est de plus ou moins probables, mais aucune qui puisse être considérée comme démontrée.

Ces hypothèses peuvent se réduire à trois principales. Elles se rapportent à l'état dans lequel on doit considérer l'éther qui existe dans l'intérieur d'un corps transparent :

Ou l'éther est adhérent et comme fixé aux molécules du corps, et partage, par conséquent, les mouvements qui peuvent être imprimés à ce corps ;

Ou bien l'éther est libre et indépendant, et n'est pas entraîné par le corps dans ses mouvements ;

Ou, enfin, par une troisième hypothèse, qui participe de l'une et de l'autre, une portion seulement de l'éther serait libre, l'autre portion serait fixée aux molécules du corps et partagerait seule ses mouvements.

Cette dernière hypothèse, que l'on doit à Fresnel, a été conçue dans le but de satisfaire à la fois au phénomène de l'aberration et à une expérience célèbre de M. Arago, par laquelle il avait été démontré que le mouvement de la Terre est sans influence sur la réfraction que la lumière des étoiles subit dans un prisme [...].

Si l'on suppose que l'éther est entraîné en totalité avec le corps, la vitesse de la lumière devra être augmentée de toute la vitesse du corps, le rayon étant supposé dirigé dans le sens du mouvement.

Si l'éther est supposé libre, la vitesse de la lumière ne sera nullement altérée.

⁷⁷ *Lieue de terre* ou *lieue commune* : vingt cinquième partie du degré terrestre comptée sur un grand cercle, soit 4,445 km. D'après le Dictionnaire Encyclopédique Larousse.

Enfin, si une partie seulement de l'éther est entraînée, la vitesse de la lumière sera augmentée, mais d'une fraction seulement de la vitesse du corps, et non pas de la totalité, comme dans la première hypothèse. Cette conséquence n'est pas aussi évidente que les précédentes, mais Fresnel a fait voir qu'elle peut être appuyée sur des considérations mécaniques très-probables.

Afin de disposer de mesures très précises, Fizeau réalise un dispositif interférentiel et reprend le montage qu'il avait utilisé pour la détermination de la vitesse absolue de la lumière. Son dispositif expérimental se présente comme suit :

Cit. Du foyer d'une lentille cylindrique, les rayons solaires pénétraient presque aussitôt dans la première lunette par une ouverture latérale très-voisine de son foyer. Une glace transparente, dont le plan faisait avec l'axe de la lunette un angle de 45 degrés, les envoyait par une réflexion dans la direction de l'objectif.

En sortant de l'objectif, les rayons, devenus parallèles entre eux, rencontraient une double fente, dont chaque ouverture correspondait à l'entrée de l'un des tubes. Un faisceau de rayon très-étroit pénétrait ainsi dans chaque tube, et le traversait dans toute sa longueur (1m,487).

Les deux faisceaux, toujours parallèles entre eux, atteignaient l'objectif de la seconde lunette, s'y réfractaient, et, par l'effet de cette réfraction, allaient se réunir à son foyer. Là ils rencontraient le plan réfléchissant d'un miroir perpendiculaire à l'axe de la lunette, et subissaient une réflexion qui les renvoyait en arrière vers l'objectif ; mais, par l'effet de cette réflexion, les rayons avaient échangé leurs route, de sorte que celui qui était à droite auparavant se trouvait à gauche après la réflexion, et réciproquement. Après avoir traversé de nouveau l'objectif et être ainsi redevenus parallèles entre eux, ils pénétraient une seconde fois dans les tubes ; mais, comme ils étaient intervertis, celui qui avait passé par l'un des tubes en allant, passait par l'autre tube au retour.

Après leur second trajet à travers les tubes, les deux faisceaux traversaient de nouveau la double fente, rentraient dans la première lunette et venaient interférer à son foyer en passant à travers la glace transparente. Là ils formaient par leur action mutuelle des franges d'interférence que l'on observait avec un oculaire portant des divisions à son foyer.

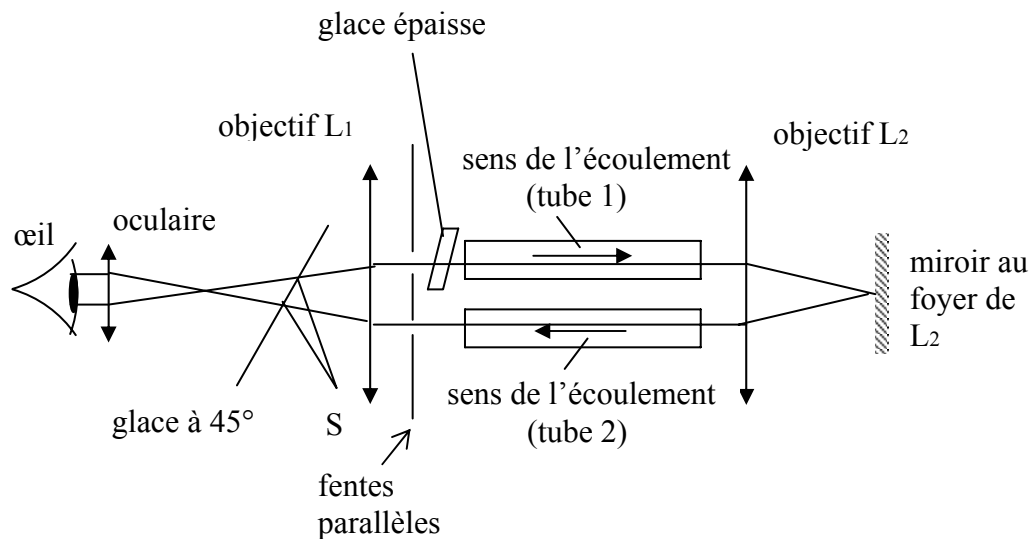
Il fallait que les franges fussent très-larges afin de pouvoir apprécier de petites fractions de la largeur d'une frange. J'ai trouvé que l'on obtient ce résultat, tout en conservant une grande intensité de lumière, en plaçant au devant de l'une des fentes une glace épaisse que l'on incline de manière à voir les fentes par l'effet de la réfraction, comme si elles étaient plus rapprochées qu'elles ne le sont en réalité...

Le double trajet de la lumière avait pour but d'augmenter la longueur parcourue dans le milieu en mouvement, et en outre de compenser entièrement l'influence d'une différence accidentelle de température ou de pression entre les deux tubes, d'où aurait pu résulter un déplacement des franges qui se serait mêlé au déplacement que le mouvement pouvait produire, et en aurait rendu l'observation incertaine...

Relativement au mouvement, on voit, au contraire, que les deux rayons sont soumis à des influences opposées.

Si l'on suppose, en effet, que dans le tube situé à droite, de l'eau coule vers l'observateur, celui des deux rayons qui viendra de la droite aura parcouru le tube dans le sens du mouvement, tandis que le rayon venant de la gauche l'aura parcouru dans un sens contraire à celui du mouvement.

Le schéma suivant essaie de rendre compte de ce dispositif :



La circulation du fluide se fait en sens inverse dans les tubes 1 et 2 placés derrière les deux fentes. Le circuit entre les tubes n'est pas représenté. Les fentes sont très séparées et sont larges. Fizeau introduit techniquement une glace à faces parallèles sur un des trajets de manière à observer un système de franges élargi. Cela ne modifie pas le décalage de la figure d'interférences qui est mesuré en unité d'interfrange.

Fizeau relate l'observation :

Cit. Lorsque l'eau est mise en mouvement, les franges sont déplacées, et, suivant que l'eau se meut dans un sens ou dans l'autre, le déplacement a lieu vers la droite ou vers la gauche.

Les franges sont déplacées vers la droite, lorsque l'eau est chassée en avant de l'observateur dans le tube situé à sa droite, et vers l'observateur dans le tube situé à sa gauche.

Les franges sont déplacées vers la gauche, lorsque le sens du courant, dans chaque tube, a lieu dans une direction opposée à celle qui vient d'être définie.

Il mesure précisément la déviation et montre qu'elle est très proche de ce que prédit la théorie de Fresnel :

Cit. En appelant déplacement simple celui qui se produit lorsque l'eau d'abord en repos vient à être mise en mouvement, et déplacement double, celui qui se produit lorsque le mouvement vient à être changé en un mouvement contraire, on a trouvé, par une moyenne déduite de dix-neuf observations assez concordantes, 0,23 pour le déplacement simple, ce qui donne 0,46 pour le déplacement double, la largeur d'une frange étant prise pour l'unité. La vitesse de l'eau était de 7m,069 en une seconde.

Ce résultat est ensuite comparé à ceux que l'on déduit par le calcul des diverses hypothèses relatives à l'éther.

Dans la supposition de l'éther entièrement libre et indépendant du mouvement des corps, le déplacement devrait être nul.

Dans l'hypothèse où l'éther serait uni aux molécules des corps, de manière à partager leurs mouvements, le calcul donne, pour le déplacement double, la valeur 0,92. L'observation a donné un nombre moitié plus faible, ou 0,46.

Dans l'hypothèse où l'éther serait partiellement entraîné, suivant la théorie de Fresnel, le calcul donne 0,40, c'est à dire un nombre très-voisin de celui qui a été trouvé par l'observation ...

Fizeau analyse encore les résultats de son expérience avec un courant d'air et montre qu'elle est en parfait accord avec la théorie de Fresnel : il n'y a pas de déplacement observable des franges dans ce cas. Le déplacement n'est sensible que pour des corps beaucoup plus réfringents que l'air, conformément à la théorie de Fresnel. Fizeau⁷⁸ conclut :

Cit. Le succès de cette expérience me semble devoir entraîner l'adoption de l'hypothèse de Fresnel, ou du moins de la loi qu'il a trouvée pour exprimer le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps ; car bien que cette loi se trouvant véritable, cela soit une preuve très-forte en faveur de l'hypothèse dont elle n'est qu'une conséquence, peut-être la conception de Fresnel paraîtra si extraordinaire, et, sous quelque rapport, si difficile à admettre, que l'on exigera d'autres preuves encore et un examen approfondi de la part des géomètres, avant de l'adopter comme l'expression de la réalité des choses.

⁷⁸ Les résultats de cette expérience sont d'une importance fondamentale. Leur interprétation sous-tend une théorie relativiste qui ne verra le jour qu'un demi-siècle plus tard. Pour une meilleure compréhension de ceci, voici une analyse de l'expérience de Fizeau au sens de la cinématique relativiste d'Einstein:

Soit c la vitesse de la lumière dans le vide. La vitesse de la lumière dans l'eau est alors c/n où n est l'indice de réfraction de l'eau. Soit v (prise positive vers l'observateur) la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le tube 2. La composition des vitesses de la relativité restreinte donne la vitesse de la lumière c_1 dans le référentiel de l'observateur (celui du laboratoire) en fonction de la vitesse c/n dans le référentiel de l'eau immobile, en translation à la vitesse v par rapport au laboratoire, par : $c_1 = [c/n + v]/[1 + v(c/n)/c^2]$. Comme $v \ll c/n$, une formule approchée au premier ordre en v/c de cette relation est $c_1 = c/n + v(1 - 1/n^2)$. La composition galiléenne des vitesses aurait conduit à l'expression $c_1 = c/n + v$.

Dans le cas où l'eau est immobile, le « chemin optique » δ le long du tube 2, défini par l'intégrale de la quantité ndl où dl est l'élément différentiel de longueur le long du tube, peut se mettre sous la forme $\delta = n^2/c \int (c/n) dl$. Dans le cas où l'eau est en mouvement, à la vitesse v par rapport à l'observateur, c/n doit être remplacé par l'expression de c_1 calculée précédemment. Il en résulte une différence de chemin optique $\Delta\delta = Lv(n^2-1)/c$ où L est la longueur du tube. Cette différence se cumule sur les deux trajets pour chacun des deux rayons et la différence de chemin optique entre les deux rayons qui interfèrent vaut 4 fois la quantité précédente. Cette différence de marche produit un déplacement de la figure d'interférences d'une quantité, exprimée en unité de distance entre les franges, égale à la variation de l'ordre d'interférences $\Delta p = 4 Lv(n^2-1)/c\lambda$ où λ est la longueur d'onde dans le milieu où se produit la différence de marche, qui vaut λ_0/n , où λ_0 est la longueur d'onde de la lumière dans le vide. L'expérience est réalisée avec la lumière solaire. On peut prendre comme longueur d'onde moyenne la valeur approximative de $0.55\mu\text{m}$. Avec $n=1.33$, en utilisant les données de H.Fizeau, on trouve un déplacement de la figure d'interférences égal à 0.19 interfrange conforme à la prédiction donnée par Fizeau (la différence tient à la détermination de la longueur d'onde à considérer).

Dans un vocabulaire post-einsteinien, on peut interpréter cette expérience en disant que la composition relativiste des vitesses se trouve validée au détriment de la composition galiléenne qui aurait conduit à un tout autre résultat. Dans les termes de Fizeau, l'éther est partiellement entraîné et non totalement entraîné. La formule de composition des vitesses utilisée par Fizeau repose sur l'hypothèse d'entraînement partiel de l'éther par Fresnel. La vitesse de la lumière dans l'eau en mouvement prédite par la théorie de Fresnel est précisément $c_1 = c/n + v(1 - 1/n^2)$ qui est la valeur approchée à l'ordre 1 en v/c de la théorie einsteinienne.

XIV.2.3. L'effet Doppler-Fizeau.

En 1842, le physicien autrichien **Johann Christian Doppler** (1803-1853) montre que la perception que nous avons d'un son⁷⁹ dépend du mouvement relatif par rapport à la source sonore. Il étend cette considération au cas de sources lumineuses. La théorie ondulatoire de la lumière explique les couleurs par des longueurs d'ondes particulières des vibrations lumineuses. Le changement affecte alors la longueur d'onde et modifie la couleur, pour Doppler. Il ne fait pas de prédiction quantitative et surestime l'effet du décalage en longueur d'onde en pensant pouvoir ainsi expliquer la couleur des étoiles par leur mouvement propre⁸⁰. H. Fizeau semble prédire indépendamment l'existence d'un effet qui affecte le son et la lumière en fonction des mouvements respectifs de la source et de l'observateur, et précise ce qui peut en être attendu.

Il fait la lecture d'un mémoire consacré à ce sujet le 23 décembre 1848 devant la *Société Philomatique*. Ce mémoire est repris dans le tome 19 des *Annales de Chimie et de Physique* de 1870 sous le titre *Des effets du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d'onde des rayons de lumière*. Fizeau y commence par s'intéresser au son :

Cit. Si l'on considère un corps sonore émettant un son toujours identique et continu, comme un tuyau d'orgue, par exemple, et si l'on suppose qu'on lui imprime un mouvement de translation rapide, le son émis présentera des modifications remarquables et dont il est facile de se rendre compte. L'air environnant ne participant pas au mouvement, les ondes sonores s'y propageront indépendamment du mouvement des corps vibrant : de sorte qu'en avant les ondes successives seront plus rapprochées, en arrière plus éloignées, à droite et à gauche aux mêmes distances que si le corps sonore était au repos ; alors un observateur placé dans ces diverses positions percevra des sons plus aigus s'il est en avant, plus graves s'il est en arrière. L'influence du mouvement sera donc de modifier le son émis, de manière qu'il présentera des tons plus aigus ou plus graves, suivant la direction dans laquelle il sera entendu...

On peut aussi considérer le cas inverse, celui où l'observateur serait en mouvement et le corps sonore fixe, cette supposition conduit à des conséquences semblables ; si l'observateur se meut vers le corps sonore, il rencontrera un plus grand nombre d'ondes dans le même temps que s'il était resté immobile ; s'il se meut en sens contraire, il en rencontrera moins : dans le premier cas le son sera devenu plus aigu, dans le second plus grave.

Fizeau cite plusieurs « témoignages » de l'existence de cet effet, et notamment

Cit. M. Scott Russel, à l'une des séances de l'Association britannique, a rapporté plusieurs observations faites sur les chemins de fer, lorsque l'observateur se meut avec une vitesse de 20 à 25 lieues à l'heure. M. Russel a remarqué que, lorsqu'on marche à la rencontre d'une machine qui fait entendre son sifflet de vapeur, le son paraît plus aigu que lorsque l'on marche dans un sens contraire.

Fizeau réalise un dispositif expérimental qui lui permet de mesurer ces variations. Il donne la relation suivante :

⁷⁹ sa fréquence

⁸⁰ cf. A. Cornu. *Annales du bureau des longitudes*, 1891.

Cit. Tous ces phénomènes du son dans ses rapports avec le mouvement soit du corps sonore, soit de l'observateur, peuvent être calculés au moyen des formules suivantes, dans lesquelles

n est le nombre de vibrations⁸¹,

n' le nombre de vibrations modifié par le mouvement⁸²,

V la vitesse du son,

v, v' les vitesses du corps sonore et de l'observateur ;

1° Lorsque le corps sonore est en mouvement,

$$n'/n = V / [V - v] ;$$

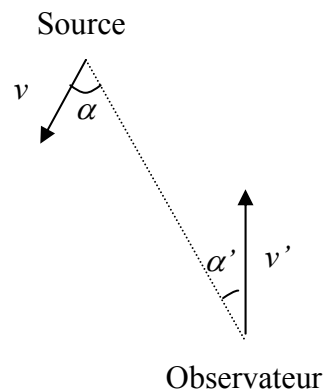
2° Lorsque l'observateur est en mouvement,

$$n'/n = [V + v'] / V$$

Le mouvement a lieu suivant la ligne qui joint la source et l'observateur, sinon, il faut tenir compte de facteurs de projections qui font intervenir les angles entre les vitesses respectives et cette direction. Fizeau donne alors la formulation générale suivante :

$$n'/n = [V + v' \cos \alpha'] / [V - v \cos \alpha]$$

On peut illustrer cette relation par le schéma suivant indiquant les situations relatives de la source et de l'observateur⁸³ :



Fizeau en vient à la lumière :

Cit. Ces considérations relatives aux ondes sonores peuvent être appliquées aux phénomènes lumineux, tels qu'on les envisage dans la théorie des ondulations, et l'on arrive ainsi à des conséquences curieuses et qui pourraient acquérir de l'importance⁸⁴ si l'expérience venait à les confirmer.

⁸¹ émises par la source sonore, pendant une durée donnée, que l'on peut prendre égale à une seconde par exemple.

⁸² reçues par l'observateur, pendant la même durée que celle considérée pour l'émission.

⁸³ Il faut supposer dans les expressions données par Fizeau que les vitesses v et v' sont comptées positivement lorsque les sources se rapprochent.

⁸⁴ Ce point est fondamental. L'effet dit « Doppler-Fizeau » est à la base de la plupart des découvertes majeures qui seront faites ultérieurement en astrophysique : vitesse propre des étoiles, expansion de l'univers, détection des planètes extrasolaires ...

Fizeau fait référence à la spectroscopie⁸⁵ qui a montré que le spectre des sources lumineuses est tel que

Cit. ... en général, le spectre présente une particularité importante, c'est qu'il n'est pas continu d'une extrémité à l'autre, mais interrompu par des raies brillantes ou obscures, dont quelques-unes sont très caractérisées et qui correspondent à des rayons d'une certaine longueur d'ondulation, qui possèdent une intensité très-différente de celle des autres. Sous un certain rapport, ces raies peuvent être comparées aux notes de la gamme, en ce que, comme celles-ci, elles caractérisent certaines longueurs d'ondulation que l'œil peut reconnaître aussitôt comme l'oreille reconnaît la longueur d'ondulation de tel son en le rapportant à telle note de la gamme.

Utilisant cette analogie, Fizeau fait la prédiction suivante :

Cit. Si l'on suppose un corps lumineux animé d'un mouvement de translation assez rapide pour que sa vitesse soit comparable à celle de la lumière, la longueur d'ondulation de tous les rayons élémentaires sera modifiée et deviendra plus courte ou plus longue, suivant que la lumière sera reçue dans la direction du mouvement ou dans la direction contraire. Considérée dans le spectre, cette modification se traduira par le phénomène suivant : chaque rayon, en vertu de sa nouvelle longueur d'ondulation, changera de déviation⁸⁶ et prendra la place du rayon qui possédait cette même longueur d'ondulation lorsque le corps lumineux était au repos ; tous les rayons se remplaceront ainsi les uns les autres, de sorte que les raies ne se trouveront plus aux mêmes places, mais seront toutes transportées vers le rouge ou vers le violet, suivant le sens du mouvement du corps lumineux. Les couleurs, au contraire, qui ne paraissent dépendre que de la longueur d'onde, n'éprouveront aucun déplacement⁸⁷.
Si l'on suppose l'observateur en mouvement, on arrive aux mêmes conclusions relativement à un déplacement des raies du spectre ...

La source de ces effets, qui nécessitent des vitesses importantes, sont à rechercher dans le domaine de l'astronomie :

Cit. La vitesse de la lumière étant énorme, ce genre d'effet ne peut être appréciable que dans le cas de vitesses très-considérables, comme celles des planètes dans leurs orbites, par exemple ; et, même dans ces circonstances, l'effet doit-il être encore très-petit ; mais comme il est probable qu'il y a des étoiles animées de mouvements plus

⁸⁵ Définition du terme *spectroscopie* : Etude du spectre des rayonnements émis, absorbés ou diffusés par les milieux matériels. Ce terme est étymologiquement limité à l'examen de la lumière visible à l'aide du récepteur oculaire. D'après le *Dictionnaire de Physique*.

⁸⁶ En traversant un prisme.

⁸⁷ Cette précision est importante. Elle distingue les effets du décalage prédit par Fizeau de ceux prédits par Doppler. Le spectre d'une étoile présente des raies d'émission ou d'absorption sur un fond continu, qui s'étend au delà du spectre visible. D'autre part les décalages envisagés par Fizeau sont faibles. Les longueurs d'ondes sont décalées en bloc et il n'en résulte pas d'effet notable sur la perception lumineuse par l'œil. Par contre, les raies se sont déplacées. C'est le relevé de leur position, par rapport à une position de référence au repos, qui permet de déterminer la vitesse de déplacement de la source. La connaissance de la position d'une raie au repos est rendu possible par le fait qu'une raie est propre à l'élément qui l'émet ou l'absorbe. Les systèmes de raies dus à un élément donné sont donc identifiables car ils caractérisent la « signature » de cet élément.

rapides que ceux des planètes, on peut espérer pour l'observation des circonstances favorables.

Fizeau donne les formules qui permettent de calculer les variations de longueur d'ondes :

$$(1) \quad \lambda'' = \lambda [(V - v)/V]$$

$$(2) \quad \lambda'' = \lambda [V/(V + v)]$$

« la première se rapportant au mouvement du corps lumineux, la seconde au mouvement de l'observateur ». λ est la longueur d'onde de la radiation émise par une source au repos par rapport à l'observateur et λ'' la longueur d'onde mesurée par celui-ci⁸⁸. V désigne ici la vitesse de la lumière.

Une nouvelle conception de la lumière émerge dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Elle s'opère au travers d'une synthèse avec les phénomènes électriques et magnétiques.

XV. La synthèse électromagnétique et la lumière.

La grande synthèse entre les phénomènes électro-magnétiques et optiques est l'œuvre de **James Clerck Maxwell** (1831-1879). Maxwell introduit notamment un nouveau terme dans les relations régissant les phénomènes électriques et magnétiques, qu'il nomme *courant de déplacement*. Ce terme rend possible l'existence d'ondes électromagnétiques auxquelles Maxwell réduira la lumière. Le travail de Maxwell constitue un tournant dans la physique du XIX^{ème} siècle. Il jette les bases de la physique moderne. Au sein même de ses travaux se dessine la rupture entre une vision mécaniste du monde, où l'analogie tient une part fondamentale, et une physique mathématique abstraite qui se dégage progressivement de cette vision. C'est ainsi que naît la *théorie des champs*, outil mathématique qui formalise les considérations géométriques et qualitatives de Faraday sur la notion de *lignes de champ*. Un *champ vectoriel* régit par des équations différentielles rend compte des propriétés de l'espace en tout point, en grandeur et en direction. Toutes les interactions électriques et magnétiques sont décrites par les quatre équations de Maxwell⁸⁹.

⁸⁸ On passe de l'expression donnée par Fizeau avec « les nombre de vibrations » n à celle avec les longueur d'ondes en écrivant que n est proportionnel à $1/\lambda$. La relation (1) donnée par Fizeau peut alors se mettre sous la forme connue $\Delta\lambda/\lambda = v/c$ où v est comptée positivement cette fois lorsque la source s'éloigne et où $\Delta\lambda = \lambda'' - \lambda$.

