

Chapitre VI I

HISTOIRE DE L'OPTIQUE.**1. L'ANTIQUITE.**

Dans la Grèce antique, deux hypothèses étaient émises sur la nature de la lumière: Selon les pythagoriciens la vision est due à un "*rayon visuel*" qui, émis par l'œil, atteint l'objet. Quant aux atomistes, il pensent que la vision est due à une "*émanation*" de formes (*simulacres*) qui se détachent de l'objet et parviennent à l'œil.

Elles "se détachent de la surface même des corps.. s'élancent dans l'air en conservant leurs formes...entrent en nous en reproduisant les objets.. Sous des grandeurs proportionnellement réduites"¹

Cette deuxième hypothèse est obtenue par analogie: La chaleur est une émanation du feu qui parvient à la peau, la vision équivaldrait à un "toucher" par l'œil.

Aristote rejette ces deux hypothèses ²: La première parce que

" s'il arrivait qu'on vît à l'aide d'un feu sortant de l'œil comme à l'aide de la lumière qui sort d'une lanterne pourquoi l'œil ne verrait-il pas au milieu des ténèbres ?".

Quant à la seconde, il la qualifie d'absurde

" car il faudrait qu'ils (*les anciens*) eussent établi d'abord que nous sentons toute chose par le toucher "

Il propose l'hypothèse d'une vibration lumineuse du milieu.

"Il vaut mieux convenir que la sensation naît du mouvement excité par le corps sensible dans le milieu intermédiaire "

Le physicien anglais Thomas Young, qui découvrira au XIX^{ème} siècle le phénomène d'interférences lumineuses, écrira ³ :

Il paraît évident que l'ancien philosophe a soutenu la même doctrine de la transmission de la lumière au travers des substances transparentes, qu'Euler a mis ensuite tant de chaleur à défendre

C'est un raisonnement par analogie qui a permis à Aristote d'émettre cette hypothèse. En effet, en acoustique, Pythagore associe à chaque son, un

¹ Lucrèce cité par Maitte page 14

² Vasco Ronchi p 11 à 13

³ Rosmorduc: *Histoire de la Physique* T 1 p. 27

nombre, de même, il est possible d'associer à chaque couleur un nombre. Pour Pythagore "tout est nombre" :

Ces philosophes remarquèrent que tous les modes de l'harmonie musicale et les rapports qui la composent se résolvent dans des nombres proportionnels.⁴

Le célèbre mathématicien Euclide (-325, -265) a laissé un ouvrage " *Optique et catoptrique*" qu'il présente comme un traité de mathématiques. Il part de postulats : Dans le premier postulat de "l'Optique" il reprend l'idée des rayons visuels et énonce le principe de la propagation rectiligne de la lumière :

"Les rayons émis par l'œil se transmettent en ligne droite".

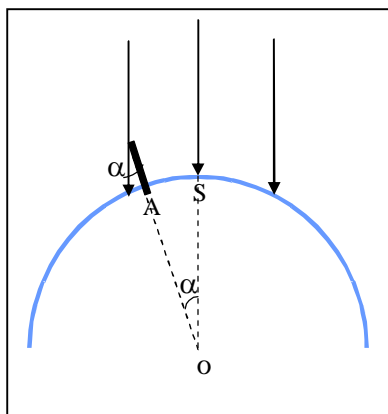
Les postulats N° 2,3,4, 12, 14 déterminent le *champ de vision*. Les postulats N° 5 à 11 concernent la *perspective*. Dans le 13^{ème} postulat il énonce :

"Tous les rayons ont la même vitesse".

Dans la "Catoptrique", il pose, de nouveau, le principe de la propagation rectiligne (postulats N° 1 & 2), il donne les lois de la *réflexion* des miroirs (postulats N° 3 à 6), le postulat N° 7 concerne le *rapprochement* des objets placés dans l'eau

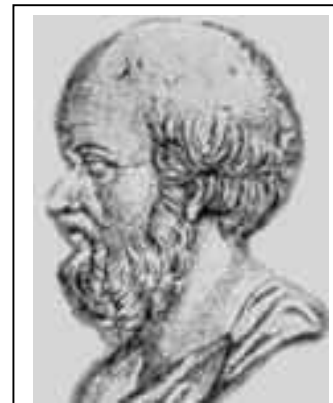
Ronchi considère Euclide comme le fondateur de l'optique géométrique.

La propagation rectiligne de la lumière étant connue, Eratosthène, qui fut directeur de la grande bibliothèque d'Alexandrie, a mesuré vers - 205 le rayon de la Terre.