⁸⁹ Suivant les notations contemporaines, nous notons \mathbf{E} et \mathbf{B} les vecteurs champs électriques et magnétiques respectivement. Les *équations de Maxwell* (formulées sous cette forme contractée par Heaviside) s'expriment par :

$$\mathbf{rot} \mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t, \quad \mathbf{div} \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0, \quad \mathbf{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + (1/\epsilon_0 \mu_0) \cdot \partial\mathbf{E}/\partial t$$

\mathbf{j} est le vecteur densité de courant électrique, ρ la densité de charge électrostatique, ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide et μ_0 sa perméabilité magnétique. Les opérateurs *div* pour « divergence » et *rot* pour « rotationnel » représentent des combinaisons linéaires particulières des dérivées partielles par rapport aux variables spatiales. Un champ de vecteurs est entièrement déterminé par la connaissance de sa divergence et de son rotationnel en tout point de l'espace, moyennant la connaissance des conditions aux limites. La première relation traduit l'effet d'induction électromagnétique découvert par Faraday. La seconde traduit le théorème de Gauss de l'électrostatique. La troisième indique qu'il n'y a pas de « charge magnétique ». La première partie de la quatrième relation montre qu'un champ magnétique statique est engendré par un courant électrique (théorème d'Ampère). La seconde partie de cette relation traduit l'apport spécifique de Maxwell : elle montre qu'une variation du champ électrique dans le temps produit un champ magnétique. C'est le *courant de déplacement*. Il «symétrise» les quatrième et première relations et assure un couplage parfait entre les variations des champs dans le vide, traduisant ainsi la propagation d'ondes électromagnétiques.

XV.1. Maxwell, l'analogie, et les mathématiques.

Maxwell nourrit un certain nombre de doutes sur les représentations formelles des phénomènes physiques, qu'il exprime à diverses occasions. Comparant par exemple les présentations des travaux d'Ampère et de Faraday, il écrit dans son *Traité*⁹⁰ :

Cit. Les recherches expérimentales par lesquelles Ampère établit les lois de l'action mécanique entre courants électriques est l'une des réalisations scientifiques les plus brillantes.

L'ensemble, théorie et expérience, semble avoir surgi, totalement achevé, du cerveau du « Newton de l'électricité ». La forme est parfaite, d'une précision inattaquable, et le tout tient en une relation d'où tous les phénomènes peuvent être déduits, et qui doit toujours rester la formule fondamentale de l'électrodynamique.

La méthode d'Ampère, cependant, bien que présentée sous une forme inductive, ne nous permet pas de suivre l'évolution des idées qui l'ont guidé. Nous pouvons difficilement croire qu'Ampère ait réellement découvert la loi de l'action [entre courants] par les expériences qu'il nous décrit. Nous sommes amenés à soupçonner, ce qu'en fait il reconnaît lui-même, qu'il a découvert la loi par quelque procédé que nous ignorons, et qu'une fois qu'il en a établi une démonstration parfaite, il efface les traces de l'échafaudage par lequel il y est parvenu.

Faraday, au contraire, nous livre aussi bien ses expériences infructueuses que celles qui ont réussi, et ses premières idées aussi bien que celles qu'il a développées, et le lecteur, bien qu'inférieur à lui en pouvoir inductif, ressent une connivence, encore plus que de l'admiration, et est enclin à croire, que si l'opportunité lui en était donnée, il serait lui aussi un découvreur⁹¹ ...

Cette citation pourrait paradoxalement s'appliquer au double visage de la théorie de l'électromagnétisme, telle qu'elle fut conçue par Maxwell, et telle qu'elle est diffusée, y compris par Maxwell lui-même. Dans son traité d'électromagnétisme, à destination des étudiants, il efface quasiment toute trace de « l'échafaudage » qu'il a utilisé.

D'autre part, il se montre assez critique envers les différentes manières d'enseigner traditionnellement la physique, que ce soit par une approche purement expérimentale ou au

⁹⁰ Maxwell, J. C., *A Treatise on Electricity & Magnetism*, 1873, ré-dité par Dover.

⁹¹ The experimental investigation by which Ampère established the laws of the mechanical action between electric currents is one of the most brilliant achievements in science.

The whole, theory and experiment, seems as if it had leaped, full grown and full armed, from the brain of the « Newton of electricity ». It is perfect in form, and unassailable in accuracy, and it is summed up in a formula from which all the phenomena may be deduced, and which must always remain the cardinal formula of electro-dynamics.

The method of Ampère, however, though cast into an inductive form, *does not allow us to trace the formation of the ideas which guided it*. We can scarcely believe that Ampère really discovered the law of action by means of the experiments which he describes. We are led to suspect, what, indeed, he tells us himself that he discovered the law by some process which he had not shewn us, and that when he had afterwards build up a perfect demonstration he removed all traces of the scaffolding by which he raised it.

Faraday, on the other hand, shews us his unsuccessful as well as his successful experiments, and his crude ideas as well as his developed ones, and the reader, however inferior to him in inductive power, feels sympathy even more than admiration, and is tempted to believe that, if he had the opportunity, he too would be a discoverer...

contraire purement théorique⁹². David M. Siegel écrit à propos de l'attitude générale de Maxwell vis-à-vis du rôle des mathématiques :

Cit. La possibilité d'avancer sans représentation mécanique, dans un style purement mathématique, était rejetée d'emblée par Maxwell, car il estimait que des mathématiques désincarnées devaient nécessairement s'avérer improductives⁹³ ... *Innovation in Maxwell's Electromagnetic theory, chap. 2 p. 31.*

D.Siegel considère⁹⁴ que Maxwell est initialement emprunt d'un « scepticisme écossais » et est conduit à utiliser un modèle analogique formel sans lui attribuer de signification physique. C'est ainsi que Maxwell cherche dans un premier temps⁹⁵ à développer une interprétation mathématique des lignes de champ de Faraday en raisonnant sur un « fluide hypothétique ». **William Thomson** (1824-1907 ; Lord Kelvin), avec lequel il entretenait une correspondance régulière, l'incite à aller au-delà de la simple analogie formelle et à rechercher une description mécanique plus fondamentale. C'est ainsi que Maxwell est conduit à faire usage des « vortex moléculaires » utilisés par Thomson.

XV.2. Le point de vue historique.

XV.2.1. L'éther électrique et magnétique opposé à « l'action à distance ».

Maxwell publie quatre articles consacrés à l'électricité et au magnétisme de 1861 à 1862 sous le titre générique *On physical lines of force*. Les deux premières parties sont publiées à la suite. Les troisième et quatrième n'apparaissent que neuf mois plus tard et ne semblaient pas avoir été planifiées. C'est dans la troisième partie que Maxwell introduit le *courant de déplacement* et qu'il décrit la lumière comme une *onde électromagnétique*. Il élabore progressivement un modèle mécanique de l'éther électromagnétique de plus en plus perfectionné.

Le but de Maxwell est de donner de l'électricité et du magnétisme une théorie capable de décrire tous les phénomènes connus. Une telle théorie semblait avoir été formulée par le physicien allemand **Wilhelm Weber** en 1846. Mais la théorie de Weber est fondée sur le principe de l'*action à distance*, utilisée par Coulomb et Ampère par exemple. Cette action à distance dans les phénomènes électriques et magnétiques s'inspire de l'attraction gravitationnelle newtonienne qui s'opère instantanément entre les masses à travers le vide. Maxwell recherche pour sa part une interprétation des phénomènes électriques et magnétiques par l'entremise d'un milieu de propagation. Il cite Newton lui-même pour montrer que l'électromagnétisme ne peut s'inspirer de la gravitation pour légitimer l'action à distance :

Cit. Il est inconcevable que la matière brute et inanimée puisse, sans la médiation de quelque élément non matériel, exercer une action et une influence sur une autre matière sans contact réciproque [...] Que la gravité puisse être innée, intrinsèque et essentielle à la matière [...] est pour moi d'une telle absurdité que je pense qu'aucun

⁹² cf. rapport dans *Nature des Elements of Natural Philosophy* des Pr. Sir W.Thomson and P.G.Tait (p.324, T.II, *The scientific papers of James Clerk Maxwell*)

⁹³ The possibility of proceeding without any mechanical representation, in a purely mathematical vein, was rejected by Maxwell out of hand, as he believed that disembodied mathematics was bound to be unfruitful ...

⁹⁴ *Innovation in Maxwell's Electromagnetic theory*, chap. 2. p. 28.

⁹⁵ *On Faraday's Lines of Force*, 1855.

homme capable de pensées cohérentes en matière de philosophie ne peut l'accepter⁹⁶.
Lettre de Newton à Bentle dans action at a distance des Proceedings of the Royal Institution of Great Britain (p. 311 T2, SP).

Dans l'introduction du premier volet de *On Physical Lines of Force*, il présente la notion de *lignes de forces* qui en chaque point indiquent la direction de la force électrique ou magnétique (par leur tangente). Il attribue un caractère « réel » à ces lignes de force :

Cit. Ainsi si nous semons de la limaille de fer sur un papier près d'un aimant, chaque petite aiguille s'aimante par induction, et les aiguilles s'unissent à la suite par leurs pôles opposés, de manière à former des fibres, et ces fibres indiquent la direction des lignes de forces. La belle illustration de la présence de la force magnétique que fournit cette expérience, nous incline naturellement à penser la ligne de force comme quelque chose de réel, et comme révélant quelque chose de plus que la simple résultante de deux forces, dont les sièges sont à distance, et qui n'existent aucunement tant qu'un aimant n'est pas placé dans cette partie du champ. Nous sommes peu satisfaits de l'explication fondée sur l'hypothèse de forces attractives et répulsives dirigées vers les pôles magnétiques, même si nous pouvions nous satisfaire du fait que le phénomène soit en strict accord avec cette hypothèse, et nous ne pouvons pas nous empêcher de penser qu'en chaque endroit où nous trouvons ces lignes de force, un certain état physique ou une certaine action doit exister avec une énergie suffisante pour produire les phénomènes observés⁹⁷. SP. P 451. *From The Philosophical Magazine, Vol. XXI.*

Maxwell entreprend de développer une théorie des phénomènes électriques et magnétiques dans un *éther électro-magnétique*. Il a très tôt l'idée d'un lien profond entre les phénomènes électromagnétiques et la lumière, idée qu'il attribue à Faraday qui « fit l'hypothèse que le même milieu qui servait à la propagation de la lumière pouvait bien aussi être le médiateur des phénomènes électromagnétiques⁹⁸ ». David M. Siegel note⁹⁹ qu'une telle

⁹⁶ It is inconceivable that inanimate brute matter should, without the mediation of something else, which is not material, operate upon and affect other matter without mutual contact, as it must do if gravitation, in the sense of Epicurus, be essential and inherent in it ...

That gravity should be innate, inherent, and essential to matter, so that one body can act upon another at a distance through a vacuum, without the mediation of anything else, by and through which their action and force may be conveyed from one to another, is to me so great an absurdity, that I believe no man who has in philosophical matters a competent faculty of thinking can ever fall into it.

⁹⁷ Suppose that the direction of the force at any point is known, then, if we draw a line so that in every part of its course it coincides in direction with the force at that point, this line may be called a *line of force*, since it indicates the direction of the force in every part of its course.

By drawing a sufficient number of lines of force, we may indicate the direction of the force in every part of the space in which it acts.

Thus if we strew iron filings on paper near a magnet, each filing will be magnetized by induction, and the consecutive filings will unite by their opposite poles, so as to form fibres, and these fibres will *indicate* the direction of the lines of force. The beautiful illustration of the presence of magnetic force afforded by this experiment, naturally tends to make us think of the lines of force as something real, and as indicating something more than the mere resultant of two forces, whose seat of action is at a distance, and which do not exist there at all until a magnet is placed in that part of the field. We are dissatisfied with the explanation founded on the hypothesis of attractive and repellent forces directed towards the magnetic poles, even though we may have satisfied ourselves that the phenomenon is in strict accordance with that hypothesis, and we cannot help thinking that in every place where we find these lines of force, some physical state or action must exist in sufficient energy to produce the actual phenomena.

⁹⁸ Article "Aether", Encyclopedia Britannica.

⁹⁹ Innovation in Maxwell's electromagnetic theory, Chap. 5. p. 121.

relation entre les phénomènes électromagnétiques et la lumière n'était pas nouvelle. Il précise que cette idée s'était manifestée sous des formes différentes au cours des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles et qu'elle fut ravivée au début du XIX^{ème} siècle par le rôle fondamental que jouait l'éther lumineux dans la théorie ondulatoire de la lumière. Cet éther pouvait bien avoir d'autres fonctions que de simplement transmettre la lumière. Siegel mentionne que l'expérience d'Oersted, qui établissait un premier lien entre les phénomènes électriques et magnétiques, nourrissait parallèlement le sentiment que tous les phénomènes physiques étaient reliés. D'autre part il apparaissait à Maxwell peu crédible de remplir l'espace d'une multitude d'éthers différents. Ce principe « d'économie » l'incitait à penser que l'éther lumineux et l'éther électromagnétique sur lequel il allait édifier sa théorie ne feraient qu'un. Maxwell suggère l'idée d'un lien profond entre les phénomènes magnétiques et optiques en mentionnant notamment l'effet Faraday découvert en 1845. Il décrit¹⁰⁰ ainsi le phénomène :

Cit. L'état magnétique, cependant, est caractérisé par un phénomène rotatoire très marqué découvert par Faraday – la rotation du plan de polarisation de la lumière polarisée transmise le long de lignes de force magnétique.

Lorsqu'une substance diamagnétique transparente est traversée par un rayon de lumière polarisé rectilignement, et si des lignes de force magnétiques sont engendrées à l'intérieur de la substance par l'action d'un aimant ou d'un courant électrique, le plan de polarisation de la lumière transmise change, et tourne d'un angle qui dépend de l'intensité de la force magnétique dans la substance¹⁰¹.

C'est la recherche de l'interprétation de cet effet qui conduit William Thomson à considérer l'existence de « vortex moléculaires » en rotation autour des lignes de champ magnétiques.

XV.2.2. Le modèle des vortex moléculaires.

1) L'introduction des vortex : Magnétostatique.

Les vortex avaient déjà fait leur apparition chez Thomson dans le cadre de la théorie de la chaleur. Siegel commente :

Cit. Dans sa théorie dynamique de la chaleur, Thomson suivit Humphrey Davy et W.J.M. Rankine en faisant l'hypothèse que les mouvements qui constituent la chaleur sont des mouvements rotatoires associés à des molécules individuelles – des « vortex moléculaires », selon la terminologie de Rankine¹⁰². *Innovation in Maxwell's Electromagnetic theory.*

Et à propos de la tentative d'explication de l'effet Faraday par Thomson, en 1856:

¹⁰⁰ *On Faraday's Lines of Force, Part IV.*

¹⁰¹ The magnetic state, however, is characterized by a well-marked rotatory phenomenon discovered by Faraday – the rotation of the plane of polarized light when transmitted along the lines of magnetic force.

When a transparent diamagnetic substance has a ray of plane-polarized light passed through it, and if the lines of magnetic force are then produced in the substance by the action of a magnet or of an electric current, the plane of polarization of the transmitted light is found to be changed, and to be turned through an angle depending on the intensity of the magnetizing force within the substance.

¹⁰² Thus, in Thomson's paradigmatic case of the dynamical theory of heat and gases, gas pressure was the result of internal motions, rather than static repulsive forces between caloric particles within the gas. Thomson, in his dynamical theory of heat, followed Humphrey Davy and W.J.M. Rankine in assuming that the motions that constitute heat are rotatory motions associated with individual molecules –“molecular vortices”, in Rankine's terminology. *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory. p. 34.*

Cit. Cela, en retour, fournit un lien avec la théorie des vortex moléculaires de Rankine: Thomson conclua que l'état mécanique réel d'une région traversée par des lignes de force magnétique serait telle que les axes des vortex moléculaires seraient tous alignés dans un même sens, celui de la ligne de force¹⁰³. *Innovation in Maxwell's Electromagnetic theory.*

Maxwell élabore à la suite de Thomson un modèle d'éther fluide constitué de *vortex moléculaires* qui tourbillonnent autour des *lignes de champs* magnétiques avec une vitesse de *rotation uniforme*. Il place les vortex parallèlement entre eux. Leur rotation entraîne une pression dans le plan équatorial par suite de la force centrifuge et une tension associée le long de la ligne de champ. Maxwell écrit le tenseur des contraintes dans le fluide ainsi modélisé et obtient l'expression, composée de plusieurs termes, de la force s'exerçant en tout point du milieu. Son but étant de décrire les phénomènes électromagnétiques par ce modèle, il identifie chacun des termes en fonction de l'expression générale de la force s'exerçant entre des corps magnétiques. Les différents termes trouvent une correspondance deux à deux moyennant les analogies suivantes :

- 1) la proportionnalité de la densité du fluide dans le modèle des vortex avec la « capacité inductive magnétique » de la théorie des phénomènes électriques et magnétiques.
- 2) la proportionnalité de la vitesse de rotation des vortex avec « l'induction magnétique ».

Maxwell rend ainsi compte de la force d'interaction entre aimants, de l'effet du magnétisme sur un corps paramagnétique ou diamagnétique, et du théorème d'Ampère.

Quant à la « taille des vortex », elle « est indéterminée mais probablement très petite par rapport à celle d'une molécule de matière ordinaire » (*Part II, p. 485*).

2) Première modification du modèle : Electricité et induction électromagnétique.

Ce premier modèle rendait notamment compte de la relation d'Ampère, qui s'écrit en notations modernes :

$$\mathbf{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

où \mathbf{B} (B_x, B_y, B_z) est le champ magnétique et \mathbf{j} (j_x, j_y, j_z) la densité de courant. En projection sur l'axe des x d'un système de coordonnées cartésiennes, cette relation se lit :

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu_0 j_x \quad (1)$$

Des expressions analogues sont obtenues pour les projections sur les autres axes par permutation des variables.

Maxwell est alors confronté au problème suivant : comment modifier le modèle des vortex moléculaires afin de faire apparaître le courant électrique qui entre en compte dans cette relation? Un examen mécanique plus minutieux du modèle le conduit à cette remarque :

Cit. J'ai rencontré de grandes difficultés à concevoir l'existence de vortex dans un milieu, les uns à côté des autres, tournant dans la direction commune à leurs axes. Les parties contigües de vortex consécutifs doivent tourner dans des sens opposés ; et il est

¹⁰³ Thus, in turn, provided for a connection with Rankine's theory of molecular vortices : Thomson concluded that the actual mechanical condition characterizing a region traversed by magnetic lines of force would be one in which the axes of molecular vortices would all be aligned in one direction, that being the direction of the line of force. *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory. p. 35.*

difficile de comprendre comment le mouvement d'une partie du milieu peut coexister avec, et de plus engendrer, un mouvement opposé d'une partie qui est en contact¹⁰⁴.

Ainsi la machine des vortex moléculaires ne fonctionne pas d'un point de vue d'ingénierie mécanique. Maxwell résout ce problème grâce à un système de pignons :

Cit. La seule représentation qui m'ait quelque peu aidée à concevoir ce genre de mouvement est celle de vortex séparés par une couche de particules, tournant chacune autour de son axe, dans un sens opposé à celui des vortex, de manière à ce que les parties en contact des particules et des vortex aient le même mouvement. En mécanique, lorsque deux roues doivent tourner dans le même sens, on intercale une roue qui tourne avec les deux autres, et cette roue est appelée un pignon. L'hypothèse que j'ai suggérée à propos des vortex, est qu'une couche de particules, jouant le rôle de pignons, se trouve entre un vortex et le suivant, en sorte que chaque vortex a tendance à faire tourner les vortex voisins dans le même sens que lui¹⁰⁵. *On Physical Lines of Force, Part II. (SP p. 468).*

Il traite le modèle ainsi modifié d'un point de vue mécanique. Les particules (ou pignons) tournent sur elles-mêmes et peuvent aussi se translater sous l'action des forces tangentielles résultant de deux vortex contigus tournant à des vitesses différentes. Maxwell établit alors la relation entre la « quantité totale de particules traversant une unité de surface dans l'unité de temps » dans la direction de l'axe des x , notée p , la « quantité de particules par unité de surface » notée ρ , et la vitesse de rotation des vortex de composantes (α, β, γ) , en un point donné du milieu :

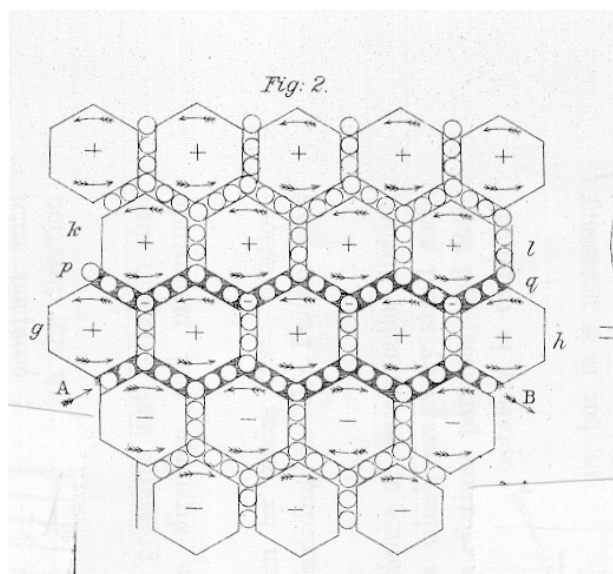
$$p = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\partial \gamma}{\partial z} - \frac{\partial \beta}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Utilisant l'identification faite dans son article précédent¹⁰⁶ entre cette vitesse et l'induction magnétique $(\mu\alpha, \mu\beta, \mu\gamma)$, avec $\rho = \frac{1}{2} \pi$, la relation (2) s'identifie avec la relation (1) à la condition que $p \equiv j_x$. Le modèle des vortex dessiné par Maxwell est reproduit ci-dessous :

¹⁰⁴ I have found a great difficulty in conceiving of the existence of vortices in a medium, side by side, revolving in the same direction about parallel axes. The contiguous portions of consecutive vortices must be moving in opposite directions; and it is difficult to understand how the motion of one part of the medium can coexist with, and even produce, an opposite motion of a part in contact with it.

¹⁰⁵ The only conception which has at all aided me in conceiving of this kind of motion is that of the vortices being separated by a layer of particles, revolving each on its own axis in the opposite direction to that of the vortices, so that the contiguous surfaces of the particles and of the vortices have the same motion. In mechanism, when two wheels are intended to revolve in the same direction, a wheel is placed between them so as to be in gear with both, and this wheel is called an "idle wheel". The hypothesis about the vortices which I have suggest is that a layer of particles, acting as idle wheels, is interposed between each vortex and the next, so that each vortex has a tendency to make the neighbouring vortices revolve in the same direction with itself.

¹⁰⁶ *On Faraday's lines of Force, part I*



Les particules introduites réalisent un « couplage » entre les phénomènes électriques (le déplacement des billes dans le modèle) et magnétiques (la vitesse de rotation des vortex qu'elles séparent). Maxwell étudie comment réagit la machinerie des vortex lorsque la vitesse de rotation est modifiée localement. Il calcule la force tangentielle entre particules et vortex, identifie le travail de cette force à la variation d'énergie de rotation, et établit une relation qui traduit dans son modèle le phénomène d'induction de Faraday.

Maxwell prend cependant quelque distance vis-à-vis de la réalité d'un tel mécanisme opérant dans la nature. Il écrit en conclusion de son article :

Cit. L'idée d'une particule dont le mouvement est relié à celui d'un vortex par un contact de roulement parfait peut apparaître quelque peu délicat. Je ne le propose pas comme un mode de connexion existant dans la nature, ou même seulement comme une hypothèse électrique que je consentirais de bon cœur. C'est, cependant, un mode de connexion mécaniquement concevable, et facile à étudier, et il sert à mettre en évidence des relations réelles entre les phénomènes électro-magnétiques connus ; aussi me hasarderai-je à dire que quiconque comprend le caractère provisoire et temporaire de cette hypothèse, s'en trouvera plutôt aidé qu'entravé dans sa recherche de la véritable explication des phénomènes¹⁰⁷. *SP. p. 486.*

Il restera cependant convaincu de l'existence d'un éther composé de vortex moléculaires magnétiques, mais il sait que l'introduction des pignons est *ad hoc* et constitue le « talon d'Achille » du modèle. Cette hypothèse va cependant l'encourager sur sa voie.

3) Seconde modification du modèle. Lumière et ondes électromagnétiques.

Un point demeure en suspens dans le modèle précédent. Comment la vitesse de rotation peut-elle se communiquer des couches périphériques aux couches internes d'un vortex ? La

¹⁰⁷ The conception of a particle having its motion connected with that of a vortex by perfect rolling contact may appear somewhat awkward. I do not bring it forward as a mode of connexion existing in nature, or even as that which I would willingly assent to as an electrical hypothesis. It is, however, a mode of connexion which is mechanically conceivable, and easily investigated, and it serves to bring out the actual mechanical connexions between the known electro-magnetic phenomena; so that I venture to say that any one who understands the provisional and temporary character of this hypothesis, will find himself rather helped than hindered by it in his search after the true interpretation of the phenomena.

vitesse de rotation angulaire doit être la même pour toutes les couches, sinon il s'ensuivrait une dissipation d'énergie due au glissement des différentes couches les unes sur les autres, qui ne trouverait pas d'interprétation en termes de phénomènes électromagnétiques. Ce point, abordé comme un détail dans la partie II est développé dans la partie III de *On physical lines of force*. Maxwell écrit :

Cit. ... mais on doit supposer, afin de rendre compte de la transmission de la rotation de l'extérieur vers l'intérieur de chaque cellule¹⁰⁸, que la substance qui la compose possède une élasticité de déformation, semblable, bien que différente en degré, à celle qui est observée pour les corps solides. La théorie ondulatoire de la lumière nous demande d'accepter ce genre d'élasticité pour le milieu luminifère, de façon à rendre compte de vibrations transverses. Nous ne devons pas être surpris si le milieu magnéto-électrique possède la même propriété¹⁰⁹. *SP. p. 489. From The Philosophical Magazine for January and February 1862.*

Dans ce même article Maxwell identifie par la suite l'éther électromagnétique à l'éther lumineux. On peut noter qu'il utilise des propriétés de l'éther lumineux à ce niveau introductif pour caractériser l'éther électromagnétique. Le modèle modifié doit donner lieu à de nouvelles prédictions en termes de phénomènes électromagnétiques. D'autre part, la nécessité d'introduire de nouvelles modifications, comme autant de « degrés de liberté » supplémentaires dans le modèle, était motivée par le désir de donner une explication de l'interaction électrostatique. Ainsi Maxwell note-t-il :

Cit. Si nous pouvons maintenant expliquer l'état d'un corps vis-à-vis du milieu environnant quand on dit qu'il est « chargé » d'électricité, et si nous pouvons rendre compte des forces agissant entre des corps électrisés, nous aurons établi une relation entre les principaux phénomènes de la science de l'électricité¹¹⁰. *SP. p. 90.*

Comment réaliser la connexion entre le modèle des vortex et l'électrostatique ? Maxwell fait un détour par la recherche d'une explication des phénomènes ayant lieu dans les diélectriques. Il n'existe alors aucune méthode d'investigation sur ce sujet, et ses conceptions sont intuitives. Il note que les isolants, qui ne permettent pas le passage d'un courant électrique, sont cependant capables de transmettre¹¹¹ « l'action électrique ». Il donne l'image mécanique suivante :

Cit. Ainsi avons-nous donc des corps de deux types différents, les uns qui permettent le passage de l'électricité au travers d'eux, et les autres qui permettent la transmission

¹⁰⁸ Ou vortex

¹⁰⁹ ... but it is necessary to suppose, in order to account for the transmission of rotation from the exterior to the interior parts of each cell, that the substance in the cell possesses elasticity of figure, similar in kind, though different in degree, to that observed in solid bodies. The undulatory theory of light requires us to admit this kind of elasticity in the luminiferous medium, in order to account for transverse vibrations. We need not be surprised if the magneto-electric medium possesses the same property.

¹¹⁰ If we can now explain the condition of a body with respect to the surrounding medium when it is said to be "charged" with electricity, and account for the forces acting between electrical bodies, we shall have established a connexion between all the principal phenomena of electrical science.

¹¹¹ Si l'on met deux particules chargées en présence, dans le vide, elles sont soumises à une interaction électrostatique. Si on les sépare par du verre, milieu non conducteur du courant électrique, elle restent soumises à une interaction électrostatique.

de l'action électrique au travers d'eux sans que de l'électricité puisse passer. On peut comparer un corps conducteur à une membrane poreuse qui oppose plus ou moins de résistance au passage d'un fluide alors qu'un diélectrique est comme une membrane élastique imperméable au fluide, mais qui transmet la pression du fluide d'un côté à l'autre¹¹². *SP. pp 490-491.*

Maxwell introduit la très importante notion de *courant de déplacement* (Part III, SP. p. 491):

Cit. Dans un diélectrique sous induction, nous pouvons concevoir que l'électricité présente dans chaque molécule est déplacée de telle manière qu'un côté devienne électriquement positif, et l'autre négatif, mais que l'électricité demeure entièrement liée à la molécule, et ne passe pas d'une molécule à l'autre.

La résultante de cette action sur toute la masse du diélectrique est de produire un déplacement général de l'électricité dans un certain sens. Ce déplacement ne se traduit pas par un courant, car il demeure constant lorsqu'il a atteint une certaine valeur, mais c'est le commencement d'un courant, et ses variations constituent un courant dans le sens positif et le sens négatif, suivant que le déplacement augmente ou diminue. L'amplitude du déplacement dépend de la nature du corps, et de la force électromotrice ; ainsi si h est le déplacement, R la force électromotrice, et E un coefficient dépendant de la nature du diélectrique¹¹³,

$$R = - 4\pi E^2 h$$

Maxwell prévoit donc l'existence d'un nouveau phénomène physique et l'exprime par une relation mathématique traduisant la proportionnalité entre la cause (le champ électrique) et l'effet (la déformation du diélectrique)¹¹⁴. Fidèle à sa méthode, il en donne simultanément l'interprétation dans le cadre de sa théorie :

Cit. Selon notre hypothèse, le milieu magnétique est divisé en cellules, séparées par des cloisons formées d'une couche de particules qui jouent le rôle d'électricité. Lorsque les particules de diélectriques sont poussées dans une direction, elles déforment chaque cellule par leur action tangentielle sur la substance élastique de

¹¹² Here then we have two independent qualities of bodies, one by which they allow of the passage of electricity through them, and the other by which they allow of electrical action being transmitted through them without any electricity being allowed to pass. A conducting body may be compared to a porous membrane which opposes more or less resistance to the passage of a fluid while a dielectric is like an elastic membrane which may be impervious to the fluid, but transmits the pressure of the fluid on one side to that on the other.

¹¹³ In a dielectric under induction, we may conceive that the electricity in each molecule is so displaced that one side is rendered positively, and the other negatively electrical, but that the electricity remains entirely connected with the molecule, and does not pass from one molecule to another.

The effect of this action on the whole dielectric mass is to produce a general displacement of the electricity in a certain direction. This displacement does not amount to a current, because when it has attained a certain value it remains constant, but it is the commencement of a current, and its variations constitute currents in the positive or negative direction, according as the displacement is increasing or diminishing. The amount of the displacement depends on the nature of the body, and on the electromotive force; so that if h is the displacement, R the electromotive force, and E a coefficient depending on the nature of the dielectric,

$$R = - 4\pi E^2 h$$

¹¹⁴ Cette interprétation de Maxwell est assez proche de l'interprétation actuelle : un champ électrique « polarise » linéairement le milieu ; les barycentres des charges positives et négatives qui coïncidaient initialement sont séparés, sans que les charges quittent la molécule globalement neutre. Tant que le champ varie, ce déplacement peut s'exprimer comme un terme de « courant de déplacement ».

celles-ci, et mettent en jeu des forces égales et opposées qui naissent de cette élasticité. Quand la force disparaît, les cellules retrouvent leur forme d'origine, et l'électricité retourne à sa position initiale¹¹⁵. *Part III. SP p. 492.*

Il analyse le comportement de ce nouveau milieu du point de vue mécanique et introduit les coefficients m et μ qui traduisent respectivement les coefficients de rigidité et d'élasticité des vortex. Ceux-ci se déforment sous l'action des forces tangentielles exercées par les particules d'électricité (les pignons de la version II). Il identifie cette déformation à celle des molécules de diélectriques « sous induction » et est conduit dans son analogie à exprimer le coefficient E , introduit dans la description du phénomène électromagnétique, en fonction des variables m et μ du système mécanique. Il obtient :

$$E^2 = \pi m \left(\frac{3}{1 + \frac{5m}{3\mu}} \right)$$

Il note ensuite que :

Cit. Le rapport de m à μ varie selon les substances; mais dans un milieu dont l'élasticité dépend entièrement de forces agissant entre paires de particules, ce rapport vaut 6/5 et dans ce cas

$$E^2 = \pi m$$

Lorsque la résistance à la compression est infiniment plus grande que celle à la distorsion, comme dans un liquide rendu légèrement élastique par de la gomme ou de la gelée,

$$E^2 = 3\pi m$$

La valeur de E^2 doit être comprise entre ces limites. Il est probable que la substance de nos cellules soit du premier type, et que nous devons utiliser la première valeur de E^2 , qui est celle obtenue avec l'hypothèse d'un "solide parfait", pour lequel¹¹⁶

$$5m = 6\mu$$

¹¹⁵ According to our hypothesis, the magnetic medium is divided into cells, separated by partitions formed of a stratum of particles which play the part of electricity. When the dielectric particles are urged in any direction, they will, by their tangential action on the elastic substance of the cells, distort each cell, and call into play an equal and opposite force arising from the elasticity of the cells. When the force is removed, the cells will recover their form, and the electricity will return to its former position.

¹¹⁶ The ratio of m to μ varies in different substances; but in a medium whose elasticity depends entirely upon forces acting between pairs of particles, this ratio is that of 6 to 5, and in this case

$$E^2 = \pi m$$

When the resistance to compression is infinitely greater than the resistance to distortion, as in a liquid rendered slightly elastic by gum or jelly,

$$E^2 = 3\pi m$$

The value of E^2 must lie between these limits. It is probable that the substance of our cells is of the former kind, and that we must use the first value of E^2 , which is that belonging to a hypothetical "perfect solid", in which

$$5m = 6\mu$$

Maxwell a une certaine liberté dans le choix du paramètre E^2 . Il choisit une valeur limite associée à un « solide parfait ». On a vu que cette caractéristique était propre à l'éther lumineux. Maxwell souhaite l'identification des éthers électromagnétiques et lumineux ; ce choix est donc poussé par son intuition. Examinons tout d'abord les premières conséquences que Maxwell déduit de son modèle : il complète la relation d'Ampère pour prendre en compte le courant de déplacement et aboutit à la relation notée aujourd'hui :

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Le second terme de cette équation constitue l'apport déterminant de Maxwell dans la théorie électromagnétique. Ce terme provient historiquement de l'édification d'un modèle d'éther électromagnétique de plus en plus perfectionné.

Par une étude énergétique, Maxwell établit que la force s'exerçant entre deux distributions d'électricité est proportionnelle à la fois au coefficient E^2 , au produit des distributions, et est inversement proportionnelle au carré de la distance. Ces caractéristiques sont celles de l'interaction électrostatique moyennant que E^2 désigne «le coefficient par lequel multiplier toute mesure électrodynamique d'une quantité d'électricité pour obtenir sa mesure électrostatique¹¹⁷ (Part III. SP. p. 498) ». En termes modernes cela signifie que $E^2 = 1/\varepsilon_0 \mu_0$.

Dans le modèle mécanique, la déformation d'une cellule élastique en un endroit doit par action de proche en proche se propager aux autres cellules du milieu, traduisant ainsi l'existence d'ondes mécaniques dans le milieu. Les vortex ayant la propriété des solides, ces ondes seront des ondes de cisaillement, transverses à la direction de propagation. Le modèle de l'éther mécanique devient prédictif : il traduirait l'existence d'ondes électromagnétiques. Maxwell attribue l'existence de telles ondes à Faraday :

Cit. L'idée de la propagation de perturbations magnétiques transverses, à l'exclusion de modes longitudinaux, est avancée clairement par le Professeur Faraday dans ses « Pensées sur les vibrations des rayons ». La théorie électromagnétique de la lumière, qu'il a proposée, est identique sur le fond à celle que j'ai entrepris de développer dans cet article, hormis qu'en 1846 on ne disposait pas de données pour calculer la vitesse de propagation¹¹⁸. *A dynamical Theory of the electromagnetic field. 1864. p. 532 SP.*

Il traite cet aspect fondamental de sa théorie dans la proposition XVI :

Prop. XVI. *Trouver la vitesse de propagation de vibrations transverses à travers un milieu élastique dont les cellules sont composées, avec l'hypothèse que leur élasticité est entièrement due à des forces agissant entre paires de particules.*

Par les méthodes habituelles de calcul, nous savons que

$$V = \sqrt{\frac{m}{\rho}}$$

¹¹⁷ E^2 is the number by which electrodynamic measure of any quantity of electricity must be multiplied to obtain its electrostatic measure.

¹¹⁸ The conception of the propagation of transverse magnetic disturbances to the exclusion of normal ones is distinctly set forth by Professor Faraday in his « Thoughts on Ray Vibrations ». The electromagnetic theory of light, as developed by him, is the same in substance as that which I have begun to develop in this paper, except that in 1846 there were no data to calculate the velocity of propagation.

Où m est le coefficient élasticité transverse, et ρ est la densité. En se reportant aux équations de la partie I, on reconnaîtra que ρ est la densité de la matière constituant les vortex, et μ étant le “coefficient d’induction magnétique”,

$$\begin{aligned} & \mu = \pi\rho \\ \text{d'où } & \pi m = V^2\mu \\ \text{et [avec } E^2=\pi m] & E = V\sqrt{\mu} \end{aligned}$$

Dans l’air ou dans le vide $\mu = 1$, et il s’ensuit

$$\begin{aligned} V &= E \\ &= 31074000000 \text{ millimètres par seconde} \\ &= 193088 \text{ miles par seconde} \end{aligned}$$

La vitesse de la lumière dans l’air, déterminée par M. Fizeau, est de 70843 lieues par seconde (25 lieues par degré)

$$\begin{aligned} V &= 31485800000 \text{ millimètres} \\ &= 195647 \text{ miles par seconde} \end{aligned}$$

La vitesse des ondes transverses dans notre milieu hypothétique, calculée à partir des expériences électro-magnétiques de MM. Kohlrausch et Weber, s’accorde si exactement avec la vitesse de la lumière déduite des expériences optiques de M. Fizeau, que nous pouvons difficilement éviter de conclure que la lumière consiste en des ondes transverses du même milieu qui est à l’origine des phénomènes électriques et magnétiques¹¹⁹. *Part III. SP. p. 499-500.*

L’éther électromagnétique de Maxwell permet de propager des ondes transverses à leur direction de propagation. Les quantités qui déterminent la vitesse des ondes mécaniques sont issues de mesures électriques et magnétiques, par le biais des analogies développées par Maxwell, et sont indépendantes des mesures optiques. Cette vitesse s’avère extrêmement grande au regard des vitesses usuelles et est très proche de la vitesse de la lumière. L’incertitude est compatible avec les erreurs sur les mesures des paramètres physiques. De plus la lumière est elle aussi une onde transverse à la direction de propagation¹²⁰. Une telle

¹¹⁹ To find the rate of propagation of transverse vibrations through the elastic medium of which the cells are composed, on the supposition that its elasticity is due entirely to forces acting between pairs of particles.

By the ordinary method of investigation we know that

$$V = (m/\rho)^{1/2}$$

where m is the coefficient of transverse elasticity, and ρ is the density. By referring to the equations of Part I, it will be seen that if ρ is the density of the matter of the vortices, and μ is the “coefficient of magnetic induction”,

$$\begin{aligned} \text{whence} & \mu = \pi\rho \\ \text{and [with } E^2=\pi m] & \pi m = V^2\mu \\ & E = V(\mu)^{1/2} \end{aligned}$$

In air or vacuum $\mu = 1$, and therefore

$$\begin{aligned} V &= E \\ &= 31074000000 \text{ millimetres per second} \\ &= 193088 \text{ miles per second} \end{aligned}$$

The velocity of light in air, as determined by M. Fizeau, is 70843 leagues per second (25 leagues to a degree) which gives

$$\begin{aligned} V &= 31485800000 \text{ millimetres} \\ &= 195647 \text{ miles per second} \end{aligned}$$

The velocity of transverse undulations in our hypothetical medium, calculated from the electro-magnetic experiments of MM. Kohlrausch and Weber, agrees so exactly with the velocity of light calculated from the optical experiments of M. Fizeau, that we can scarcely avoid the inference that *lights consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena.*

¹²⁰ cf. § XIII.

coïncidence n'est pas le fruit du hasard pour Maxwell. Les éthers magnétiques et lumineux ne font qu'un et la lumière devient une *onde* électromagnétique.

L'existence des ondes électromagnétiques ne sera confirmée par Hertz que huit années après la mort de Maxwell en 1887.

4) Démarquation par rapport au modèle élaboré.

L'introduction des particules d'électricité sous la forme de pignons dans le modèle de l'éther gênait Maxwell car elle rendait difficile l'acceptation de sa théorie par ses pairs. D'autre part le point crucial des travaux de Maxwell réside dans l'introduction du courant de déplacement. Dès que l'on peut justifier de l'introduction de ce terme, et de sa forme mathématique, une théorie électromagnétique cohérente peut être établie sur la bases des seules équations, sans le recours à un modèle particulier d'éther pour propager les interactions. Les équations rendent compte de tous les phénomènes, y compris l'existence des ondes électromagnétiques, moyennant un effort d'abstraction qui consiste à ne pas rechercher d'interprétation mécanique aux champs électriques et magnétiques. Ceux-ci acquièrent ainsi une certaine existence par eux-mêmes.

Dès 1864 on assiste à un revirement, et au reniement, en quelque sorte, du modèle qui a permis l'édification de la théorie. Maxwell publie *A dynamical Theory of the electromagnetic field* dans lequel il introduit le courant de déplacement sans en rechercher d'interprétation mécanique. Il en déduit à la suite l'équation de propagation des ondes électromagnétiques, de manière purement formelle. D. M. Siegel note que les vortex moléculaires introduits initialement dans la théorie des gaz avaient parallèlement perdu de leur intérêt dans cette discipline, perdant par là même le caractère « unificateur » qu'ils pouvaient présenter pour la physique, ce qui ne pouvait que fragiliser leur utilisation.

Maxwell conserve cette attitude dans son *Traité d'électricité et de magnétisme* de 1873. L'introduction du courant de déplacement y est justifiée par l'analyse théorique des phénomènes électriques au sein de diélectriques, par exemple lors de la charge d'un condensateur. Alors qu'une certaine quantité d'électricité traverse un conducteur reliant une armature à l'autre du condensateur sous l'action d'un générateur extérieur, un « courant de déplacement » transitoire apparaît dans le diélectrique. L'expression mathématique de ce courant se déduit alors du *principe de la conservation de la charge* qui ferme les lignes de courant sur elles-mêmes.

La prise de distance de Maxwell par rapport au modèle des vortex a des conséquences importantes pour la physique contemporaine ainsi que le note David Siegel :

Cit. Le fait que Maxwell se soit détourné des modèles mécaniques fut l'un des événements qui précipitèrent le déclin de la vision mécaniste du monde et la transition vers les formalismes plus abstraits de la physique du XX^{ème} siècle¹²¹.

5) Conclusion.

Bien que Maxwell ait pris ses distances par rapport au modèle des vortex, véritable source de son inspiration, il n'en restera pas moins attaché à l'existence d'un éther. Dans l'article de 1864 où il ne fait plus référence à un modèle particulier d'éther, il écrit cependant :

Cit. Il semble qu'ainsi certain phénomènes en électricité et en magnétisme conduisent à la même conclusion qu'en optique, à savoir qu'il existe un milieu éthéré qui pénètre tous les corps, et qui est seulement modifié en degré par leur présence ; que les parties de ce corps peuvent être mises en mouvement par des courants électriques ou des

¹²¹ Maxwell's turn away from mechanical models was one of the precipating events in the decline of the mechanical worldview and the transition to the more abstract physical formalisms of the twentieth century.

aimants ; que ce mouvement est transmis d'une partie du milieu à une autre par des forces naissant des liaisons entre ces parties ; que sous l'action de ces forces apparaît une certaine tension dépendant de l'élasticité de ces connexions ; et qu'à la suite l'énergie existe sous deux formes différentes dans le milieu, l'une d'elle étant l'énergie véritable du mouvement de ses parties, et l'autre l'énergie potentielle emmagasinée dans les liaisons en vertu de leur élasticité¹²². *A dynamical Theory of the electromagnetic field. 1864. p. 532 SP.*

Il conserve ce point de vue dans le *Traité* et fait de la compréhension de ce « milieu éthéré », par la recherche « d'une représentation mentale de tous les détails de son action », une priorité pour les recherches futures.

En conclusion de son article sur l'éther de l'*Encyclopedia Britannica* il écrira :

Cit. Quelque soient les difficultés que nous pouvons rencontrer pour concevoir la constitution de l'éther, il n'y a aucun doute que les espaces interplanétaires et interstellaires ne sont pas vides, mais sont occupés par une substance matérielle ou un corps, qui est sans aucun doute le plus vaste, et vraisemblablement le plus uniforme des corps que nous connaissons¹²³. *SP. p. 762.*

L'optique ondulatoire de Fresnel et la théorie électromagnétique de Maxwell prédisent la possibilité de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. C'est cette détermination à laquelle s'attache le physicien américain Albert Michelson.

XVI. L'expérience de Michelson.

Albert Abraham Michelson (1852 – 1931) est lauréat du prix Nobel 1907 *pour la précision de ses mesures optiques et les recherches en spectroscopie et en métrologie menées grâce à elles*. En 1881, Michelson cherche le moyen de tester la théorie de Fresnel qui fait l'hypothèse que l'éther lumineux n'est pas entraîné¹²⁴ par la Terre dans son mouvement annuel autour du Soleil. Une expérience de grande sensibilité devrait pouvoir ainsi mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à un éther immobile support des ondes lumineuses. L'éther constituerait alors un référentiel « absolu » auquel rapporter les mesures terrestres. Michelson réalise une expérience en 1881, à l'observatoire de Potsdam, en

¹²² It appears therefore that certain phenomena in electricity and magnetism lead to the same conclusion as those of optics, namely, that there is an aethereal medium pervading all bodies, and modified only in degree by their presence; that the parts of this medium are capable of being set in motion by electric currents and magnets; that this motion is communicated from one part of the medium to another by forces arising from the connexions of those parts; that under the action of these forces there is a certain yielding depending on the elasticity of these connexions; and that therefore energy in two different forms exist in the medium, the one form being the actual energy of motion of its parts, and the other being the potential energy stored up in the connexions, in virtue of their elasticity.

¹²³ Whatever difficulties we may have in forming a consistent idea of the constitution of the aether, there can be no doubt that the interplanetary and interstellar spaces are not empty, but are occupied by a material substance or body, which is certainly the largest, and probably the most uniform body of which we have any knowledge.

¹²⁴ Cet éther, qui sert de milieu de propagation aux vibrations lumineuses dans la théorie de Fresnel (de même que dans la théorie Maxwellienne), est partiellement entraîné par les corps transparents. Le coefficient d'entraînement est $(1-1/n^2)$ où n est l'indice de réfraction du milieu considéré. L'éther est supposé n'être que faiblement entraîné, voir pas du tout, par les corps opaques en mouvement. Cette supposition était faite par Fresnel pour expliquer le phénomène de l'aberration en astronomie dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière. (*cf* § XIV).

développant un instrument fondé sur le principe des interférences lumineuses. Cet instrument porte depuis le nom *d'interféromètre de Michelson*. L'expérience est décrite dans un premier article intitulé *le mouvement relatif de la Terre et de l'éther lumineux*¹²⁵. Son principe est le suivant :

Cit. Faisant ainsi l'hypothèse que la Terre se déplace à travers l'éther qui est au repos, le temps que met la lumière pour passer d'un point à un autre sur terre doit dépendre du sens de propagation de la lumière¹²⁶. p. 120.

Michelson note T la durée du trajet aller et T_1 celle du retour. Il rappelle que Maxwell avait suggéré de mesurer une quantité analogue par le biais de mesures astronomiques, et que ce dernier ne croyait pas en la possibilité de la réalisation d'une expérience de laboratoire :

Cit. Dans une lettre publiée dans *Nature* peu de temps après sa mort, Clerk Maxwell souligna que $T - T_1$ pouvait être calculé en mesurant la vitesse de la lumière par les éclipses des satellites de Jupiter à des moments où cette planète se trouve dans des positions différentes par rapport à la Terre ; mais qu'à cette fin les observations des éclipses devaient dépasser de beaucoup la précision obtenue jusqu'alors.

Dans la même lettre il était également affirmé que la raison pour laquelle de telles mesures ne pouvaient être réalisées sur Terre était que nous ne disposions pas de méthode pour mesurer la vitesse de la lumière qui ne nécessite un trajet retour, à la suite de quoi on perdrait au retour presque autant que ce qui aurait été acquis à l'aller. La différence dépendant du carré du rapport des deux vitesses, d'après Maxwell, est beaucoup trop petite pour être mesurée¹²⁷. p. 121.

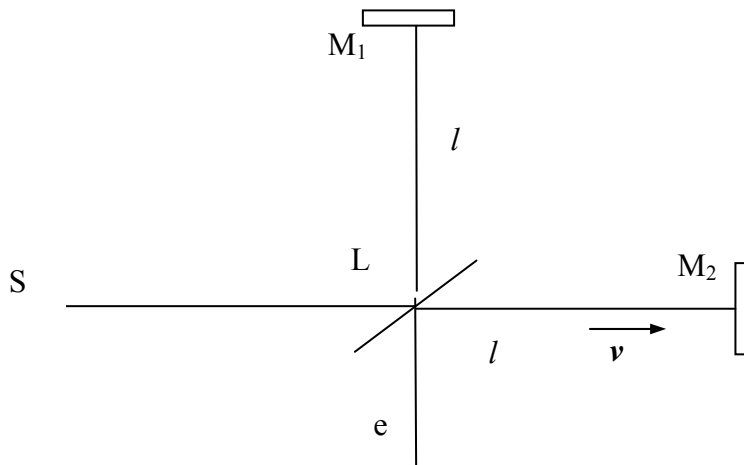
Michelson propose un dispositif expérimental susceptible de mesurer d'aussi petites quantités en utilisant les interférences lumineuses. Le dispositif est extrêmement sensible et doit être déplacé de Berlin à l'observatoire de Postdam pour éviter les perturbations occasionnées par la ville. Le schéma de simplifié de l'interféromètre est le suivant :

¹²⁵ A.A. Michelson, *The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether*, The american journal of science, pp. 120-129, vol. 22, 1881.

¹²⁶ Assuming then that the ether is at rest, the earth moving through it, the time required for light to pass from one point to another on the earth's surface, would depend on the direction on which it travels.

¹²⁷ In a letter, published in *Nature* shortly after his death, Clerk Maxwell pointed out that $T - T_1$ could be calculated by measuring the velocity of light by means of the eclipses of Jupiter's satellites at periods when that planet lay in different directions from earth ; but that for this purpose the observations of these eclipses must greatly exceed in accuracy those which have thus far been obtained. In the same letter it was also stated that the reason why such measurements could not be made at the earth's surface was that we have thus far no method for measuring the velocity of light which does not involve the necessity of returning the light over its path, whereby it would lose nearly as much as was gained in going.

The difference depending on the square of the ratio of the two velocities, according to Maxwell, is far too small to measure.



Sur ce schéma de principe, la lumière issue de la source S est en partie réfléchi sur une lame semi-réfléchissante L et en partie transmise par celle-ci. La partie réfléchi rencontre un miroir M_1 qui la renvoie vers L qui la transmet vers e . La partie initialement transmise rencontre un miroir M_2 qui la renvoie vers L et la réfléchit vers e . Les faisceaux ayant emprunté les deux voies de l'interféromètre se recouvrent et, moyennant certaines conditions, un système de franges d'interférences est observé. Considérons pour simplifier que les longueurs des bras LM_1 et LM_2 de l'interféromètre sont identiques, égales à l . Supposons que la Terre se déplace à la vitesse v par rapport à l'éther immobile, dans la direction LM_2 . La lumière se déplace à la vitesse c dans l'éther au repos. La loi de composition galiléenne des vitesses, de la mécanique classique, indique que la vitesse de la lumière par rapport à l'interféromètre est $c-v$. De L vers M_2 , c et v ont même sens, et cette vitesse a pour valeur $c-v$; lors du retour de la lumière les sens sont opposés et cette vitesse vaut $c+v$. La durée Δt_1 du trajet aller-retour LM_2 est donc

$$\Delta t_1 = l \left(\frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v} \right) = \frac{2lc}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c} \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

Le long du trajet LM_1 le raisonnement est similaire. Notons R le référentiel de l'éther immobile et R' celui de l'interféromètre qui se déplace à la vitesse v dans cet éther. A l'instant où la lumière quitte la lame séparatrice en direction du miroir M_1 les origines O et O' des deux référentiels coïncident. Le trajet suivi par la lumière dans le référentiel R est indiqué en pointillés sur le schéma ci-dessous. La lumière se déplace par hypothèse à la vitesse c le long de ce trajet.



Soit c' la vitesse de la lumière le long du bras LM_1 de l'interféromètre. On a $c' = c - v$. Le module de cette quantité vectorielle vaut $\sqrt{c^2 - v^2}$. La durée Δt_2 du trajet aller-retour LM_1 de la lumière est donc

$$\Delta t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Michelson avait lui-même commis une erreur dans son analyse de 1881¹²⁸. Ses prédictions sur l'effet recherché s'en trouvaient entachées d'un facteur 2. Cependant, les conclusions de son article ne sont pas remises en cause par l'analyse plus précise réalisée en collaboration avec E.W. Morley en 1887¹²⁹. Les calculs menés ici s'inspirent de l'analyse de 1887.

La différence de durée $\delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2$ entre les durées des deux trajets est

$$\delta t = \frac{2l}{c} \left(\frac{1}{1 - v^2/c^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$$

La vitesse moyenne de la Terre sur son orbite autour du soleil est d'environ 30km/s et le rapport v/c vaut environ 10^{-4} . Un développement limité au premier ordre en $(v/c)^2$ donne une différence de chemin parcourue $\delta l = c\delta t$:

$$\delta l = l \cdot \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

En prenant avec Michelson¹³⁰ $l = 11 \text{ m}$, on obtient $\delta l = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Cette longueur, très petite dans l'absolu, doit être comparée à la longueur d'onde de la source lumineuse utilisée par Michelson : la raie jaune du sodium¹³¹ dont la longueur d'onde est $\lambda = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Ainsi

$$\frac{\delta l}{\lambda} \approx 0,2$$

Une variation de longueur λ entre les trajets parcourus par la lumière dans les deux bras se traduirait par le défilement d'une frange dans le plan d'observation (un interfrange). Le déplacement attendu est ici de 0.2 interfrange.

VIDÉO

Le dispositif réalisé ne permet pas une mesure absolue de la position des franges. En retournant l'interféromètre de 90° , les voies LM_1 et LM_2 échangent leurs rôles et le nouveau système de franges est décalé de la même quantité $\delta l/\lambda$ dans le sens opposé. Entre les deux positions à 90° de l'interféromètre, le système de franges devrait se déplacer de 0.4

¹²⁸ Il avait considéré que la vitesse de la lumière le long de ce trajet était c . Il s'agit d'une erreur de Michelson par rapport aux cadre d'étude qu'il s'est fixé.

¹²⁹ Albert A. Michelson and Edward W. Morley, *On the relative motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, The American Journal of Science, pp. 333-345, vol. XXXIV, nov. 1887.

¹³⁰ p.341 de la référence ci-dessus.

¹³¹ Il s'agit un fait d'un système de deux raies très proches (doublet).

interfrange. Une frange lumineuse devrait quasiment prendre la place d'une frange noire. Dans son article de 1881 Michelson concluait déjà :

Cit. L'interprétation de ces résultats est qu'il n'y a pas de déplacement des franges d'interférences. Le résultat qui suit l'hypothèse d'un éther stationnaire est donc incorrect, et la conclusion qui s'ensuit nécessairement est que cette hypothèse est fautive. Cette conclusion contredit directement l'explication du phénomène de l'aberration qui a été jusqu'ici généralement admise, et qui présuppose que la Terre se déplace à travers l'éther, ce dernier restant au repos¹³². *p. 128 (1881)*.

Dans l'expérience de 1887, l'interféromètre est monté sur un lourd plateau en pierre qui flotte sur un bain de mercure et effectue un tour complet en six minutes. Les mesures sont renouvelées à différentes heures du jour et de la nuit. Michelson et Morley établissent alors avec certitude que le mouvement de la Terre par rapport à l'éther immobile n'est pas mis en évidence : il n'y a pas de déplacement des franges d'interférences à plus de $1/40^{\text{ème}}$ d'interfrange, ce qui correspond à la précision de la mesure instrumentale. L'effet attendu dans le cadre de la théorie de Fresnel n'est pas observé. Une nouvelle optique des corps en mouvement devient nécessaire pour concilier cette observation avec la théorie ondulatoire¹³³.

XVII. Naissance de la théorie de la relativité restreinte.

Comment interpréter les conclusions de l'expérience de Michelson ? La réponse à cette question va bouleverser conceptuellement la physique.

XVII.1. Introduction : les principes de la mécanique newtonienne.

XVII.1.1 Référentiels galiléens.

La mécanique newtonienne postule l'existence de référentiels privilégiés dans lesquels le mouvement d'un point isolé est rectiligne et uniforme. Ces référentiels sont qualifiés d'inertiels ou de galiléens. Il s'ensuit que tout référentiel animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui aussi galiléen. Ces référentiels forment une classe de référentiels idéaux que l'on s'efforce de réaliser dans la pratique.

XVII.1.2. Le principe de relativité.

Le principe de relativité postule que les lois des phénomènes physiques sont indépendantes du référentiel galiléen d'analyse. En conséquence, il n'y a aucun moyen de distinguer deux référentiels galiléens par des expériences indépendantes menées dans chacun de ces référentiels¹³⁴.

¹³² The interpretation of these results is that there is no displacement of the interference bands. The result of the hypothesis of a stationary ether is thus shown to be incorrect, and the necessary conclusion follows that the hypothesis is erroneous.

This conclusion directly contradicts the explanation of the phenomenon of aberration which has been hitherto generally accepted, and which presupposes that the earth moves through the ether, the latter remaining at rest. *p. 128 (1881)*

¹³³ La contradiction avec l'expérience n'apparaît que dans le cadre de la théorie ondulatoire alors admise. Une vision corpusculaire, avec l'émission de particules lumineuses par la source, expliquerait le résultat expérimental.

¹³⁴ Enoncé en ces termes, ce principe dépasse le cadre de la mécanique newtonienne.

XVII.1.3. Les transformations galiléennes.

Soit un référentiel galiléen où les coordonnées spatiales et le temps sont notés respectivement (x,y,z,t) . Soit un second référentiel en translation rectiligne et uniforme par rapport au premier, à la vitesse v dans la direction de l'axe des x , muni du système de coordonnées (x',y',z',t') . La mécanique newtonienne postule que les coordonnées (x',y',z',t') sont liées aux coordonnées (x,y,z,t) par la loi de transformation :

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

appelée transformation de Galilée (ou galiléenne). La cinématique galiléenne fait l'hypothèse d'un temps absolu commun à tous les observateurs.

XVII.2. La théorie de Lorentz.

Pour expliquer les conclusions de Michelson, le physicien hollandais **Hendrik Antoon Lorentz** (1853-1928) postule l'existence d'une contraction réelle des longueurs dans le sens du mouvement. Il écrit¹³⁵ en 1895 :

Cit. Admettons que le bras de l'appareil de Michelson placé dans la direction du mouvement de la Terre se contracte de la quantité $lv^2/2c^2$ et que simultanément l'effet de la translation soit conforme à la théorie de Fresnel¹³⁶ : le résultat de l'expérience de Michelson est alors complètement expliqué. *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern.*

Lorentz formalise cette idée dans sa théorie électrodynamique¹³⁷ en 1904. Soit un référentiel « au repos » où les coordonnées spatiales sont notées (x,y,z) et où le temps est noté t . Soit un référentiel mobile en translation avec une vitesse uniforme par rapport au référentiel fixe. Lorentz montre que les équations de Maxwell écrites dans le référentiel mobile ont la *même forme* que dans le référentiel fixe, modulo un *choix de variables* x',y',z',t' particulier dans le référentiel mobile, et une redéfinition de certaines quantités dans ce référentiel¹³⁸.

La variable t' est appelée le *temps local* (Ortzeit) par Lorentz. Il ne s'agit pas pour lui d'un « véritable » temps et il ne lui attache pas de signification physique¹³⁹ :

¹³⁵ H.-A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Leyde, 1895, §§ 89-92, cité par R. Dugas, dans *Histoire de la Mécanique*, Editions Jacques Gabay, 1996, p. 451, ré-impression de l'édition des Editions du Griffon, Neuchatel, 1950.

¹³⁶ C'est à dire que l'éther n'est pas entraîné par la Terre.

¹³⁷ *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, Proceed. Acad. Amsterdam, vol. 6, 1904, p. 809

¹³⁸ La forme des équations est ainsi conservée à une quantité près (la densité de charge électrique). Poincaré et Einstein corrigeront ce point indépendamment et rendront les équations de Maxwell complètement covariantes par les transformations de Lorentz.

¹³⁹ H. A. Lorentz, *Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique*, Acta Mathematica, t.38, p. 293-308, 1921, et dans les Œuvres de Henri Poincaré, vol. XI., p. 248.

Cit. C'est que je n'avais pas songé à la voie directe qui y conduit, et cela tient à ce que j'avais l'idée qu'il y a une différence essentielle entre les systèmes x,y,z,t et x',y',z',t' . Dans l'un on se sert – telle était ma pensée – d'axes des coordonnées qui ont une position fixe dans l'éther et de ce qu'on peut appeler le « vrai » temps ; dans l'autre système, au contraire, on aurait affaire à de simples grandeurs auxiliaires dont l'introduction n'est qu'un artifice mathématique. En particulier, la variable t' ne pourrait pas être appelée le « temps » dans le même sens que la variable t . *Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique p. 251.*

La contraction des longueurs dans le sens du mouvement est attribuée à un aplatissement de l'électron supposé sphérique lorsqu'il est immobile. Le changement de variables proposé par Lorentz (qui sera appelé ultérieurement *Transformation de Lorentz* par Henri Poincaré¹⁴⁰) avait été proposé par Voigt en 1887, dans le cadre de la propagation des ondes¹⁴¹. Revenant sur ses propres travaux, Lorentz détaille sa démarche de la manière suivante, en commençant par faire référence à l'expérience de Michelson :

Cit. Cette fois-ci il s'agissait bien d'un effet du second ordre et il était facile de voir que l'hypothèse d'un éther immobile à elle seule ne suffit pas à l'explication du résultat négatif. J'ai été obligé à faire une nouvelle supposition qui revient à admettre que la translation d'un corps à travers l'éther produit une légère contraction du corps dans le sens du mouvement. Cette hypothèse était bien la seule possible ; elle avait aussi été imaginée par Fitzgerald et elle trouva l'approbation de Poincaré, qui cependant ne dissimula pas le peu de satisfaction que lui donnèrent les théories dans lesquelles on multiplie les hypothèses spéciales inventées pour des phénomènes particuliers. Cette critique a été pour moi une raison de plus pour chercher une théorie générale, dans laquelle les principes mêmes conduiraient à l'explication de l'expérience de M. Michelson et de toutes celles qu'on avait tentées après lui pour découvrir les effets du second ordre. Dans la théorie que je me proposais, l'absence de phénomènes dus au mouvement d'ensemble d'un système devrait être démontrée pour une valeur quelconque de la vitesse, inférieure à celle c de la lumière.

La méthode à suivre était toute indiquée. Il fallait évidemment montrer que les phénomènes qui ont lieu dans un système matériel peuvent aussi être représentés par des équations de la même forme, que le système soit en repos ou qu'il soit animé d'un mouvement de translation uniforme, cette égalité de forme étant obtenue à l'aide d'une substitution convenable de nouvelles variables. Il s'agissait de trouver les formules de transformation appropriées tant pour les variables indépendantes, les coordonnées x,y,z , et le temps t , que pour les différentes grandeurs physiques, vitesses, forces, etc., et de montrer l'invariance des équations pour ces transformations.

Les formules que j'ai établies alors pour les coordonnées et le temps peuvent être mises sous la forme

$$x' = kl(x + \varepsilon t), \quad y' = ly, \quad z' = lz, \quad t' = kl(t + \varepsilon x),$$

¹⁴⁰ Henri Poincaré, *sur la dynamique de l'électron*, Estratto dal tomo XXI (1906) dei *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, republié dans *La Mécanique Nouvelle*, ré-impression par Jacques Gabay (1989) de l'édition originale publiée par Gauthiers-Villard en 1924. p. 19.

¹⁴¹ *Über das Dopplersche Prinzip*, Göttinger Nachrichten, S. 41, 1887.

où ε , k , l sont des constantes qui cependant se réduisent à une seule¹⁴². On voit immédiatement que pour l'origine des nouvelles coordonnées ($x'=0$) on a

$$x = -\varepsilon t ;$$

ce point se déplace donc dans le système x,y,z,t avec la vitesse $-\varepsilon$ dans la direction de l'axe des x . Le coefficient k est défini par

$$k = \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}$$

et l est une fonction de ε qui a la valeur 1 pour $\varepsilon = 0$. Je l'ai d'abord laissée indéterminée, mais j'ai trouvé dans le cours de mes calculs que pour obtenir l'invariance que j'avais en vue, on doit poser $l = 1$. *Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique. pp.248-249.*

Lorentz utilise ici les notations de Poincaré. La vitesse de la lumière est prise pour unité ($c \equiv 1$). Notons v la vitesse de translation du référentiel (x', y', z') dans la direction de l'axe des x ($v = -\varepsilon$) ; avec $l = 1$, en restituant c dans les expressions, et en notant $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, on obtient l'écriture usuelle de ces transformations :

$$x' = \gamma(x - vt) , \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

Lorentz ne parvient cependant pas à une invariance complète des équations de l'électromagnétisme par ces transformations et n'énonce pas non plus la loi de composition des vitesses. Il écrit :

Cit. Ne l'ayant pas remarqué, je n'ai pas réussi à obtenir l'invariance exacte des équations ; mes formules restaient encombrées de certains termes qui auraient dû disparaître. Ces termes étaient trop petits pour avoir une influence sensible sur les phénomènes et je pouvais donc expliquer l'indépendance du mouvement de la Terre que les observations avaient révélée, mais je n'ai pas établi le principe de relativité comme rigoureusement et universellement vrai.

Poincaré, au contraire, a obtenu une invariance parfaite des équations de l'électrodynamique, et il a formulé le « postulat de relativité », termes qu'il a été le premier à employer. *Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique. p. 252.*

XVII.3. Henri Poincaré et le principe de relativité.

Le mathématicien français **Henri Poincaré** (1854 – 1912) montre que les transformations de Lorentz constituent un groupe au sens mathématique¹⁴³. Cette propriété

¹⁴² lire probablement : qui ne dépendent que d'une seule variable (ε en l'occurrence).

¹⁴³ Henri Poincaré, *sur la dynamique de l'électron*, Estratto dal tomo XXI (1906) dei *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, republié dans *La Mécanique Nouvelle*, ré-impression par Jacques Gabay (1989) de l'édition originale publiée par Gauthiers-Villard en 1924. p. ... L'article de Poincaré, bien que publié en 1906, a été reçu le 23 juillet 1905 par l'éditeur. Il est contemporain de l'article d'Einstein qui avait été reçu le 30 juin 1905 aux *Annalen der Physik*. L'article d'Einstein paraît quelques mois avant celui de Poincaré.

est directement reliée au *principe de relativité* énoncé par Poincaré¹⁴⁴. Elle lui permet de déterminer les lois de composition des vitesses¹⁴⁵. Il montre que les transformations de Lorentz ont la propriété de laisser invariante¹⁴⁶ la forme quadratique $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$. Poincaré accorde une signification physique au *temps local* de Lorentz en indiquant une méthode pour « régler les montres¹⁴⁷ ». Il introduit ensuite la contraction des longueurs, au sens de Lorentz, comme une hypothèse supplémentaire de la théorie admise à contre-cœur :

Cit. Cela malheureusement ne suffit pas, et il faut des hypothèses complémentaires ; il faut admettre que les corps en mouvement subissent une contraction uniforme dans le sens du mouvement. *La valeur de la science*. p. 133.

Poincaré énonce en ces termes le *principe de relativité* dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*¹⁴⁸ :

Cit. Il semble au premier abord que l'aberration de la lumière et les phénomènes optiques qui s'y attachent vont nous fournir un moyen de déterminer le mouvement absolu de la Terre, ou plutôt son mouvement, non par rapport aux astres, mais par rapport à l'éther. Il n'en est rien ; les expériences où l'on ne tient compte que de la première puissance de l'aberration ont d'abord échoué et l'on en a aisément découvert l'explication ; mais Michelson, ayant imaginé une expérience où l'on pouvait mettre en évidence les termes dépendant du carré de l'aberration, ne fut pas plus heureux. Il semble que cette impossibilité de démontrer le mouvement absolu soit une loi générale de la Nature. 5 juin 1905.

Dans son article¹⁴⁹ Poincaré complète les grandes lignes esquissées dans les *comptes rendus* et donne une formulation plus précise de ce principe :

Cit. Il semble que cette impossibilité de mettre en évidence expérimentalement le mouvement absolu de la Terre soit une loi générale de la Nature ; nous sommes naturellement portés à admettre cette loi, que nous appellerons *Postulat de Relativité* et à l'admettre sans restriction. Que ce postulat, jusqu'ici d'accord avec l'expérience, doive être confirmé ou infirmé plus tard par des expériences plus précises, il est en tous cas intéressant de voir quelles peuvent en être les conséquences.

Il en fait un principe aussi essentiel que le principe de conservation de l'énergie, le second principe de la thermodynamique, ou le principe de moindre action¹⁵⁰.

¹⁴⁴ par la propriété de symétrie du groupe de transformation.

¹⁴⁵ p. 38.

¹⁴⁶ p. 68.

¹⁴⁷ H. Poincaré, *La valeur de la science*, p. 127, 1905 (Coll. Champs Flammarion, 1970), p. 133, d'après une conférence donnée à Saint-Louis, en 1904. La terminologie usuelle est celle de *synchronisation* des horloges.

¹⁴⁸ *Sur la dynamique de l'électron*, tome CXL, p. 1504, séance du 5 juin 1905, republié dans *La Mécanique Nouvelle*, ré-impression par Jacques Gabay (1989) de l'édition originale publiée par Gauthiers-Villard en 1924. p. 77.

¹⁴⁹ Henri Poincaré, *sur la dynamique de l'électron*, Estratto dal tomo XXI (1906) dei *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, republié dans *La Mécanique Nouvelle*, ré-impression par Jacques Gabay (1989) de l'édition originale publiée par Gauthiers-Villard en 1924. p. 18.

¹⁵⁰ H. Poincaré, *La valeur de la science*, p. 127, 1905 (Coll. Champs Flammarion, 1970).

Une fois le *principe de relativité* énoncé, on se trouve confronté à la difficulté suivante : deux transformations distinctes des systèmes de coordonnées assurent respectivement l'invariance des lois de la mécanique newtonienne et celles de l'électromagnétisme maxwellien, respectivement les *transformations galiléennes* et les *transformations lorentziennes*¹⁵¹.

Si l'on penche, avec Poincaré et Einstein, pour une validité du principe de relativité associé au groupe de transformation de Lorentz, il faut définir une nouvelle mécanique qui satisfasse à ces transformations. S'intéressant à la gravitation Poincaré remarque que :

Cit. On trouve d'abord qu'elle [l'hypothèse de la transformation de Lorentz] nous force à supposer que la propagation de la gravitation n'est pas instantanée, mais se fait avec la vitesse de la lumière. *Sur la dynamique de l'électron p. 20.*

Il écrit un peu plus loin :

Cit. Si la propagation de l'attraction se fait à la vitesse de la lumière, cela ne peut être par une rencontre fortuite, cela doit être parce que c'est une fonction de l'éther ; et alors il faudra chercher à pénétrer la nature de cette fonction, et la rattacher aux autres fonctions du fluide. *Sur la dynamique de l'électron p. 21.*

Méditant sur cette « coïncidence », il note :

Cit. Ici il est possible qu'il y ait quelque chose d'analogue ; si nous admettions le postulat de relativité, nous trouverions dans la loi de gravitation et dans les lois électromagnétiques un nombre commun qui serait la vitesse de la lumière ; et nous le retrouverions encore dans toutes les autres forces d'origine quelconque, ce qui ne pourrait s'expliquer que de deux manières :

Ou bien il n'y aurait rien au monde qui ne fût d'origine électromagnétique.

Ou bien cette partie qui serait pour ainsi dire commune à tous les phénomènes physiques ne serait qu'une apparence, quelque chose qui tiendrait à nos méthodes de mesure. *pp 21-22.*

La vitesse de la lumière devient ainsi une constante qui structure notre univers et détermine « nos méthodes de mesure ». Poincaré entrevoit la nécessité d'une nouvelle mécanique et en donne des caractéristiques remarquables :

Cit. Peut-être aussi devons-nous construire toute une mécanique nouvelle que nous ne faisons qu'entrevoir, où, l'inertie croissant avec la vitesse, la vitesse de la lumière deviendrait une limite infranchissable. La mécanique vulgaire, plus simple, resterait, une première approximation puisqu'elle serait vraie pour les vitesses qui ne seraient pas très grandes, de sorte qu'on retrouverait encore l'ancienne dynamique sous la nouvelle. *La valeur de la science, p. 147, d'après la conférence faite à Saint-Louis en 1904.*

¹⁵¹ On peut remarquer que les *transformations lorentziennes* « tendent » vers les *transformations galiléennes* à la limite des interactions instantanées ($c \rightarrow \infty$) et on peut distinguer les deux types de transformations comme des transformations à *vitesse finie* ou *infinie*. Les transformations à vitesse finie portent sur les phénomènes électromagnétiques. Cela est lié au fait que la théorie électromagnétique considère qu'il n'y a pas d'interaction instantanée. Au contraire, la gravitation universelle de la dynamique Newtonienne fait l'hypothèse d'une interaction instantanée entre les corps et le principe de relativité y est assuré par les transformations à vitesse infinie.

Ce qu'il détaille encore de la manière suivante :

Cit. De tous ces résultats, s'ils se confirmaient, sortirait une mécanique entièrement nouvelle qui serait surtout caractérisée par ce fait qu'aucune vitesse ne pourrait dépasser celle de la lumière pas plus qu'aucune température ne peut tomber au-dessous du zéro absolu. Pour un observateur, entraîné lui-même dans une translation dont il ne se doute pas, aucune vitesse apparente ne pourrait non plus dépasser celle de la lumière ; et ce serait là une contradiction, si l'on ne se rappelait que cet observateur ne se servirait pas des mêmes horloges qu'un observateur fixe, mais bien d'horloges marquant le « temps local ». *La valeur de la science*, p. 147.

XVII.4. Einstein : les principes de la théorie de la relativité restreinte.

Les travaux de Lorentz et Poincaré cités précédemment s'inscrivent dans le cadre d'une tentative d'explication théorique de l'expérience de Michelson. **Albert Einstein** (1879-1955), âgé alors de 26 ans, employé au bureau des brevets à Berne, soumet en 1905, quelques semaines avant l'article détaillé dans lequel Poincaré livre ses calculs, l'article considéré comme fondateur de la théorie de la relativité restreinte. Il n'y a dans cet article d'Einstein intitulé « *sur l'électrodynamique des corps en mouvements* » aucune référence aux travaux antérieurs de Poincaré et de Lorentz. Einstein attribue un caractère cinématique à la contraction des longueurs. À l'opposé de Poincaré, Einstein traite d'objets (électrons) ponctuels et s'attaque au cadre cinématique, c'est-à-dire à nos mesures du temps et de l'espace, pour interpréter les transformations de Lorentz. La théorie développée par Einstein porte le nom de *relativité restreinte* car elle s'attache à la description des phénomènes physiques dans le cadre des référentiels inertiels. Einstein attribue l'origine de sa théorie à la remarque suivante¹⁵² :

Cit. On sait que l'électrodynamique de Maxwell – telle qu'on la conçoit habituellement aujourd'hui – conduit, lorsqu'on l'applique à des corps en mouvement, à des asymétries, qui ne semblent pas inhérentes aux phénomènes. Que l'on songe, par exemple, à l'interaction électromagnétique entre un aimant et un conducteur. Le phénomène observable ne dépend ici que du mouvement relatif du conducteur et de l'aimant, alors que, selon la conception usuelle, il convient de distinguer très nettement les deux cas, selon que c'est l'un ou l'autre de ces deux corps qui est en mouvement. En effet, si c'est l'aimant qui se déplace et le conducteur qui est au repos, il apparaît au voisinage de l'aimant un champ électrique dont l'énergie a une certaine valeur, et qui engendre un courant aux endroits où se trouvent des portions du conducteur. Mais si c'est l'aimant qui est au repos et le conducteur qui est en mouvement, il n'apparaît aucun champ électrique au voisinage de l'aimant ; en revanche, il apparaît dans le conducteur une force électromotrice, à laquelle ne correspond aucune énergie intrinsèque, mais qui – à supposer que le mouvement relatif soit le même dans les deux cas considérés – donne naissance à des courants électriques de même intensité et de même évolution temporelle que ceux produits par les forces électriques dans le premier cas. p. 31.

¹⁵² A. Einstein, *Sur l'électrodynamique des corps en mouvements*, Œuvres Choisies, vol. 2, Relativités I, Françoise Balibar, Sources du Savoir, Seuil/CNRS, 1993. Article original in *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905, p. 891-921.

C'est la conception du principe de relativité galiléen qui induit cette asymétrie dans l'explication de l'induction électromagnétique pour Einstein. A la suite, il mentionne indirectement l'expérience de Michelson et isole les deux principes qui vont lui permettre d'édifier sa théorie :

Cit. Des exemples du même genre, ainsi que les vaines tentatives en vue de mettre en évidence un mouvement de la Terre relativement au « milieu lumineux », conduisent à conjecturer qu'au concept de repos absolu ne correspond aucune propriété des phénomènes, non seulement dans le domaine de la mécanique, mais aussi dans celui de l'électrodynamique ; plus même, dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont valables, ce sont également les mêmes lois de l'optique et de l'électrodynamique qui sont valables – comme cela a été démontré pour les quantités du premier ordre. Nous allons élever cette conjecture (dont le contenu sera ensuite appelé « principe de relativité ») au rang de postulat, et au surplus introduire le postulat, qui n'est qu'apparemment incompatible avec le précédent, selon lequel la lumière se propage dans l'espace vide toujours avec une vitesse V bien déterminée, indépendante de l'état de mouvement du corps émetteur. Ces deux postulats suffisent pour parvenir à une électrodynamique des corps en mouvements, simple et exempte de contradictions, fondée sur la théorie de Maxwell pour les corps au repos. *p. 31.*

En conséquence :

Cit. L'introduction d'un « éther lumineux » se révélera superflue, dans la mesure où, dans la conception qui va être développée, il ne sera pas introduit d'« espace au repos absolu » doté de propriétés particulières, pas plus qu'il ne sera attribué de vecteur vitesse à un point de l'espace vide où se produisent des processus électromagnétiques. *p. 31.*

Einstein introduit ainsi les deux principes clés de sa théorie :

Cit. Les considérations qui suivent s'appuient sur le principe de relativité et sur le principe de la constance de la vitesse de la lumière, deux principes que nous définissons comme suit :

- 1- Les lois selon lesquelles les états des systèmes physiques évoluent sont indépendantes du fait que ces évolutions soient rapportées à l'un ou l'autre de deux systèmes de coordonnées qui se trouvent être en mouvement de translation uniforme l'un relativement à l'autre.
- 2- Tout rayon lumineux se déplace dans le système « au repos » avec la vitesse bien déterminée V , indépendamment du fait que ce rayon soit émis par un corps au repos ou en mouvement. Pour cette vitesse, on a :

Vitesse = trajet de la lumière/durée du temps,

L'expression « durée dans le temps » doit être entendue au sens de la définition du paragraphe 1¹⁵³. *p. 34.*

Il établit alors les transformations qui permettent de passer d'un référentiel à l'autre, ré-obtenant les transformations de Lorentz. La suite de l'article est consacrée à l'établissement de la loi de la composition des vitesses, aux transformations des équations de Maxwell, à une

¹⁵³ Paragraphe où Einstein introduit la synchronisation des horloges.

théorie relativiste de l'effet Doppler et de l'aberration, et à la formulation des équations dynamiques de l'électron.

La lumière a donc joué un rôle décisif dans l'élaboration de la théorie de la relativité restreinte. C'est encore elle qui est à l'origine des conceptions d'Einstein sur l'équivalence de la masse et de l'énergie, la célèbre loi $E=mc^2$ qu'il expose dans l'article intitulé *l'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie*¹⁵⁴ ? L'établissement de cette relation se fait dans le cadre relativiste. Il en donne une démonstration tardive plus simple en 1946¹⁵⁵.

XVIII. Planck et la quantification.

XVIII.1. Le second principe de la thermodynamique.

Le physicien allemand **Max Planck** (1858-1947) est à la recherche d'une définition générale de l'entropie. L'entropie est une notion contemporaine de Planck. Elle est issue des travaux de **Rudolph Clausius** (1822-1888) publiés en 1876 qui font suite à ceux du physicien français **Sadi Carnot** (1796-1832). Planck donne plus de généralité à la définition de l'entropie dans sa thèse de 1879. L'entropie S d'un système est donnée par l'expression

$$S = S_0 + \int \frac{\delta Q}{T}$$
, où S_0 est une constante arbitraire, T est la température du système, et δQ est la variation élémentaire de la quantité de chaleur reçue par le système, au cours des transformations élémentaires envisagées qui amènent le système de son état initial à son état final. Le second principe de la thermodynamique stipule que $S' - S \geq 0$, où S est l'entropie du système à un instant t et S' son entropie à un instant ultérieur. Ce principe rend compte du caractère directionnel des échanges d'énergie au sein d'un système subissant une transformation irréversible : il interdit notamment le passage de la chaleur d'un corps froid vers un corps plus chaud. D'autre part, l'équilibre thermodynamique d'un système correspond au maximum de son entropie.

La recherche d'une définition fondamentale de l'entropie, moins phénoménologique, nécessite une représentation des phénomènes à l'échelle microscopique. Une telle représentation se fait jour dans la théorie des gaz. Or la théorie atomique, mécanique, des gaz ne peut rendre compte à elle seule de l'irréversibilité des transformations : les équations mécaniques qui décrivent ces systèmes sont réversibles par rapport au temps. Un processus évoluant d'une certaine manière devrait pouvoir être « retourné » temporellement. L'hypothèse atomique de la matière, par ailleurs encore très discutée par les physiciens, est utilisée par **Ludwig Boltzmann** (1844 - 1906) dans ses travaux pionniers sur l'étude des gaz. Boltzmann établit une connexion entre la notion d'entropie et celle de probabilité¹⁵⁶. Planck écrit à ce propos¹⁵⁷ :

Cit. Cette étape : achever l'affranchissement de l'idée d'entropie du domaine de l'expérience des hommes et l'élévation de ce fait de la seconde loi à un véritable principe, fut l'œuvre scientifique de la vie de Ludwig Boltzmann. Pour dire les choses brièvement, cela consistait en général à rapporter l'idée d'entropie à l'idée de probabilité [...]. La nature préfère les états les plus probables aux moins probables,

¹⁵⁴ Einstein, *Œuvres choisies*, p. 60. *Annalen der Physik*, vol. XVIII, 1905, p. 639-641.

¹⁵⁵ Einstein. *Œuvres Choisies*. pp. 69-71. *Technion Journal*, n°5, 1946, p. 16-18.

¹⁵⁶ Ludwig Boltzmann, *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht*, in *Graz Sitzb. D. Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissen Cl. LXXVI, Abt II*, 1877, pp. 373-435.

¹⁵⁷ Max Planck. *Eight Lectures on Theoretical Physics*. Dover Publications. 1998. reprint. delivered at Columbia University in 1909, Columbia University Press 1915.

parce que les processus s'y déroulent dans le sens d'une plus grande probabilité¹⁵⁸.
Eight Lectures on Theoretical Physics. p. 44.

Boltzmann introduit une quantification de l'énergie cinétique des molécules d'un gaz : cette énergie est un nombre entier de fois une quantité donnée, notée ε . Mais pour Boltzmann cette quantification n'est qu'une étape « pédagogique » pour introduire les calculs probabilistes développés ensuite pour une distribution continue de l'énergie cinétique des molécules.

XVIII.2. Le « corps noir ».

Un corps chauffé émet une lumière dont la composition dépend de la température du corps. Le corps change ainsi de couleur quand on le chauffe, allant du rouge au bleu (pour des températures très élevées).

VIDÉO

Considérons des corps de compositions variées placés dans un four isolé thermiquement du milieu extérieur, percé d'un petit trou afin qu'une petite partie du rayonnement puisse en sortir et être analysée spectralement¹⁵⁹. Le spectre obtenu présente la caractéristique remarquable de ne dépendre *que* de la température du four et non pas de sa constitution ni de la nature des corps qu'il contient. En conséquence la densité d'énergie lumineuse u_λ dans le four est une *fonction universelle* de la longueur d'onde. Cette particularité est relevée en 1860 par le physicien allemand **Gustav Kirchoff** (1824 – 1887). Cette répartition serait la même que celle du rayonnement issu d'un four dont les parois seraient totalement absorbantes pour toutes les longueurs d'ondes (noircies), d'où le nom de « corps noir ».

La lumière se trouve en équilibre thermique avec le four. Les ondes électromagnétiques sont émises et absorbées par les matériaux, et un régime stationnaire est atteint, correspondant à un état d'équilibre pour lequel il y a autant d'émission que d'absorption de rayonnement.

Le physicien allemand **Wilhelm Wien** (1864-1928) donne en 1896 une relation semi-empirique modélisant la distribution d'énergie spectrale du corps noir par la relation :

$$u_\lambda d\lambda = b\lambda^{-5} \exp\left(-\frac{\beta\nu}{T}\right) d\lambda \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique et a et b sont des constantes. Exprimée en terme de fréquence $\nu = c/\lambda$ où c est la vitesse de la lumière dans la cavité, cette relation devient¹⁶⁰

$$u_\nu d\nu = \alpha\nu^{-3} \exp\left(-\frac{\beta\nu}{T}\right) d\nu \quad (2)$$

¹⁵⁸ This step : to have completed the emancipation of the entropy idea from the experimental art of man and the elevation of the second law thereby to a real principle, was the scientific life's work of Ludwig Boltzmann. Briefly stated, it consisted in general of referring back the idea of entropy to the idea of probability [...]. Nature prefers the more probable states to the less probable, because in nature processes take place in the direction of greater probability

¹⁵⁹ en mesurant la répartition de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde. Voir par exemple la description du problème du corps noir dans : *Les atomes*, Jean Perrin, 1913, collection Champs Flammarion, 1991. pp 209-220.

¹⁶⁰ avec $d\lambda = -d\nu/\nu^2$

où α et β sont des constantes et où u_ν désigne la densité d'énergie lumineuse par unité de fréquence.

XVIII.3. Planck et le problème du corps noir.

Planck obtient en 1894 un poste de professeur à l'université de Berlin qui le rapproche des chercheurs s'intéressant alors au problème du corps noir. Le problème consiste à déterminer la fonction u_λ , à la fois d'un point de vue expérimental de façon à obtenir des mesures dans l'infrarouge à $10\mu\text{m}$, et à interpréter théoriquement le phénomène. On s'attend à ce que la thermodynamique et la théorie électromagnétique de Maxwell apportent une solution à ce problème. La recherche de cette solution va beaucoup occuper Planck :

Cit. Ainsi, ce que l'on a appelé la distribution normale du spectre d'énergie représente quelque chose d'absolu, et comme j'avais toujours considéré la recherche de l'absolu comme le but suprême de toute activité scientifique, je me mis à l'ouvrage. *Max Planck. Autobiographie scientifique*¹⁶¹. p. 85.

Puisque ce problème relève d'un équilibre thermique, Planck fonde son approche sur l'entropie. La courbe spectrale recherchée ne dépendant pas de la nature de la cavité, Planck la modélise par des parois parfaitement réfléchissantes constituées de *résonateurs*, c'est-à-dire de dipôles hertziens vibrant dans le champ de l'onde incidente et rayonnant de l'énergie dans toutes les directions. Les résonateurs de Planck sont faiblement amortis et ont la propriété de changer aléatoirement d'amplitude et de phase, introduisant ainsi de l'irréversibilité. C'est l'hypothèse du « rayonnement naturel » de Planck. Après un certain nombre de calculs, Planck détermine la relation entre l'énergie moyenne d'un résonateur de fréquence ν , notée U , et de la densité u d'énergie électromagnétique dans la cavité. Il pose¹⁶² alors la définition suivante de l'entropie S d'un résonateur dans le champ de rayonnement :

$$S = - \frac{U}{a\nu} \ln \frac{U}{b\nu} \quad (3)$$

où a et b sont deux constantes universelles. Cette fonction a la même forme que la fonction $f \ln f$ utilisée par Boltzmann pour établir son « théorème H ». L'expression (3) semble ainsi fournir une base pour définir une entropie liée au rayonnement. Planck suppose un transfert infinitésimal d'entropie d'un oscillateur de fréquence ν à un résonateur de fréquence ν_1 quelconque, tout le reste étant inchangé, à l'état d'équilibre. Il obtient¹⁶³ ainsi que la quantité $-\frac{1}{a\nu} \ln \frac{U}{b\nu} = \frac{1}{\theta}$ est une constante. Par intégration, il en déduit l'expression de l'énergie moyenne d'un résonateur de fréquence ν , $U = b\nu \exp\left(-\frac{a\nu}{\theta}\right)$ et par la relation de cette quantité avec la densité d'énergie électromagnétique, Planck retrouve la loi de Wien¹⁶⁴. θ s'identifie à la température thermodynamique du système et les constantes a et b sont déterminées à partir des données expérimentales. Elles conduisent Planck à proposer des unités de mesures « universelles » (cf. § 6.4).

¹⁶¹ Max Planck. *Autobiographie scientifique et derniers écrits*, Collection Champs Flammarion, 1991. Intr., trad. et notes André George.

¹⁶² Max Planck. *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge*. *Annalen der Physik*. Vol. 1, 1900, p. 69-112.

¹⁶³ p. 110, relation (50).

¹⁶⁴ p 116, relation (55).

Planck remarquait dans le même article qu'une définition de l'entropie par $S = -\frac{U}{f(\nu)} \ln \frac{U}{\varphi(\nu)}$ eût été compatible à ses attentes et aurait conduit à une formule plus générale que celle de Wien. Il recherche un fondement théorique à la définition *ad hoc* qu'il a choisie pour l'entropie espérant démontrer ainsi l'unicité de son choix. Considérant un oscillateur dont l'énergie moyenne est décalée d'une petite quantité ΔU autour de sa valeur stationnaire U_0 correspondant à l'équilibre thermodynamique, Planck en déduit l'expression de la variation infinitésimale d'entropie¹⁶⁵ totale du rayonnement :

$$dS_t = dU \cdot \Delta U \cdot \frac{3}{5} \frac{d^2S}{dU^2}$$

L'évolution de dU avec le temps est donnée par l'équation différentielle décrivant le résonateur. Il met l'expression précédente sous la forme :

$$dS_t = -dU \cdot \Delta U \cdot f(U)$$

où $f(U) = -\frac{d^2S}{dU^2}$ est une fonction positive de l'énergie.

Planck fait alors l'hypothèse que les variations infinitésimales d'entropie de n résonateurs chacun soumis à la même variation ΔU de leur énergie moyenne, s'additionnent. Il en déduit :

$$dU_n \cdot \Delta U_n \cdot f(U_n) = n dU \cdot \Delta U \cdot f(U)$$

avec $U_n = nU$, $dU_n = ndU$ et $\Delta U_n = n \Delta U$, d'où :

$$f(nU) = \frac{1}{n} f(U)$$

soit

$$f(U) = \frac{\text{const}}{U}$$

d'où

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{U}$$

Deux intégrations successives conduisent à la relation (3). Ainsi Planck estime-t-il avoir démontré l'unicité de sa définition de l'entropie.

XVIII.4. Nouvelles données expérimentales et nouvelles difficultés.

Les difficultés surviennent peu après, au cours du mois de septembre 1900. Les physiciens expérimentateurs **Otto Lummer** (1860-1925) et **Ernst Pringsheim** (1859-1917) étendent les mesures du rayonnement du corps noir dans l'infra-rouge et montrent que la loi de Wien ne modélise plus convenablement les données vers $10 \mu m$. **Heinrich Rubens** (1865-1922) et **Ferdinand Kurlbaum** (1857-1927) étendent les mesures jusqu'à $60 \mu m$ et confirment l'écart entre la loi de Wien et les données. Rubens communique ses résultats à son

¹⁶⁵ M. Planck, *Entropie und Temperatur strahlender Wärme*, Annalen der Physik. reçu 22 mars 1900. p.730

ami Max Planck, lequel traite dans un premier temps le problème de manière empirique. Planck modifie de manière *ad hoc* ses travaux précédents. Lors de la séance du 16 octobre 1900 de la Société allemande de physique durant laquelle Rubens communique ses résultats, Planck explique à propos de la relation $\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{U}$ à laquelle il était parvenu dans ses précédents travaux¹⁶⁶ :

Cit. Dans cette équation fonctionnelle le terme de droite représente sans aucun doute le changement d'entropie dont il est question, parce que se déroulent des processus similaires indépendants, dont les variations d'entropie s'additionnent simplement pour cette raison. Il est en revanche fort possible, bien que pour des raisons encore peu claires et en tout cas difficilement vérifiables, que le membre de gauche de la relation ne possède pas la signification générale que je lui ai précédemment attribuée, en d'autres termes, que les valeurs de U_n , dU_n et ΔU_n ne suffisent pas à elles seules, afin de déterminer la variation d'entropie recherchée, mais qu'il faille aussi pour cela connaître la valeur de U elle-même. A la suite de ces réflexions j'en suis venu à la conclusion qu'il me fallait construire une relation totalement arbitraire pour l'entropie qui, bien que plus compliquée que la relation qui mène à la loi de Wien, satisfasse comme celle-ci de la même manière à toutes les exigences des théories thermodynamiques et électromagnétiques.

Parmi les relations ainsi établies j'en remarquai cependant une particulière, qui se rapprochait le plus simplement de la relation de Wien, et qui, puisque celle-ci ne suffit pas pour rendre compte de toutes les observations, gagnerait probablement à être examinée de plus près. On aboutit au même résultat, quand on pose

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{U(\beta+U)} \quad (4)$$

C'est de loin l'expression la plus simple de toutes celles pour lesquelles S s'exprime comme une fonction logarithmique de U (ce qu'implique d'accepter le calcul des probabilités) et qui en outre pour les petites valeurs de U redonne l'expression de Wien ci-dessus. En utilisant la relation

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}$$

et la loi de « déplacement » de Wien on obtient la formule du rayonnement à deux constantes¹⁶⁷

¹⁶⁶ Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft im Jahre 1900, Leipzig, 1900, p. 202-204.

¹⁶⁷ In jener Functionalgleichung stellt der Ausdruck auf der rechten Seite (sicher?) die gennante Entropieänderung dar, weil sich (in?) (ganz?) gleich Vorgänge unabhängig voneinander abspielen, deren Entropieänderungen sich daher einfach addiren müssen.

Dagegen (würde?) ich es wohl für möglich, wenn auch immer noch (für nicht leicht) begreiflich und jedenfalls schwer beweisbar (ansetzen?), dass der Ausdruck links nicht allgemein die ihm früher (vor, von?) mir zugeschriebene Bedeutung besitzt, mit anderen Worten, dass die Werte von U_n , dU_n , und ΔU_n gar nicht hinreichen, um die fragliche Entropieänderung zu bestimmen, sondern dass dazu auch U selber bekannt sein muss. Im Verfolg dieses Gedankes bin ich schliesslich dahin gekommen, ganz willkürlich Ausdrücke für die Entropie zu construiren, welche, obwohl complicirter als der Wien'schen Ausdruck, doch allem Anforderungen der thermodynamischen und elektromagnetischen Theorie ebenso vollkommen Genüge zu leisten scheinen wie (dieser).

$$E = \frac{c\lambda^{-5}}{\exp[\frac{c}{\lambda T}] - 1}$$

Suivant que U est plus grand ou plus petit que β dans la relation (4), on obtient deux comportements asymptotiques différents du système. Dans le cas $U \gg \beta$, Planck retrouve la relation qui l'avait conduit à la loi de Wien¹⁶⁸. Dans le cas contraire, il trouve une relation qui modélise les données expérimentales dans l'infrarouge.

Il est important de noter que comme Planck le reconnaît lui-même, sa recherche porte sur une forme logarithmique de l'entropie. La raison en est que cette forme est privilégiée dans la théorie de Boltzman fondée sur le calcul des probabilités. Or il n'est alors aucunement question d'introduire alors explicitement un calcul probabiliste ; celui-ci apparaît en quelque sorte comme en filigrane des travaux de Planck.

Le succès expérimental de la loi à laquelle parvient Planck a pour contrepartie de ruiner ses efforts théoriques, car il s'est vu contraint de modifier sa loi empiriquement. Il lui faut donc formuler une nouvelle théorie.

XVIII.5. L'article où Planck introduit la quantification.

Dans son article de 1901 portant sur *la loi de la distribution d'énergie du spectre normal*¹⁶⁹, Planck rend compte de sa démarche de la manière suivante :

Cit. Dans la suite nous décrirons ainsi un moyen par lequel obtenir une expression nouvelle et plus simple de l'entropie et par-là également une nouvelle formule du rayonnement, qui soit sans contradiction avec les faits expérimentaux établis jusqu'ici¹⁷⁰. p. 555.

Planck utilise l'hypothèse d'ergodicité et assimile la valeur de l'énergie moyenne U d'un résonateur prise dans le temps à la valeur moyenne à un instant donné des énergies de N oscillateurs identiques et indépendants. Ainsi, l'énergie moyenne U d'un résonateur est reliée à l'énergie U_N du système par $U_N = NU$ et il définit de manière analogue l'entropie moyenne S d'un résonateur par $S_N = NS$ où S_N est l'entropie du système des N résonateurs dans le

Unter der so aufgestellten Ausdrücken ist mir nun einer besonders (aufgefallen ?), der dem Wien'schen an Einfachheit am nächsten (kommt), und der, da letzterer nicht hinreicht, um alle Beobachtungen darzustellen, wohl verdienen würde, daraufhin näher geprüft werden. Derselbe ergibt sich, wenn man setzt :

$$d^2S/dU^2 = \alpha/(U(\beta+U))$$

Es ist bei weitem der einfachste unter allen Ausdrücken welche S als logarithmische Function von U liefern (was anzunehmen die Wahrscheinlichkeitsrechnung nahe legt) und welche ausserdem für kleine Werte von U in den obigen Wien'schen Ausdruck übergehen. Mit Benutzung der Beziehung

$$dS/dU = 1/T$$

und des Wien'schen « Verschiebungs » gesetzes erhält man hieraus die zweiconstantige Strahlungsformel :

$$E = C\lambda^{-5} / (e^{c/\lambda T} - 1)$$

¹⁶⁸ Pour une discussion de la signification physique de cette très importante relation (4), voir par exemple l'article *Quanta de Planck, d'Einstein et d'« aujourd'hui »*, C. Bracco, J.-P. Provost, à paraître dans le Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales, avril 2005.

¹⁶⁹ *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*, Annalen der Physik, vol. IV, 1901, pp. 553-563.

¹⁷⁰ Im Folgenden wird nun ein Weg beschrieben, auf dem sich ein neuer einfacher Ausdruck der Entropie und damit auch eine neue Strahlungsformel ergibt, welche mit keiner der bisher festgestellten Thatsachen in Widerspruch zu stehen scheint.

rayonnement. Planck s'appuie sur les travaux de Boltzmann en théorie cinétique des gaz pour définir l'entropie :

Cit. Nous définissons maintenant l'entropie S_N du système, à une constante additive arbitraire près, comme étant proportionnelle au logarithme de la probabilité W , pour que les N résonateurs possèdent ensemble l'énergie U_N , alors :

$$S_N = k \ln W + \text{const.} \quad (5)$$

Cette détermination provient à mon avis de la définition de la probabilité W ; cependant nous ne trouvons aucun fondement dans les hypothèses sur lesquelles repose la théorie électromagnétique du rayonnement, pour donner un sens déterminé à une telle probabilité.

Concernant l'opportunité de la détermination précédente, laissons-nous conduire par *a priori* sa simplicité et sa proche parenté avec une loi issue de la théorie cinétique des gaz¹⁷¹. p. 556.

Tout le problème consiste désormais à définir la probabilité W dont il est question¹⁷². Pour définir celle-ci, au sens de Planck, il est nécessaire de mener un calcul combinatoire qui manipule par essence des quantités *discrètes*, c'est-à-dire des nombres entiers bien déterminés. Dans le problème du corps noir, il est alors *nécessaire* de discrétiser une grandeur caractéristique du problème. Or l'énergie d'un système de résonateurs joue un rôle déterminant. Planck fait la proposition suivante :

Cit. Il importe désormais de trouver pour cela la probabilité W pour que les N résonateurs possèdent ensemble l'énergie U_N . À cet effet il est nécessaire de concevoir U_N non pas comme une grandeur continue, indéfiniment divisible, mais comme une grandeur discrète, constituée d'un nombre entier de parties finies identiques. Désignons par élément d'énergie ε une telle partie, de cette manière nous posons par conséquent :

¹⁷¹ Wir setzen nun die Entropie SN des Systems, bis auf eine willkürlich bleibende additive Constante, proportional dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit W dafür, dass die N Resonatoren insgesamt die Energie UN besitzen, also:

$$SN = k \log W + \text{const.}$$

Diese Festsetzung kommt nach meiner Meinung im Grunde auf der Definition der genannten Wahrscheinlichkeit W hinaus; denn wir besitzen in den Voraussetzungen, welche der elektromagnetischen Theorie der Strahlung zu Grunde liegen, gar keinen Anhaltspunkt, um von einer solchen Wahrscheinlichkeit in einem bestimmten Sinne zu reden. Für die Zweckmäßigkeit der so getroffenen Festsetzung lässt sich von vornherein ihre Einfachheit und ihre nahe Verwandtschaft mit einem Satze der kinetischen Gastheorie anführen.

¹⁷² En fait, Planck ne définit pas une probabilité, au sens mathématique, mais calcule dans ce qui suit un nombre de combinaisons. Ce nombre ne sera pas ramené à la somme de toutes les combinaisons possibles (exprimé par un terme comme $P_i = W_i/\Sigma W_i$) et ne caractérise donc pas à proprement parler une probabilité (qui doit vérifier $\Sigma P_i = 1$). Cela fait apparaître en conséquence, via le logarithme, une constante arbitraire dans l'expression de l'entropie ($\log W_i = \log P_i + \log (\Sigma W_i)$). Or celle-ci n'est définie qu'à une constante arbitraire près. Planck fixera la constante à zéro. L'ajustement de cette constante, obtenue en utilisant une notion détournée des probabilités, permet à Planck de donner une *définition absolue* de l'entropie en accord avec le postulat de Nernst. Il en fait un point fondamental de son raisonnement (Max Planck. *The theory of heat radiation*. Dover Publications. New York. 1991. Translation of the second edition of *Waermestrahlung* as originally published by P. Blakiston Son & Co., 1914. pp. 119-120), d'où découle l'introduction de la quantification dans le problème du corps noir.

$$U_N = P \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

où P est un nombre entier, grand en général, tandis que nous passons pour l'heure sur la valeur de ε .

Il est maintenant clair, que la distribution des P éléments d'énergie sur les N résonateurs ne peut résulter que d'un nombre fini déterminé de combinaisons. Nous appelons chacune des combinaisons de la distribution une „complexion“ d'après une définition de L. Boltzmann nécessitée par un concept semblable¹⁷³. pp. 556-557.

Ainsi Planck introduit-il la *quantification* par la discrétisation de l'énergie totale d'un système de N résonateurs identiques, répartie par « paquets » élémentaires de valeur ε sur les oscillateurs individuels. Il prend l'exemple de $N=10$ résonateurs partageant $P=100$ « éléments d'énergie ». Il numérote les résonateurs par des chiffres de 1 à 10 et indique en-dessous la répartition possible de l'énergie sur chaque résonateur en nombre de fois la quantité ε . Il donne l'exemple suivant :

Résonateur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε	7	38	11	0	9	2	20	4	4	5

Une complexion est caractérisée par la suite de nombres de la ligne du dessous, soit dans l'exemple précédent, par la suite de $N=10$ nombres (7,38,11,0,9,2,20,4,4,5) dont la somme vaut $P=100$. Une complexion obtenue par permutation de chiffres identiques à partir d'une autre est considérée comme différente (ici en échangeant la place des 4). Le nombre de complexions R qui caractérise les différentes manières de distribuer les éléments d'énergie sur les résonateurs s'obtient alors pas un calcul classique de probabilités¹⁷⁴ :

$$R = \frac{(N+P-1)!}{(N-1)!P!}$$

qui s'écrit, en utilisant la formule approchée de Stirling:

$$R = \frac{(N+P)^{(N+P)}}{N^N P^P}$$

Planck identifie la « probabilité » W avec ce nombre de complexions R . Il en appelle au verdict de l'expérience pour tester la validité de cette hypothèse. En reportant l'expression

¹⁷³ Es kommt nun darauf an, die Wahrscheinlichkeit W dafür zu finden, dass die N Resonatoren insgesamt die Schwingungsenergie U_N besitzen. Hierzu ist es notwendig, U_N nicht als eine stetige, unbeschränkt teilbare, sondern als eine discrete, aus einer ganzen Zahl von endlichen gleichen Teilen zusammengesetzte Grösse aufzufassen. Nennen wir einen solchen Teil ein Energieelement ε , so ist mithin zu setzen :

$$U_N = P \cdot \varepsilon,$$

wobei P eine ganze, im allgemeinen grosse Zahl bedeutet, während wir den Wert von ε noch dahingestellt sein lassen.

Nun ist einleuchtend, dass die Verteilung der P Energieelemente auf die N resonatoren nur auf eine endliche ganz bestimmte Anzahl von Arten erfolgen kann. Jede solche Art der Verteilung nennen wir nach einem von L. Boltzmann für einen ähnlichen Begriff gebrauchten Ausdruck eine „Complexion“.

¹⁷⁴ cf. description par exemple dans Planck, *Theory of Heat Radiation*, 1914, § Fundamental definitions and laws. Hypothesis of Quanta. p. 113. reprint Dover.

de R précédente dans l'expression (5) de l'entropie, avec la quantification (6), Planck obtient moyennant « une valeur appropriée de la constante » l'expression suivante de l'entropie :

$$S = k \left(\left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right) \quad (7)$$

Planck montre indépendamment que l'entropie S doit être une fonction de $\frac{U}{\nu}$ seulement

$$S = f\left(\frac{U}{\nu}\right) \quad (8)$$

Pour se faire, il utilise la loi de déplacement de Wien, la définition $\frac{dS}{dU} = \frac{1}{\theta}$ de la température θ , et surtout l'expression obtenue dans ses articles précédents reliant l'énergie moyenne U d'un résonateur de fréquence ν avec le rayonnement électromagnétique de densité u_ν :

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U \quad (9)$$

Le modèle utilisé dans cette partie fait l'hypothèse d'échanges continus d'énergie entre résonateurs et rayonnement. Planck superpose ainsi dans le corps du même article deux modèles *a priori* incompatibles puisque la quantification entraîne la discrétisation d'échanges supposés ici continus¹⁷⁵.

Identifiant les expressions (7) et (8) de l'entropie, Planck établit la proportionnalité de l'élément d'énergie ε avec la fréquence ν du résonateur. Il note h la constante de proportionnalité et obtient la célèbre relation¹⁷⁶ :

$$\varepsilon = h\nu \quad (10)$$

Cette relation signifie que les échanges d'énergie se font de manière quantifiée entre les résonateurs et le rayonnement électromagnétique¹⁷⁷, par paquets de valeur $h\nu$.

Planck reporte l'expression (10) de ε dans l'expression (7) de l'entropie, utilise la relation $dS/dU = 1/\theta$, qu'il intègre pour avoir l'expression de U , et qu'il relie par (9) la densité d'énergie électromagnétique u_ν dans la cavité :

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k\theta}\right) - 1}$$

¹⁷⁵ Ce point a été soulevé par Einstein. C'est un point important du raisonnement : il se trouve que d'autant que l'on s'intéresse à la valeur moyenne de l'état d'énergie d'un oscillateur harmonique, les calculs classiques et « quantiques » donnent la même expression. C'est grâce cette « coïncidence » que le raisonnement de Planck fonctionne.

¹⁷⁶ p. 561

¹⁷⁷ Planck n'insiste pas sur cet aspect dans cet article.

C'est la relation empirique trouvée précédemment, qui correspondait aux données ; h et k sont deux constantes universelles déduites des mesures :

$$h = 6.55 \cdot 10^{-27} \text{ erg.sec,}$$

$$k = 1.346 \cdot 10^{-16} \text{ erg.K}^{-1}$$

Planck ne cherche alors pas encore d'interprétation de la constante h qu'il désignera ensuite comme étant un *quantum d'action* du fait de sa dimension, qui est celle d'une action (cf §X.2. sur Maupertuis). La constante k est baptisée par Planck constante de Boltzmann en hommage à ce dernier.

XVIII.6. Quelques approfondissements.

XVIII.6.1 Entropie.

En 1909, dans le cadre de ses conférences à l'Université de Columbia, Planck accentue le lien entre la définition de l'entropie et la théorie atomique de la matière :

Cit. La première exigence est l'introduction de l'hypothèse atomique dans le système de la physique. Car, si l'on veut pouvoir parler de la probabilité d'un état physique, c'est-à-dire, si l'on veut introduire la probabilité pour un état donné comme une quantité déterminée dans les calculs, on ne peut le faire, comme dans tous calculs probabilistes, qu'en rapportant l'état à une diversité de possibilités ; c'est-à-dire en considérant un nombre fini de configurations (complexions) également probables au travers desquelles l'état considéré peut être obtenu¹⁷⁸. *Eight lectures on theoretical physics. p. 44.*

Cela entraîne la nécessité de considérer le système comme « constitué de nombreux éléments discrets homogènes¹⁷⁹ [...] et nous devons regarder par conséquent tous les corps dans la nature, du moins s'ils possèdent une entropie, comme constitués d'atomes ». Ainsi en est-il des échanges d'énergie entre matière et rayonnement :

Cit Si l'entropie de la chaleur rayonnante doit être reliée à la notion de probabilité, nous sommes contraints, d'une manière similaire à celle décrite ci-dessus, d'arriver à la conclusion que la conception atomiste a un sens précis pour la chaleur rayonnante. Mais, puisque la chaleur rayonnante n'a pas de relation directe avec la matière, il s'ensuit que cette conception atomiste se rattache non pas à la matière, mais seulement à l'énergie, et de là, que dans le rayonnement de chaleur certains éléments d'énergie jouent un rôle essentiel¹⁸⁰. *Eight lectures on theoretical physics. p. 46.*

¹⁷⁸ The first requirement is the introduction of the atomic hypothesis into the system of physics. For, if one wishes to speak of the probability of a physical state, i.e., if one wishes to introduce the probability for a given state as a definite quantity into the calculation, this can only be brought about, as in cases of all probability calculations, by referring the state back to a variety of possibilities; i.e., by considering a finite number of a priori equally likely configurations (complexions) through each of which the state considered may be realized.

¹⁷⁹ p. 45

¹⁸⁰ If the entropy of the radiant heat is to be referred back to the notion of probability, we are forced, in a similar way as above, to the conclusion that for radiant heat the atomic conception possesses a definite meaning. But, since radiant heat is not directly connected with matter, it follows that this atomistic conception relates, not to matter, but only to energy, and hence, that in heat radiation certain energy elements play an essential rôle.

Non seulement l'hypothèse de la quantification apparaît désormais incontournable à Planck en 1909, mais elle lui semble naturelle. D'autre part elle ne revêt pas le caractère « révolutionnaire » que lui confère Einstein (*cf* § XIX). Planck écrit à la suite :

Cit. Il n'est rien qui ne nécessite, à mon avis du moins, de considérer comme atomiques les processus de la chaleur dans un vide complet, et il suffit de rechercher les caractéristiques atomiques à la source du rayonnement, i.e., dans les processus qui jouent un rôle dans les centres d'émission et d'absorption du rayonnement. Les équations différentielles électrodynamiques maxwelliennes conservent ainsi toute leur validité dans le vide, et, de plus, les éléments discrets du rayonnement de la chaleur sont circonscrits dans un domaine encore très mystérieux et dans lequel il y a encore beaucoup de place pour toutes sortes d'hypothèses¹⁸¹.

XVIII.6.2. Espace des phases.

Planck fera usage de l'*espace des phases*. Dans le cas d'un résonateur, cet espace a comme axes le moment dipolaire du résonateur et la dérivée de celui-ci par rapport au temps (variables conjuguées). Un oscillateur non amorti d'énergie U et de fréquence ν est représenté par un point qui décrit une ellipse de surface $\frac{U}{\nu}$. Planck divise cet espace en cellules elliptiques consécutives dont les surfaces sont incrémentées de la quantité h . Un résonateur dont l'énergie est comprise entre U et $U+\Delta U$, avec $\Delta U = cste = \varepsilon = h\nu$, est représenté à un instant donné par un point entre deux ellipses consécutives¹⁸². La discrétisation porte ici sur les cellules de l'espace des phases.

XVIII.6.3. Hypothèse de seconde quantification.

Planck introduit l'hypothèse dite de la « seconde quantification » en 1911, dans laquelle il essaie de lever l'ambiguïté de sa théorie qui juxtapose des échanges d'énergie continus et discrets entre les résonateurs et le rayonnement. Dans le nouveau modèle, l'absorption du rayonnement se fait continûment, et en conséquence l'énergie du résonateur augmente elle aussi continûment. En revanche, l'émission n'ait supposée avoir lieu que lorsque l'énergie du résonateur atteint une valeur multiple de $h\nu$, aléatoirement, à la manière de la désintégration d'une substance radioactive. Soit l'énergie correspondante est rayonnée, soit le résonateur continue à absorber du rayonnement jusqu'à une nouvelle incrémentation de $h\nu$ de son énergie¹⁸³. Le développement de cette théorie occupe toute la dernière partie de *The Theory of Heat Radiation* mais ne sera pas vouée à la postérité, éclipsée par les succès de la théorie atomique de N.Bohr (*cf*. § XIX.3.1). Elle permet toutefois l'introduction de la quantité $h\nu/2$ comme énergie de point zéro des résonateurs.

¹⁸¹ For there is, in my opinion at least, nothing which makes necessary the consideration of the heat processes in a complete vacuum as atomic, and it suffices to seek the atomistic features at the source of radiation, i.e., in those processes which have their play in the centres of emission and absorption of radiation. Then the Maxwellian electrodynamic differential equations can retain completely their validity for the vacuum, and, besides, the discrete elements of heat radiation are relegated exclusively to a domain which is still very mysterious and where there is still present plenty of room for all sorts of hypotheses.

¹⁸² *cf.* « *Theory of Heat Radiation* » pp 125-126 et pp 135-143 et les quatrièmes et sixièmes leçons de « *Eight Lectures on Theoretical Physics* » pp 58-69 et pp 87-96.

¹⁸³ *Theory of Heat Radiation*. p. 153.

XVIII.6.4. Unités naturelles.

Planck reconnaît la possibilité de définir des unités de longueur, de temps, de masse et de températures « naturelles », en formant les rapports dimensionnels appropriés entre les constantes de la physique. Cette possibilité constituait à ses yeux une découverte « aussi importante que celle de Newton ». Ces constantes sont la constante de la gravitation universelle G , la célérité de la lumière dans le vide c , et les constantes h et k , qui remplacent désormais les constantes a et b introduites en 1899. Planck définit ainsi des grandeurs qui jouent un rôle important en physique. Il écrit à ce propos :

Cit. ... il peut être intéressant de remarquer qu'avec l'aide des deux constantes h et k qui apparaissent dans la loi universelle du rayonnement, nous avons les moyens d'établir des unités de longueur, masse, temps, et température, qui sont indépendantes de la nature des corps, qui conservent nécessairement leur signification pour toutes les époques et pour tous les environnements, terrestres et humains ou autres, et qui peuvent, ainsi, être considérées comme des « unités naturelles »¹⁸⁴. *Theory of Heat Radiation*. p. 174.

XIX. Einstein et les quanta.

L'année 1905 de la publication des articles d'Einstein sur la relativité restreinte est également celle où il introduit l'hypothèse des quanta lumineux. Cette même année, il publie un article important sur le « mouvement brownien » qui ne sera pas étudié ici. Les deux années précédentes ont vu Einstein s'intéresser à l'entropie et s'attacher à en donner une définition statistique utilisant l'espace des phases et la distribution statistique de Maxwell-Boltzmann, rejoignant ainsi les travaux antérieurs de Gibbs. Il s'intéresse dès lors aux fluctuations énergétiques d'un système autour de son énergie moyenne. Il donne à travers celles-ci une interprétation de la constante k de Boltzmann¹⁸⁵. Le problème du corps noir lui fournit un premier support qualitatif pour cette interprétation. Le cas du mouvement désordonné des particules en suspension, appelé mouvement brownien, offrira à Einstein une autre situation physique dans laquelle tester sa théorie statistique. Ces résultats conduisent à une méthode d'estimation du nombre d'Avogadro¹⁸⁶.

XIX.1. Les quanta lumineux.

Dans son article de mars 1905, intitulé *Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière*, Einstein examine en détail le problème du corps noir. Il ne se sert pas de l'hypothèse qu'il qualifie de « monstrueuse » des résonateurs de Planck, si ce n'est pour établir que le calcul classique mené avec les résonateurs conduit à une prédiction incompatible avec l'observation, rejoignant les remarques d'Ehrenfest et de Jeans. Il l'établit en faisant usage de résonateurs constitués d'électrons liés à des points fixes de l'espace soumis à une force de « rappel » analogue à celle d'un ressort. Ces électrons interagissent par collision avec des électrons et des molécules de gaz dans la cavité. Contrairement à Planck, Einstein fait « abstraction, provisoirement, du rayonnement émis et absorbé par les résonateurs » et s'intéresse à « la condition d'équilibre dynamique

¹⁸⁴ ... it might be of interest to note that, with the aid of the two constants h and k which appear in the universal law of radiation, we have the means of establishing units of length, mass, time, and temperature, which are independent of special bodies or substances, which necessarily retain their significance for all times and for all environments, terrestrial and human or otherwise, and which may, therefore, be describes as "natural units".

¹⁸⁵ Einstein note $2\kappa=k$ cette constante.

¹⁸⁶ à savoir le nombre d'atomes présents dans 1g de ¹²C.

correspondant aux interactions (aux collisions) des molécules et des électrons ». Celle-ci est donnée par l'égalité de l'énergie moyenne « d'un électron résonateur » et « l'énergie cinétique moyenne de translation d'une molécule de gaz¹⁸⁷ » : $\langle E \rangle = kT$. Einstein utilise de fait le théorème de l'équipartition de l'énergie¹⁸⁸. L'équilibre n'est possible que si chaque résonateur possède l'énergie moyenne $\langle E \rangle$ indépendamment de sa fréquence propre. La relation de Planck entre l'énergie moyenne U d'un résonateur et la densité d'énergie électromagnétique u dans la cavité à une fréquence donnée est notée par Einstein avec $\langle E \rangle = U$ et $\rho(\nu) = u$:

$$\langle E \rangle = \langle E(\nu) \rangle = \left(\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \right)^{-1} \rho(\nu)$$

Avec $\langle E \rangle = kT$ il obtient ainsi :

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

La densité d'énergie totale du rayonnement s'obtient par intégration sur toutes les fréquences :

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi}{c^3} kT \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu$$

Cette intégrale tend vers l'infini à cause des hautes fréquences. C'est la « catastrophe ultraviolette » ainsi dénommée par Ehrenfest, qui indique que le calcul classique n'est valide qu'aux grandes longueurs d'ondes.

Einstein fonde son étude sur la loi de Wien, valable elle pour les courtes longueurs d'ondes. Il n'utilise pas la relation plus générale obtenue par Planck. Il pense en fait faire une démarche très différente de celle de Planck et parvenir à des résultats non moins différents. Pour la commodité de l'exposé, nous rappelons la loi de Wien :

$$\rho(\nu) = \alpha \nu^3 \exp\left[-\frac{\beta\nu}{T}\right]$$

Il utilise cette relation pour exprimer $1/T$ en fonction de ν et ρ . Or $1/T$ est égal à $ds/d\rho$ où s et ρ sont les densités respectives d'entropie et d'énergie du rayonnement. Par intégration sur ρ , et sur le volume V de la cavité, Einstein en déduit l'entropie S en fonction de l'énergie du rayonnement $E = \rho V$ entre les fréquences ν et $\nu+d\nu$:

$$S = - \frac{E}{\beta\nu} \ln\left(\frac{E}{V\alpha\nu^3 d\nu} - 1\right)$$

Exprimant d'autre part la variation d'entropie $S - S_0$ lorsque le rayonnement occupe les volumes V et V_0 respectivement, Einstein obtient alors l'expression de la variation d'entropie :

$$S - S_0 = - \frac{E}{\beta\nu} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (1)$$

¹⁸⁷ p.41.

¹⁸⁸ L'énergie d'une molécule thermalisée du gaz vaut $1/2 kT$ par degré de liberté. Pour des oscillateurs linéaires (résonateurs), il faut compter une répartition de l'énergie à la fois sous la forme d'énergie cinétique et d'énergie potentielle. D'où la valeur de kT pour un résonateur oscillant dans une seule direction.

et en déduit que :

Cit. Cette équation montre que l'entropie d'un rayonnement monochromatique, de densité suffisamment faible, varie en fonction du volume selon la même loi que l'entropie d'un gaz parfait ou d'une solution diluée. Nous allons dans ce qui suit interpréter l'équation ci-dessus en nous fondant sur le principe introduit dans la physique par M. Boltzmann, principe selon lequel l'entropie d'un système est une fonction de la probabilité de son état. *Œuvres Choisies. Vol. 1. p. 45.*

Einstein définit d'après Boltzmann l'entropie S d'un système dans un état donné par

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W$$

R est la constante des gaz parfaits, N le nombre d'Avogadro et R/N n'est autre que la constante k de Boltzmann introduite par Planck. S_0 désigne l'entropie du système dans son état initial et W la « probabilité relative » d'un état d'entropie S . Einstein diffère de Planck en ce qu'il se limite à calculer une variation d'entropie, ce qui supprime le problème de la constante additive mais empêche toute détermination absolue de l'entropie, et qu'il accorde un sens différent à la quantité W .

Einstein donne l'expression de W dans le cas d'un gaz monoatomique. Le raisonnement est le suivant : soit un volume V_0 contenant « n points mobiles (des molécules par exemple) » :

Cit. Le système considéré (qui peut être par exemple un gaz parfait ou une solution diluée) a une certaine entropie, S_0 . Imaginons une portion du volume V_0 de grandeur V , et que les n points mobiles soient transportés dans le volume V , sans que rien par ailleurs ne soit modifié dans le système. A cet état correspond évidemment une autre valeur (S) de l'entropie ; nous nous proposons de déterminer cette différence d'entropie grâce au principe de Boltzmann.

Posons-nous alors la question : quelle est la probabilité de l'état imaginé en dernier par rapport à celle de l'état initial ? Ou encore : quelle est la probabilité pour que, en un instant choisi au hasard, les n points mobiles indépendants contenus dans le volume V_0 se trouvent (par hasard) tous dans le volume V ?

Pour cette probabilité, qui est une « probabilité statistique », on obtient évidemment la valeur :

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

D'où l'on déduit, par application du principe de Boltzmann, que :

$$S - S_0 = R \frac{n}{N} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (2)$$

Einstein met l'expression (1) de l'entropie du rayonnement du corps noir sous la forme :

$$S - S_0 = \frac{n}{N} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{N E}{R \beta v}}$$

Et en déduit que :

Cit. Si un rayonnement monochromatique de fréquence ν et d'énergie E est enfermé (grâce à des parois réfléchissantes) dans un volume V_0 , la probabilité pour qu'à un instant quelconque, toute l'énergie du rayonnement se trouve dans une portion V du volume V_0 est :

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{N E}{R \beta v}}$$

Einstein en tire une condition¹⁸⁹ sur E pour valider l'analogie formelle entre variation d'entropie du gaz et celle du rayonnement : la quantité $\frac{N E}{R \beta v}$ doit être un nombre entier :

Cit. Un rayonnement monochromatique de faible densité (dans les limites de validité de la loi du rayonnement de Wien) se comporte, par rapport à la théorie de la chaleur, comme s'il était constitué de quanta d'énergie, indépendants les uns des autres, de grandeur $\frac{R \beta v}{N}$.

Cette dernière quantité est le quantum d'énergie $h \nu$ de Planck car $h = \frac{R \beta}{N}$.

Einstein pense le rayonnement comme lui-même « atomique », constitué de grains d'énergie¹⁹⁰ :

Cit. Dès lors qu'un rayonnement monochromatique (de densité suffisamment faible) se comporte, relativement à la dépendance en volume de son entropie, comme un milieu discontinu constitué de quanta d'énergie de grandeur $R \beta v / N$, on est conduit à se demander si les lois de la production et de la transformation de la lumière n'ont pas également la même structure que si la lumière était constituée de quanta d'énergie de ce type.

Il a conscience de proposer une théorie « révolutionnaire » et s'en ouvre dans sa correspondance privée. Dans cet article scientifique, il se montre plus mesuré comme le montre la formulation employée ci-dessus. Il examine alors les cas de la « photoluminescence », de la « production des rayons cathodiques » (effet photoélectrique), et

¹⁸⁹ Ce calcul d'Einstein montre que pour que l'analogie entre rayonnement et gaz monoatomique tienne, il faut que l'énergie du rayonnement soit discrétisée. L'obtention de quanta de valeur $h \nu$ suppose en outre la validité rigoureuse de la loi de Wien, et plus particulièrement de l'exposant $[-\beta v / T]$ qui figure dans l'exponentielle. En partant d'une loi plus générale avec $\varphi(\nu)$ à la place de ν , Einstein aurait abouti à des quanta $h \varphi(\nu)$ avec cette méthode.

¹⁹⁰ Pour une analyse de la démarche d'Einstein voir par exemple l'article *Quanta de Planck, d'Einstein et d'aujourd'hui*, C. Bracco, J.-P. Provost, à paraître dans le Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales, avril 2005.

de l'« ionisation d'un gaz par de la lumière ultraviolette » pour montrer que ces phénomènes trouvent une explication simple dans l'hypothèse des « grains d'énergie ».

Le cas de l'effet photoélectrique est le plus marquant. Cet effet a été découvert par Hertz en 1887, et son étude approfondie par Lénard en 1902.

VIDÉO

La théorie ondulatoire semble prise en défaut pour fournir une explication simple de cet effet. Les principales caractéristiques du phénomène sont les suivantes. Lorsqu'une surface métallique est éclairée par un rayonnement d'une longueur d'onde suffisamment courte (ultraviolet) des électrons sont arrachés au métal, constituant les « rayons cathodiques » de Hertz. Le phénomène se poursuit lorsqu'on diminue l'intensité de la source lumineuse. Dans l'hypothèse ondulatoire, la lumière est produite sous la forme d'ondes sphériques périodiques et l'énergie lumineuse se répartit sur toute la sphère. Dans le cas d'un rayonnement de faible intensité, l'énergie disponible sur une petite partie de cette sphère est très faible. Il faudrait donc attendre très longtemps pour qu'une accumulation d'énergie suffisante se produise au sein du métal, de façon à communiquer une énergie appréciable aux électrons et les extraire du métal ; en pratique cela peut prendre plusieurs heures. Or l'expérience montre que des électrons sont arrachés au métal même avec des sources de très faible intensité. Il y en a seulement proportionnellement moins qu'avec une source intense. Einstein donne une interprétation « quantique » de l'effet photoélectrique :

Cit. La conception usuelle, selon laquelle l'énergie de la lumière est distribuée de façon continue dans l'espace où elle est rayonnée, présente, quand on tente d'expliquer les phénomènes photoélectriques, de très sérieuses difficultés qui sont exposées dans un travail décisif de M. Lénard.

La conception selon laquelle la lumière excitatrice est constituée de quanta d'énergie $(R/N)\beta\nu$ permet de concevoir la production de rayons cathodiques par de la lumière de la manière suivante. Des quanta d'énergie pénètrent dans la couche superficielle du corps ; leur énergie est transformée, au moins en partie, en énergie cinétique des électrons. La représentation la plus simple que l'on puisse s'en faire est celle d'un quantum de lumière cédant son énergie à un seul électron ; nous allons supposer que c'est bien ce qui se passe. Il n'est pas exclu cependant que des électrons ne prennent qu'une partie de l'énergie des quanta de lumière. Un électron, auquel de l'énergie cinétique a été fournie à l'intérieur du corps, atteint la surface en ayant perdu une partie de son énergie cinétique. Nous allons supposer, de plus, que tout électron doit, pour pouvoir quitter un corps, fournir un certain travail P (caractéristique du corps). Les électrons qui quittent le corps avec la vitesse normale la plus élevée sont ceux qui se trouvent immédiatement à la surface et qui ont été excités normalement à celle-ci. L'énergie cinétique de ces électrons est :

$$\frac{R}{N}\beta\nu - P.$$

Si le corps est porté au potentiel π , s'il est entouré de conducteurs à un potentiel nul, et si π est tout juste capable d'empêcher le corps de perdre de l'électricité, on a :

$$\pi\varepsilon = \frac{R}{N}\beta\nu - P,$$

où ε désigne la charge électrique de l'électron. pp. 50-51.

En notations plus conventionnelles, $h\nu$ désignant l'énergie d'un quantum, e la charge de l'électron, V le potentiel du métal et $W = h\nu_0$ le travail nécessaire à l'extraction d'un électron superficiel, où ν_0 est la fréquence seuil en dessous de laquelle il n'y a plus extraction, la relation se lit :

$$eV = h(\nu - \nu_0)$$

Einstein commente ainsi sa relation :

Cit. Si la formule obtenue est exacte, π en fonction de la fréquence de la lumière excitatrice doit être, en coordonnées cartésiennes, une droite dont la pente ne dépend pas de la substance étudiée. p. 51.

Ainsi, dans l'interaction de la lumière avec les électrons d'un métal, tout se passe comme si l'énergie lumineuse n'était pas répartie de manière continue dans l'espace, mais intervenait sous la forme de quanta d'énergie $h\nu$.

R. Millikan vérifie en 1916 la linéarité du potentiel π avec la fréquence. La détermination de la pente de la droite donne la valeur de h . Georges Desjardins¹⁹¹ écrit à propos des travaux de Millikan :

Cit. Les valeurs ainsi déterminées sont, pour le sodium : $h = 6.569 \cdot 10^{-27}$ erg.sec. et, pour le lithium, $h = 6.584 \cdot 10^{-27}$ erg.sec. Les mesures de Millikan montrent donc que la pente de la droite est indépendante de la nature du métal. Elles fournissent une valeur particulièrement précise de la constante de Planck :

$$h = 6.57 \cdot 10^{-27} \text{ erg.sec. à } 0.5 \text{ p. cent près.}$$

Einstein recevra le prix Nobel de physique 1921 "pour ses services rendus à la physique théorique et spécialement pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique".

A la vue de l'analyse qui précède, on peut comprendre l'introduction de l'article d'Einstein :

Cit. La théorie ondulatoire de la lumière opérant avec des fonctions d'espace continues s'est avérée parfaite pour ce qui est de la description des phénomènes purement optiques et il se peut qu'elle ne soit jamais remplacée par aucune autre théorie. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les observations optiques portent sur des valeurs moyennes dans le temps et pas sur des valeurs instantanées ; il n'est pas inconcevable, bien que les théories de la diffraction, de la réflexion, de la réfraction, etc., soient entièrement confirmées par l'expérience, que la théorie de la lumière qui opère sur des fonctions continues de l'espace puisse conduire à des contradictions avec l'expérience lorsqu'elle est appliquée aux phénomènes de production et de transformation de la lumière.

De fait, il me semble que les observations portant sur le « rayonnement noir », la photoluminescence, la production de rayons cathodiques par la lumière ultraviolette, et d'autres classes de phénomènes concernant la production et la transformation de la lumière, apparaissent comme plus compréhensibles si l'on admet que l'énergie de la

¹⁹¹ Les quantas. Collection Armand Collin. 1930. p. 58.

lumière est distribuée de façon discontinue dans l'espace. Selon l'hypothèse envisagée ici, lors de la propagation d'un rayonnement 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 tout d'un bloc. *pp 39-40.*

Einstein revient sur l'approche de Planck l'année suivante. Comme nous l'avons signalé, le raisonnement de Planck superpose deux points de vue apparemment inconciliables. Einstein remarque :

Cit. Aussi devons-nous considérer que la théorie de Planck du rayonnement repose sur le principe suivant :

L'énergie d'un résonateur élémentaire ne peut prendre que des valeurs multiples entières de $(R/N)\beta\nu$; lors de l'absorption ou de l'émission, l'énergie d'un résonateur varie par sauts, plus précisément, elle varie par multiples entiers de $(R/N)\beta\nu$.

Mais cette hypothèse en implique une autre, dans la mesure où elle est en contradiction avec les fondements théoriques qui permettent de déduire l'équation (3)¹⁹². Car, si l'énergie d'un résonateur ne peut varier que par sauts, on ne peut pas appliquer la théorie usuelle de l'électricité à la détermination de l'énergie moyenne d'un résonateur placé dans un champ de rayonnement : en effet, dans cette théorie, aucune des valeurs de l'énergie d'un résonateur ne jouit d'un *statut particulier*. Aussi, la théorie de Planck repose-t-elle sur l'hypothèse suivante : bien que la théorie de Maxwell ne s'applique pas à des résonateurs élémentaires, l'énergie *moyenne* d'un résonateur élémentaire placé dans un champ de rayonnement est égale à celle que donne le calcul effectué au moyen de la théorie de l'électricité de Maxwell¹⁹³. *Théorie de la production et de l'absorption de la lumière. Œuvres choisies. Vol. 1. p. 71.*

Et il conclut :

Cit. A mon avis, les considérations précédentes ne réfutent pas la théorie du rayonnement de Planck ; elles me semblent bien plutôt indiquer que dans sa théorie du rayonnement M. Planck a introduit un nouvel élément d'hypothèse dans la physique : l'hypothèse des quanta de lumière. *Théorie de la production et de l'absorption de la lumière. pp. 71-72.*

Einstein poursuit ses investigations en recherchant les modifications entraînées par l'introduction de la quantification des échanges d'énergie en lien avec la « théorie de la chaleur ». Il s'intéresse à la chaleur spécifique des solides, c'est à dire à la capacité de ces corps d'emmagasiner de l'énergie sous forme de chaleur. Einstein adapte le raisonnement de Planck aux atomes d'un solide oscillant dans les trois directions de l'espace. Ces atomes constituent des résonateurs au sens de Planck. Au facteur numérique 3 près lié aux trois directions spatiales, l'énergie du corps est donc donnée par la formule de Planck du rayonnement. En dérivant cette expression par rapport à la température, Einstein en déduit l'expression de la capacité calorifique, qui diverge de la loi de Dulong et Petit aux basses températures. Cette divergence est confirmée expérimentalement.

¹⁹² $\langle E(\nu) \rangle = (c^3 / 8\pi\nu^2) \rho(\nu)$.

¹⁹³ Se démontre rigoureusement dans le cas d'oscillateurs harmoniques (*cf. remarque*) in Einstein. Les Quantas. P. 71.

XIX.2. Doutes d'Einstein à propos des quanta.

Cependant, si l'hypothèse des quanta simplifie l'interprétation d'un certain nombre de phénomènes lumineux, comment rendre compte de phénomènes d'interférences propres à un aspect ondulatoire ? Einstein rejettera lui-même l'hypothèse de quanta indépendants se déplaçant seuls dans un espace vide newtonien. Dans une lettre adressée à Lorentz le 23 mai 1909, il écrit :

Cit. En effet, je ne pense pas du tout qu'il faille concevoir la lumière comme composée de quanta indépendants les uns des autres et localisés dans des volumes relativement petits. Pour expliquer la limite de Wien de la formule du rayonnement, c'est certainement ce qu'il y aurait de plus commode. Mais la division d'un rayon lumineux à la surface de milieux réfringents à elle seule interdit purement et simplement cette conception. Un rayon lumineux se divise, alors qu'un quantum lumineux ne peut pas se diviser sans qu'il y ait changement de fréquence... Je crois plutôt que la lumière se concentre autour de points singuliers de façon analogue à celle que nous avons coutume de supposer dans le cas du champ électrostatique. J'imagine donc chaque quantum de lumière comme un point, environné d'un champ vectoriel très étendu, décroissant avec la distance d'une façon quelconque. Ce point est une singularité sans laquelle le champ vectoriel ne peut exister. *p. 106.*

Il se montre ensuite de plus en plus sceptique vis-à-vis des quanta :

Cit. Je ne me demande plus si ces quanta existent réellement. Et je n'essaye plus de les construire parce que je sais maintenant que mon cerveau en est incapable. Mais j'explore quand même les conséquences aussi soigneusement que possible, afin d'apprendre le domaine d'applicabilité de ce concept. *Lettre à Besso. Mai 1911. citée p. 126.*

Ou encore, l'affirmation suivante n'étant pas innocente sous la plume d'Einstein :

Cit. Les quanta remplissent certes leur fonction de quanta, mais ils n'ont pas d'existence, pas plus que l'éther au repos. Celui-ci se retourne consciencieusement dans sa tombe, en ce moment, avec l'espoir de retrouver une nouvelle vie – le pauvre. *Lettre à Hopf. Décembre 1911. p. 129.*

XIX.3. « Théorie quantique » du rayonnement.

Les quanta renaissent avec la théorie d'Einstein exposée dans l'article de 1917 intitulé *Théorie quantique du rayonnement* : Einstein considère des molécules satisfaisant à des règles quantiques, à l'image du modèle de l'atome de Bohr pour l'hydrogène détaillé ci-dessous. Il retrouve ainsi la formule de rayonnement de Planck et en déduit une nouvelle conséquence accréditant l'existence des quanta d'énergie.

XIX.3.1 Du modèle atomique de Rutherford au modèle atomique de Bohr.

Le physicien danois Niels Bohr (1885-1962) travaille dans le laboratoire d'Ernest Rutherford à Manchester. Ce dernier avait proposé un modèle d'atome que Bohr résume ainsi, dans son article de 1913 intitulé « *On the Constitution of Atoms and Molecules*¹⁹⁴ » :

¹⁹⁴ The Philosophical Magazine, juillet 1913, T.XXVI, pp.1-25.

Cit. Le professeur Rutherford a donné une théorie de la structure atomique afin d'expliquer les résultats d'expériences portant sur la diffusion de rayons α par la matière. Selon cette théorie, les atomes consistent en un noyau chargé positivement entouré par un système d'électrons maintenus ensemble par des forces attractives du noyau ; la charge totale négative des électrons est égale à la charge positive du noyau. De plus, le noyau est supposé porter la partie prépondérante de la masse de l'atome, et avoir une taille extrêmement petite par rapport à celle de tout l'atome¹⁹⁵. p.1.

Bohr considère alors un électron dont l'énergie de liaison est W , qui décrit une orbite elliptique de demi grand-axe a avec la période T . L'électron porte une charge e , sa masse est m , et la charge du noyau est notée E . La mécanique classique donne la relation entre la pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T}$ de l'électron et son énergie W

$$\omega = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{W^{3/2}}{eE\sqrt{m}} \quad (1)$$

Or dans la théorie classique un électron rayonne de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques du fait des accélérations qu'il subit sur sa trajectoire. Prenant ceci en considération Bohr souligne l'inconsistance de ce modèle :

Cit. Dans ce cas l'électron ne décrira plus longtemps des orbites stationnaires. W augmentera continûment, et l'électron approchera du noyau en décrivant des orbites de plus en plus petites ; l'électron gagnant en moyenne de l'énergie cinétique en même temps que le système complet perd de l'énergie. Ce processus se déroulerait jusqu'à ce que les dimensions de l'orbite soient comparables aux dimension des électrons ou du noyau¹⁹⁶. p. 4.

Il précise qu'une telle perte d'énergie n'est pas observée. Conservant les grandes lignes du modèle de Rutherford, il décide d'abandonner la théorie classique en s'appuyant sur les travaux de Planck dont il retient comme « point essentiel » la quantification de l'émission d'un système atomique sous la forme d'une quantité d'énergie multiple de $h\nu$.

Bohr considère un électron amené de l'infini sur une orbite finale circulaire stable autour du noyau où la fréquence de rotation est ν . Il fait l'hypothèse que cet électron émet durant ce processus la quantité d'énergie :

$$W = \frac{\pi h \nu}{2} \quad (2)$$

¹⁹⁵ In order to explain the results of experiments on scattering of α rays by matter Prof. Rutherford has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atoms consist of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus ; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the nucleus is assumed to be the seat of the essential part of the mass of the atom, and to have linear dimensions exceedingly small compared with the linear dimensions of the whole atom.

¹⁹⁶ In this case the electron will no longer describe stationary orbits. W will continuously increase, and the electron will approach the nucleus describing orbits of smaller and smaller dimensions, and with greater and greater frequency ; the electron on the average gaining in kinetic energy at the same time as the whole system loses energy. This process will go on until the dimensions of the orbit are of the same order of magnitude as the dimensions of the electron or those of the nucleus.

Reportant cette valeur dans l'expression classique (1) qui relie W et la pulsation $\omega = 2\pi\nu$, il obtient :

$$W = \frac{2\pi^2 m e^2 E^2}{\tau^2 h^2} \quad (3)$$

La pulsation ω et le demi-grand axe a de l'orbite, c'est à dire la distance moyenne de l'électron au noyau, ne prennent alors que des valeurs bien déterminées. Les électrons de l'atome de Bohr ne peuvent se trouver que sur des orbites bien définies.

Ainsi, dans le cas de l'atome d'hydrogène qui ne possède qu'un seul électron, l'énergie de liaison de l'atome dans une configuration donnée est égale d'après (3) à

$$W_\tau = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 \tau^2}$$

Bohr en déduit que :

Cit. En conséquence, la quantité d'énergie émise par le passage du système d'un état correspondant à $\tau = \tau_1$ à $\tau = \tau_2$ est

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$$

Si nous faisons maintenant l'hypothèse que le rayonnement considéré est homogène, et que la quantité d'énergie émise est égale à $h\nu$, où ν est la fréquence du rayonnement, nous obtenons

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h\nu,$$

Et de là

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right) \quad (4)$$

Nous voyons que cette expression rend compte de la loi reliant les raies spectrales de l'hydrogène. Si nous posons $\tau_2 = 2$ et faisons varier τ_1 , nous obtenons la série de Balmer habituelle. Si nous posons $\tau_2 = 3$, nous obtenons la série dans l'infra-rouge observée par Paschen et pressentie jadis par Ritz. Si nous posons $\tau_2 = 1$ et $\tau_1 = 4, 5, \dots$, nous obtenons des séries respectivement dans l'ultra-violet et l'infra-rouge lointains, qui ne sont pas observées, mais dont on peut suspecter l'existence. Cette concordance est aussi bien quantitative que qualitative. Prenant

$$e = 4.7 \cdot 10^{-10}, \quad \frac{e}{m} = 5.31 \cdot 10^{17}, \quad \text{et} \quad h = 6.5 \cdot 10^{-27}$$

Nous obtenons

$$\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} = 3.1 \cdot 10^{15}.$$

La valeur mesurée du nombre en facteur de l'expression (4) est¹⁹⁷

¹⁹⁷ The amount of energy emitted by the passing of the system from a state corresponding to $\tau = \tau_1$ to one corresponding to $\tau = \tau_2$, is consequently

$$3.290 \cdot 10^{15}$$

pp. 8-9.

Le modèle de Bohr se trouve confirmé par l'expérience de façon remarquable, du moins dans le cas de l'atome d'hydrogène, l'élément le plus simple.

Bohr synthétise sa théorie en quantifiant finalement le moment cinétique de l'électron :

Cit. Si nous faisons par conséquent l'hypothèse que l'orbite de l'électron est circulaire dans les états stationnaires, le résultat des calculs p.5 peuvent s'exprimer par la condition simple : que le moment angulaire de l'électron autour du noyau dans un état stationnaire du système est égal à un multiple entier d'une valeur universelle, indépendante de la charge du noyau¹⁹⁸. p. 15.

Cette quantité est notée M_0 par Bohr et vaut:

$$M_0 = \frac{h}{2\pi} = 1.04 \cdot 10^{-27}.$$

La constante de Planck fait son apparition comme une mesure du moment cinétique élémentaire de l'électron autour du noyau : cette interprétation est rendue possible par le fait que l'action et le moment cinétique ont même dimension. M_0 s'appelle désormais la "constante réduite" de Planck et est notée

XIX.3.2. Einstein et la Théorie Quantique du rayonnement.

En 1917, Einstein décrit le comportement quantique d'un atome soumis à un rayonnement en utilisant le modèle de l'atome de Bohr. Cette approche lui permet de déterminer la loi de rayonnement de Planck d'une nouvelle manière. Il définit au préalable la probabilité qu'a un atome de se trouver dans un état d'énergie donnée :

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = 2\pi^2 m e^4 / h^2 (1/\tau_2^2 - 1/\tau_1^2)$$

If now we suppose that the radiation in question is homogeneous, and that the amount of energy emitted is equal to $h\nu$, where ν is the frequency of the radiation, we get

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h\nu,$$

And from this

$$\nu = 2\pi^2 m e^4 / h^3 (1/\tau_2^2 - 1/\tau_1^2) \quad (4)$$

We see that this expression accounts for the law connecting the lines in the spectrum of the hydrogen. If we put $\tau_2 = 2$ and let τ_1 vary, we get the ordinary Balmer series. If we put $\tau_2 = 3$, we get the series in the ultra-red observed by Paschen and previously suspected by Ritz. If we put $\tau_2 = 1$ and $\tau_1 = 4, 5, \dots$, we get series respectively in the extreme ultra-violet and the extreme ultra-red, which are not observed, but the existence of which may be suspected.

The agreement in question is quantitative as well as qualitative. Putting

$$e = 4.7 \cdot 10^{-10}, \quad m = 5.31 \cdot 10^{-17}, \quad \text{and } h = 6.5 \cdot 10^{-27}$$

we get

$$2\pi^2 m e^4 / h^2 = 3.1 \cdot 10^{15}.$$

The observed value for the factor outside the bracket in the formula (4) is

$$3.290 \cdot 10^{15}$$

¹⁹⁸ If we therefore assume that the orbit of the electron in the stationary states is circular, the result of the calculation on p.5 can be expressed by the simple condition : that the angular momentum of the electron round the nucleus in a stationary state of the system is equal to an entire multiple of a universal value, independent of the charge on the nucleus.

Cit. D'après la théorie quantique, une molécule de nature déterminée, abstraction faite de son mouvement de rotation ou de translation, ne peut admettre qu'une série discrète d'états $Z_1, Z_2 \dots Z_n \dots$ d'énergie (interne) $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n \dots$. Si des molécules de cette sorte appartiennent à un gaz à la température T , la fréquence relative W_n de ces états Z_n est donnée par la formule correspondant à la distribution canonique de la mécanique statistique :

$$W_n = p_n \exp\left[-\frac{\varepsilon_n}{kT}\right]$$

Dans cette formule, $k = \frac{R}{N}$ est la constante bien connue de Boltzmann, p_n un nombre indépendant de T , caractéristique de la molécule et de son n -ième état quantique, que l'on peut qualifier de « poids » statistique de l'état en question. *La théorie quantique du rayonnement. 1917. In. Albert Einstein Ouvres choisies. T1. Quanta. p.136.*

Afin de décrire les interactions de ces molécules avec le rayonnement, il fait l'hypothèse suivante :

Cit. Soient Z_n et Z_m deux états possibles, au sens de la théorie quantique, d'une molécule de gaz et dont les énergies ε_n , resp. ε_m , vérifient l'inégalité $\varepsilon_m > \varepsilon_n$. Supposons que la molécule soit capable de passer de l'état Z_n à l'état Z_m lorsqu'elle reçoit l'énergie rayonnante $\varepsilon_m - \varepsilon_n$, et que, de même, la transition de l'état Z_m à l'état Z_n puisse s'effectuer par perte de cette même énergie rayonnante. Soit ν la fréquence du rayonnement ainsi reçu, ou cédé, par la molécule ; ν est caractéristique de la combinaison d'indices considérés (m, n).

et est alors amené à distinguer trois modalités d'échanges d'énergie :

Cit. a) *Emission de rayonnement.* Un résonateur de Planck qui oscille, rayonne, selon la théorie de Hertz, de l'énergie de façon bien déterminée, qu'il soit ou non excité par un champ extérieur. De façon analogue, nous supposons qu'une molécule peut passer, sans être excitée par des causes extérieures, de l'état Z_m à l'état Z_n par émission de l'énergie rayonnante $\varepsilon_m - \varepsilon_n$ (fréquence ν). Soit dW la probabilité pour que cela ait effectivement lieu durant l'élément de temps dt :

$$dW = A_m^n dt$$

où A_m^n représente une constante caractéristique de la combinaison d'indices considérée. *p.137.*

Einstein compare ce processus à celui d'une désintégration radioactive : spontanée et probabiliste. Les deux autres processus s'envisagent de la manière suivante :

Cit. *Immersion dans un rayonnement.* Si un résonateur de Planck se trouve dans un champ de rayonnement, l'énergie du résonateur est modifiée du fait que le champ électromagnétique du rayonnement transfère du travail au résonateur ; ce travail peut être soit positif soit négatif, selon la phase relative du résonateur et du champ oscillant. De façon analogue, nous introduisons l'hypothèse suivante. Sous l'action d'un

rayonnement de densité ρ et de fréquence ν , une molécule peut, en recevant l'énergie $\varepsilon_m - \varepsilon_n$, passer de l'état Z_n à l'état Z_m , conformément à la loi de probabilité :

$$dW = B_n^m \rho dt$$

De même, nous supposons que la transition $Z_m \rightarrow Z_n$ est possible sous l'effet du rayonnement, libérant l'énergie $\varepsilon_m - \varepsilon_n$, selon la loi de probabilité :

$$dW = B_m^n \rho dt$$

B_n^m et B_m^n sont des constantes. Nous donnons à ces deux processus le nom de « changement d'état par immersion dans un rayonnement ».

Pour que la relation qui donne le peuplement statistique des niveaux ne soit pas perturbée (équilibre thermodynamique) « il faut et il suffit que par unité de temps il se produise en moyenne autant de processus élémentaires du type (B) que des processus des types (A) et (B') réunis ». Einstein obtient alors la condition suivante sur ρ :

$$p_n \exp\left[-\frac{\varepsilon_n}{kT}\right] B_n^m \rho = p_m \exp\left[-\frac{\varepsilon_m}{kT}\right] (B_m^n \rho + A_m^n)$$

en supposant de plus que « ρ tend vers l'infini avec T », on doit avoir

$$p_n B_n^m = p_m B_m^n$$

d'où :

$$\rho = \frac{A_m^n / B_m^n}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_n - \varepsilon_m}{kT}\right) - 1}$$

qui est la loi de distribution de Planck moyennant les identifications :

$$\frac{A_m^n}{B_m^n} = \alpha \nu^3$$

$$\varepsilon_m - \varepsilon_n = h \nu$$

Sans résumer la suite de son argumentation, assez délicate, on peut cependant noter que lors des processus d'émission et d'absorption, les molécules se voient transférées dans l'hypothèse d'Einstein une impulsion $\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_n}{c}$ où c est la vitesse de la lumière, soit $\frac{h\nu}{c}$. Einstein montre alors que les échanges d'impulsion aboutissent à une distribution des vitesses compatibles avec la distribution maxwellienne attendue pour les molécules à l'équilibre avec le rayonnement. Or les processus envisagés par Einstein pour parvenir à ce résultat sont des processus *orientés*, c'est à dire s'effectuant dans une direction privilégiée de l'espace, certes aléatoirement, mais incompatibles avec l'idée de l'émission d'une onde sphérique isotrope.

Cette remarque vaut notamment pour l'émission spontanée. Ainsi « les propriétés des processus élémentaires impliqués [...] rendent presque inévitable l'élaboration d'une théorie proprement quantique du rayonnement ».

Les quanta retrouvent une existence, avec une énergie $h\nu$ et une quantité de mouvement $\frac{h\nu}{c}$. Il faudra attendre les travaux d'Einstein et de Bose en 1924 pour que ces quanta soient dotés d'une statistique appropriée. Lewis les baptise « photons » en 1926.

Cependant Einstein ne parviendra pas à développer à sa manière une théorie prenant en compte à la fois les aspects corpusculaires et ondulatoires de la lumière. Il n'adhère pas à la mécanique quantique développée par ses contemporains et écrit à la fin de sa vie :

Cit. Ces cinquante ans de rumination consciente ne m'ont pas rapproché de la question « Que sont les quanta lumineux ? » Aujourd'hui le premier fripon venu croit qu'il sait ce qu'ils sont, mais il se leurre.

Plus encore que l'interprétation de l'effet photoélectrique par la théorie des quanta, ou l'utilisation des quanta dans l'article d'Einstein de 1917, c'est l'*effet Compton* qui accrédite pour les physiciens l'existence de quanta lumineux en tant qu'entités possédant une énergie et une quantité de mouvement bien définies.

XIX.3.3. L'effet Compton et les quanta.

Arthur Holly Compton (1892-1962) est un physicien américain qui travaille sur les rayons X. Ces rayons sont interprétés comme des ondes électromagnétiques de très courte longueur d'onde, typiquement de la taille d'un atome. Leur comportement ondulatoire est mis en évidence dans les expériences de diffraction sur des réseaux cristallins. La disposition régulière des atomes dans le réseau joue un rôle analogue aux traits parallèles régulièrement espacés d'un réseau de diffraction pour la lumière visible. L'intensité est concentrée dans des directions privilégiées données par les « conditions de Bragg ». Cette propriété est utilisée pour faire une étude spectrale du rayonnement X. Dans son article « *A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements* » de 1923, Compton note que certains faits expérimentaux relevés lors de la diffusion des rayons X sont difficiles à interpréter dans le cadre de la théorie classique de l'électron. Les rayons X « secondaires », qui ont été diffusés par la cible, ont la propriété suivante :

Cit. Par une étude spectroscopique des rayons X secondaires du graphite, j'ai en fait pu montrer que seulement une petite partie, au plus, du rayonnement X secondaire a la même longueur d'onde que le rayonnement primaire. Alors que l'énergie du rayonnement X secondaire est si proche de celle calculée par la théorie classique de Thomson qu'il semble difficile de l'attribuer à autre chose qu'à un véritable processus de diffusion, ces résultats montrent que s'il y a bien une diffusion comparable à celle prédite par Thomson, elle est d'une longueur d'onde plus grande que celle du rayonnement primaire.

Un tel changement en longueur d'onde est exactement contraire à la théorie de la diffusion de Thomson, car celle-ci nécessite que les électrons qui diffusent, rayonnant comme ils le font en raison de leur mouvement d'oscillations forcées dans le champ incident, doivent donner naissance à un rayonnement d'exactly la même fréquence que celle du rayonnement incident. [...].

Cet échec fait apparaître comme improbable qu'une explication satisfaisante de la diffusion des rayons X puisse être obtenue sur la base de l'électrodynamique classique¹⁹⁹. p. 485.

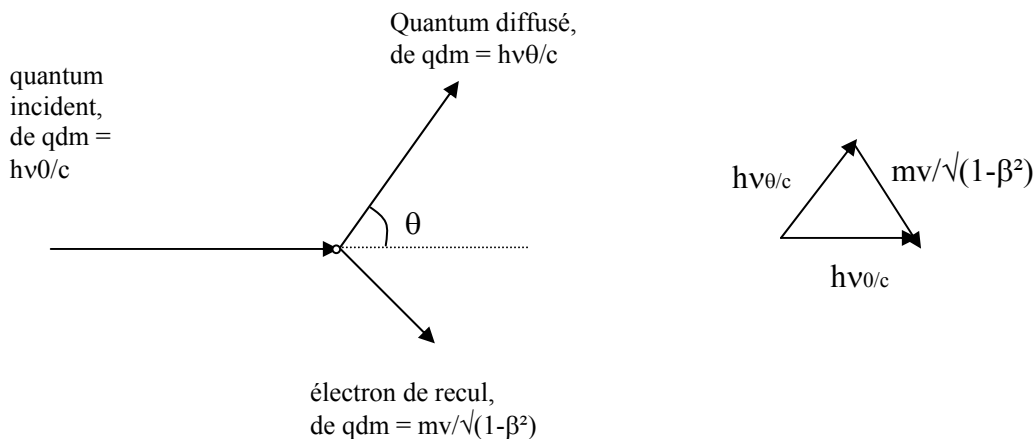
Compton introduit à la suite une interprétation quantique de ce phénomène :

Cit. Du point de vue de la théorie quantique, nous pouvons supposer que chaque quantum de rayons X n'est pas diffusé par tous les électrons du radiateur, mais perd toute son énergie sur un électron en particulier. Cet électron diffuse à son tour le rayon dans une direction définie, qui fait un certain angle avec la direction incidente. Le changement de direction dans la trajectoire du quantum se traduit par une modification de sa quantité de mouvement. En conséquence, l'électron diffusant reculera avec une quantité de mouvement égale à la variation de quantité de mouvement du rayon X. L'énergie du rayon diffusé sera égale à celle du rayon incident moins l'énergie cinétique de recul des électrons diffusants ; et comme le rayon diffusé doit être un quantum entier, sa fréquence en sera réduite dans les mêmes proportions que l'énergie. Par conséquent nous devons nous attendre dans la théorie quantique à ce que la longueur d'onde du rayonnement diffusé soit plus grande que celle du rayonnement incident²⁰⁰. p. 485.

Soit ainsi un quantum incident d'énergie $h\nu_0$ et de quantité de mouvement (qdm) $\frac{h\nu_0}{c}$ qui entre en collision avec un électron de masse m . Compton applique les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique des particules relativistes. Le schéma décrivant la collision est le suivant :

¹⁹⁹ By a spectroscopic examination of the secondary X-rays from graphite, I have, indeed, been able to show that only a small part, if any, of the secondary X-radiation is of the same wave-length as the primary. While the energy of the secondary X-radiation is so nearly equal to that calculated from Thomson's classical theory that it is difficult to attribute it to anything other than true scattering, these results show that if there is any scattering comparable in magnitude with that predicted by Thomson, it is of a greater wave-length than the primary X-rays. Such a change in wave-length is directly counter to Thomson's theory of scattering, for this demands that the scattering electrons, radiating as they do because of their forced vibrations when traversed by a primary X-ray, shall give rise to radiation of exactly the same frequency as that of the radiation falling upon them. [...] This failure makes it appear improbable that a satisfactory explanation of the scattering of X-rays can be reached on the basis of the classical electro-dynamics.

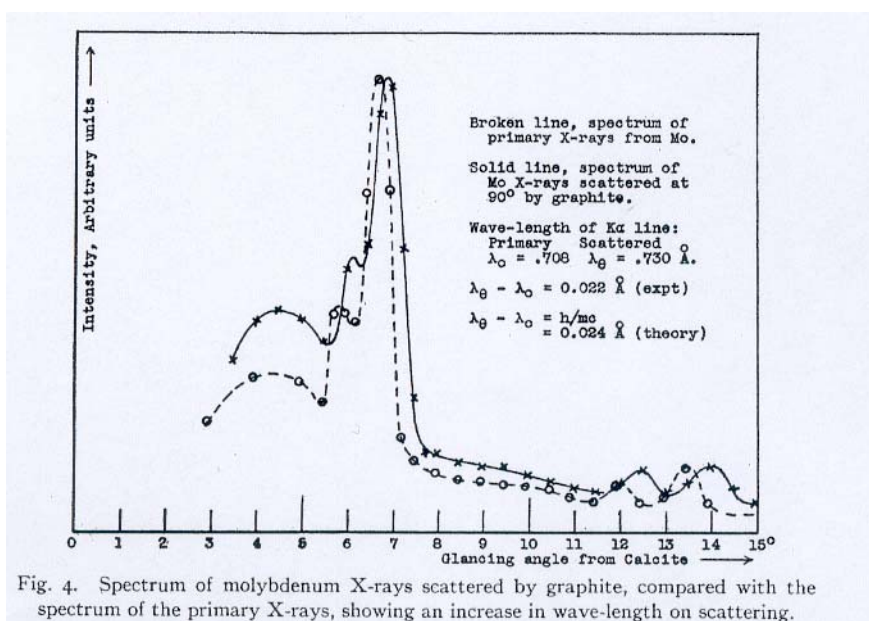
²⁰⁰ From the point of view of the quantum theory, we may suppose that any particular quantum of X-rays is not scattered by all electrons in the radiator, but spends all of its energy upon some particular electron. This electron will in turn scatter the ray in some definite direction, at an angle with the incident beam. This bending of the path of the quantum of radiation results in a change in its momentum. As a consequence, the scattering electron will recoil with a momentum equal to the change in momentum of the X-ray. The energy in the scattered ray will be equal to that in the incident ray minus the kinetic energy of the recoil of the scattering electron; and since the scattered ray must be a complete quantum, the frequency will be reduced in the same ratio as is the energy. Thus on the quantum theory we should expect the wave-length of the scattered X-rays to be greater than that of the incident rays.



Compton en déduit alors simplement²⁰¹ la longueur d'onde λ_θ du rayonnement diffusé dans la direction faisant l'angle θ avec la direction du rayonnement incident de longueur d'onde λ_0 :

$$\lambda_\theta = \lambda_0 + \frac{2h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad \text{soit numériquement}^{202} \quad \lambda_\theta = \lambda_0 + 0.0484 \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

La figure ci-dessous reproduit les spectres obtenus par Compton par diffusion du rayonnement X issu d'une source de Molybdène sur du graphite²⁰³. La courbe en trait plein représente le spectre du rayonnement diffusé et la courbe en pointillés le spectre de la source de rayonnement X. La détection se fait perpendiculairement au faisceau incident.



Compton en tire la conclusion suivante :

²⁰¹ pp. 486-487.

²⁰² p. 494

²⁰³ On notera que le spectre est réalisé grâce à un « spectromètre de Bragg » qui exploite l'aspect ondulatoire du rayonnement X

Cit. On remarquera que la longueur d'onde du rayonnement diffusé est sans aucun doute plus grande que celle du rayonnement primaire qui le génère. Ainsi la raie K_{α} du molybdène a une longueur d'onde de 0.708Å. La longueur d'onde de cette raie dans le faisceau diffusé est 0.730Å dans ces expériences. Soit,

$$\lambda_{\theta} - \lambda_0 = 0.022 \text{ \AA} \quad (\text{expérience})$$

Mais d'après la théorie développée,

$$\lambda_{\theta} - \lambda_0 = 0.0484 \sin^2 45^{\circ} = 0.024 \text{ \AA} \quad (\text{théorie})$$

qui présente un très bon accord²⁰⁴. *p.* 495.

Compton mène d'autres expériences qui confirment ce premier résultat. La mesure de l'énergie de recul des électrons grâce à la chambre d'ionisation mise au point par Wilson accrédite ces prédictions. Compton et Wilson recevront le prix Nobel de 1928.

Ces expériences corroborent l'idée que le rayonnement puisse lui-même être quantifié, et que les quanta, dotés d'une énergie et d'une quantité de mouvement propres, ont une certaine « réalité ». Cette interprétation appuie la « théorie quantique » de l'effet photoélectrique dans laquelle Einstein avait introduit l'hypothèse des quanta lumineux.

²⁰⁴ It will be seen that the wave-length of the scattered rays is unquestionably greater than that of the primary rays which excite them. Thus the K_{α} line from molybdenum has a wave-length 0.708Å. The wave-length of this line in the scattered beam is found in these experiments, however, to be 0.730Å. That is,

$$\lambda_{\theta} - \lambda_0 = 0.022 \text{ \AA} \quad (\text{experiment})$$

But according to the present theory,

$$\lambda_{\theta} - \lambda_0 = 0.0484 \sin^2 45^{\circ} = 0.024 \text{ \AA} \quad (\text{theory})$$

which is a very satisfactory agreement.

XX. Bibliographie.

- Aristote, *de l'âme*, texte établi par A. Jannone, trad. Et notes de E. Barbotin, Paris, les Belles Lettres, 1966
- Aristote, *de sensu*, in *Parva Naturalia*, trad. et notes par J. Tricot, Jean Vrin, 1976
- Aristote, *Météorologiques*, trad. Et notes par J. Tricot, Paris, les Belles Lettres, 1951.
- André Marie Ampère, *De la théorie des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience*. Ed. Jacques Gabay, 1990.
- Belaval Y., *Leibniz critique de Descartes*, TEL Gallimard, 1960
- Blay M., *La naissance de la science classique au XVII^{ème} siècle*, Nathan Université 1999
- Blay M., *Lumières sur les couleurs*, L'esprit des sciences, Ellipse, 2001.
- Bracco C., Provost J.-P., *Quanta de Planck, d'Einstein et d'« aujourd'hui »*, à paraître dans le *Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales*, avril 2005.
- Bradley J., *Philosophical transactions*, 1728.
- Boltzmann L., *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht*, in *Graz Sitzb. D. Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissen Cl. LXXVI, Abt II*, 1877.
- Bohr N., *The Philosophical Magazine*, juillet 1913, T.XXVI, pp.1-25.
- Cornu A., *note D1 des Annales du bureau des longitudes*, 1891.
- Compton A. H., *A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements*, 1923
- Descartes R., *Discours de la méthode*, suivi de la *Dioptrique*, Folio, Essais.
- Descartes R., *Œuvres Philosophiques*, tomes I et III, classiques Garnier, édition de F.Alquié.
- Mathieu J.P., Kastler A., Fleury P., *Dictionnaire de physique*, 3^{ème} édition, Masson Eyrolles, 1983.
- Djebbar A., *une histoire de la science arabe*, entretiens avec J. Rocmorduc, Points Sciences, Seuil, 2001.
- Diderot, d'Alembert, *Encyclopédie, ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers*. Troisième édition. Jean-Léonard Pellet, Neuchatel, 1778.
- Euclide, *L'optique et la catoptrique*, trad. De Paul Ver Eecke, Albert Blanchard, 1959.
- Einstein A., *Œuvres choisies*, vol.I *Quanta*, Sources du savoir, Seuil.
- Einstein A., *Sur l'électrodynamique des corps en mouvements*, Œuvres Choiesies, vol. 2, Relativités I, Françoise Balibar, Sources du Savoir, Seuil/CNRS, 1993. Article original in *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905.
- Fresnel A., *Œuvres complètes*, Paris, Imprimerie Impériale 1868, réimp. librairie Albert Blanchard, Paris.
- Fermat P., *Précis des œuvres mathématiques*, par E. Brassine, ed. Jacques Gabay.
- Fizeau H., *Compte rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences*, séance du 25 juillet 1850.
- Fizeau H., *Compte rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences*, ..., 1851.
- Fizeau H., *Annales de Chimie et de Physique*, tome 19, pp. 211-221, 1870.
- Foucault L., *Compte rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences*, séance su 08 mai 1850.
- Galileo Galilei, *Le Messenger des étoiles*, Fernand Haittyn, Sources du Savoir, Seuil CNRS, 1992.

- Grant E., *La physique au Moyen-Age*, trad. de P.-A. Fabre, Paris, puf, 1995.
- Grimaldi, F. M., *Physico-Mathesis de Lumine, coloribus et iride*
- Hooke R., *Micrographia : or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon*, London, 1665. reprint, Science Heritage Ltd, Lincolnwood, Illinois. 1987.
- Huygens C., *Traité de la Lumière*, Paris, Dunod, 1992
- Kastler A., *Max Planck et le concept de quantum d'énergie lumineuse $\varepsilon=h\nu$* , BUP 797 (octobre 1997)
- Kepler J., *Discussion avec le messenger celeste, Rapport sur l'observation des satellites de Jupiter*, Isabelle Pantin, Paris, Les Belles Lettres, 1993.
- Kepler J., *Paralipomènes à Vitelion*, les fondements de l'optique moderne, trad. intro. et notes C. Chevally, Paris, J. Vrin, 1980.
- Lindberg D.C., *Theories of vision from al-Kindi to Kepler*, University of Chicago press, cop. 1976.
- Lindberg D.C., *Roger Bacon and the origins of Perspectiva in the Middle Ages*, Oxford University Press, 1996.
- Lloyd Geoffrey E.R., *Une histoire de la science grecque*, trad. J. Brunshwig, Points Sciences, Seuil, 1990.
- Locqueneux R., *Histoire de la physique. Que sais-je. Vol. 421*. Puf.
- H.A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Leyde, 1895, §§ 89-92, cité par R. Dugas, dans *Histoire de la Mécanique*, Editions Jacque Gabay, 1996, p. 451, ré-impression de l'édition des Editions du Griffon, Neuchatel, 1950.
- H.A. Lorentz, *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, Proceed. Acad. Amsterdam, vol. 6, 1904, p. 809
- H. A. Lorentz, *Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique*, Acta Mathematica, t.38, p. 293-308, 1921, et dans les Œuvres de Henri Poincaré, vol. XI., p. 248.
- Lucrece, *De la nature*, texte établi et traduit par A. Ernout, Paris, Les Belles Lettres, 1994.
- Maitte B., *La lumière*, Points Sciences, Seuil, 1981.
- Malus, E.L., *Mémoire, Compte rendus des séances de l'Académie des Sciences, tome 33, 1810*.
- Maupertuis, *Œuvres complètes*, 1756.
- Maxwell, J. C., *A Treatise on Electricity & Magnetism*, Dover.
- Michelson A.A., *The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether*, The American journal of science, pp. 120-129, vol. 22, 1881.
- Michelson A.A. and Edward W. Morley, *On the relative motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, The American Journal of Science, pp. 333-345, vol. XXXIV, nov. 1887.
- Newton I., *Optique*, trad. J.P. Marat, Paris, Christian Bourgeois, 1989
- Newton I., *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Du Chatelet (marquise), réimp. J. Gabay, 1990.
- Niven W. D., *The Scientific Papers of James Clerck Maxwell*, New York, Dover Publications. Ré-impression de l'édition originale de 1890.
- Perrin J., *Les atomes*, 1913, collection Champs Flammarion, 1991
- Planck M., *Autobiographie scientifique et derniers écrits*, Collection Champs Flammarion, 1991. Intr., trad. Et notes André George.
- Planck M. *Eight Lectures on Theoretical Physics*. Dover Publications. 1998. reprint. delivered at Columbia University in 1909, Columbia University Press 1915.
- Planck M., *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge*. Annalen der Physik. Vol. 1, 1900, p. 69-112.

- M. Planck, *Entropie und Temperatur strahlender Wärme*, Annalen der Physik. reçu 22 mars 1900. p.730
- Planck M., in Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft im Jahre 1900, Leipzig, 1900, p. 202-204.
- Planck M., *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*, Annalen der Physik, vol. IV, 1901, pp. 553-563.
- Planck M., *The theory of heat radiation*. Dover Publications. New York. 1991. Translation of the second edition of *Waermestrahlung* as originally published by P. Blakiston Son & Co., 1914.
- Platon, Timée, texte établi et traduit par A. Rivaud, Tel, Gallimard.
- Platon, Théétète, trad. notices et notes E. Chambry, GF-Flammarion
- Poincaré H., *sur la dynamique de l'électron*, Estratto dal tomo XXI (1906) dei *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, republié dans *La Mécanique Nouvelle*, ré-impression par Jacques Gabay (1989) de l'édition originale publiée par Gauthiers-Villard en 1924.
- Poincaré H., *La valeur de la science*, p. 127, 1905 (Coll. Champs Flammarion, 1970).
- Rashed R., Géométrie et dioptrique au X^{ème} siècle, Les belles lettres, Paris, 1993.
- Rodis-Lewis G., Descartes, *Textes et débats*, le livre de poche.
- Roemer O., *Journal des Sçavans*, 1676.
- Ronchi V., *Histoire de la Lumière*, trad. Juliette Taton, ed. Jacques Gabay, 1996.
- Sabra A. I., *The optics of Ibn Al-Haytham*, trad. intro. et notes, London Warburg Institute, 1989.
- Siegel D. M., *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory, molecular vortices, displacement current, and light*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- Tourenç P., *Relativité et gravitation*, Collection S, Armand Colin, 1992.
- Wittaker E., *A history of the theories of Aether and Electricity*, Tomash Publishers, American Institute of Physics.
- Young, in *Philosophical Transactions, 1802 et 1804*.
- Les Cahiers de Science et Vie, *La vitesse de ma lumière*, HS 25, fév. 1995.
- Les Cahiers de Science et Vie, *Hertz*, HS 30, déc. 1995.
- Les Cahiers de Science et Vie, *Champ électromagnétique*, no 67, février 2002.
- Les Cahiers de Science et Vie, *Comment la lumière est devenue une onde*, no 65, octobre 2001.
- Les Cahiers de Science et Vie, *La nature et le principe de moindre action*, avril 2002.