Au moment du solstice d'été, à Syène (aujourd'hui Assouan) le Soleil se trouve à la verticale, il ne donne aucune ombre, car Syène est sur le tropique du Cancer.

À Alexandrie, Eratosthène se servant de l'ombre projetée par un gnomon, mesure au même moment l'angle que forment, avec la verticale, les rayons du Soleil

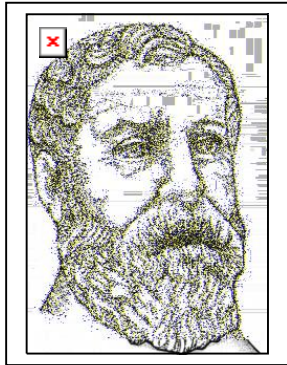


Exercice : Au cours de ses mesures Eratosthène trouva $\alpha = 7^{\circ}12'$ et il savait que la distance Syène – Alexandrie faisait environ 5000 stades et que ces deux villes se trouvaient à peu près sur un même méridien. Quelle est la valeur du rayon R de la Terre trouvée par Eratosthène ?

Quelle est la précision de cette mesure, sachant que les mesures actuelles donnent $R = 6378 \text{ Km}$? (1 stade vaut 157, 50 mètres)

⁴ Aristote, *Métaphysique*, A, 5, p. 57.

Héron d'Alexandrie, qui vécut au premier siècle, a posé⁵ un principe analogue à celui que Fermat énoncera au dix septième siècle.



Selon Héliodore de Larisse : 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.

Mais il y a une différence de taille entre le principe de Fermat où intervient le "chemin optique" et celui d'Héron où il s'agit de "chemin géométrique". (Voir § 3.1.)

C'est la raison pour laquelle Héron retrouve la loi de la réflexion car les rayons restent toujours dans le même milieu, mais donne une loi fausse pour la réfraction, car dans ce cas, la lumière traverse deux milieux différents.

Ptolémée, déjà célèbre par ses travaux en Astronomie, s'est intéressé également à l'optique. Comme de nombreux savants grecs, il pensait que la lumière était émise par l'œil qui se comporte comme un émetteur et un récepteur. Les lois de la réflexion de la lumière étaient connues, mais le mérite de Ptolémée est d'avoir procédé à leur vérification expérimentale. Il montre à l'aide d'expériences sur des miroirs plans, concaves et convexes que les angles d'incidence et de réflexion sont égaux. Il entreprend également des expériences sur la réfraction de la lumière

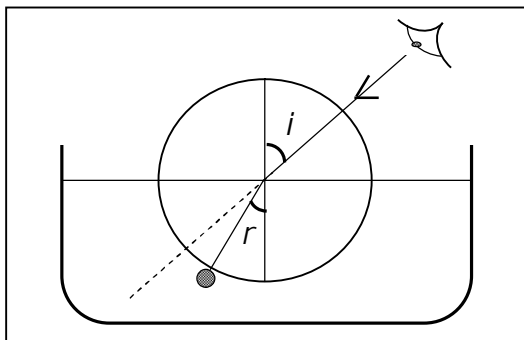


Figure VI.6 Schéma dessiné à partir de la figure 42 de Lloyd

Il commence par décrire son dispositif expérimental. Il utilise un disque circulaire divisé en quatre parties égales, chacune d'elles comporte 90 graduations.

Le disque étant placé à la surface de l'eau, comme le montre la figure ci-contre, il procède alors aux mesures des angles d'incidence i et de réfraction r .

Il présente ses résultats sous forme de tables numériques.

Par exemple⁶ :

$$i = 10^\circ \quad r = 8^\circ,$$

$$i = 20^\circ \quad r = 15^\circ 30'$$

⁵ Vasco Ronchi p 22 à 23

⁶ Lloyd page 329

2. LE MOYEN ÂGE :

En pays d'Islam, de nombreux savants se sont intéressés à l'étude de la lumière. Parmi les plus célèbres, citons deux grands savants qui vécurent à peu près à la même époque dans l'actuel Irak : Ibn Sahl (940-1000) qui vécut à Baghdad et Ibn Al Haytham (Alazen), né en 965 à Bassora , décédé en 1039 au Caire.

Une loi de la réfraction a été énoncée par Ibn Sahl, il montre, à partir des deux triangles rectangles portés en haut à gauche sur la figure VII.2, que le rapport des deux hypoténuses est constant. Celles-ci représentent le rayon réfracté et le prolongement du rayon incident qui aboutissent au même point. La loi de la réfraction d'Ibn Sahl peut présentée sous la forme :

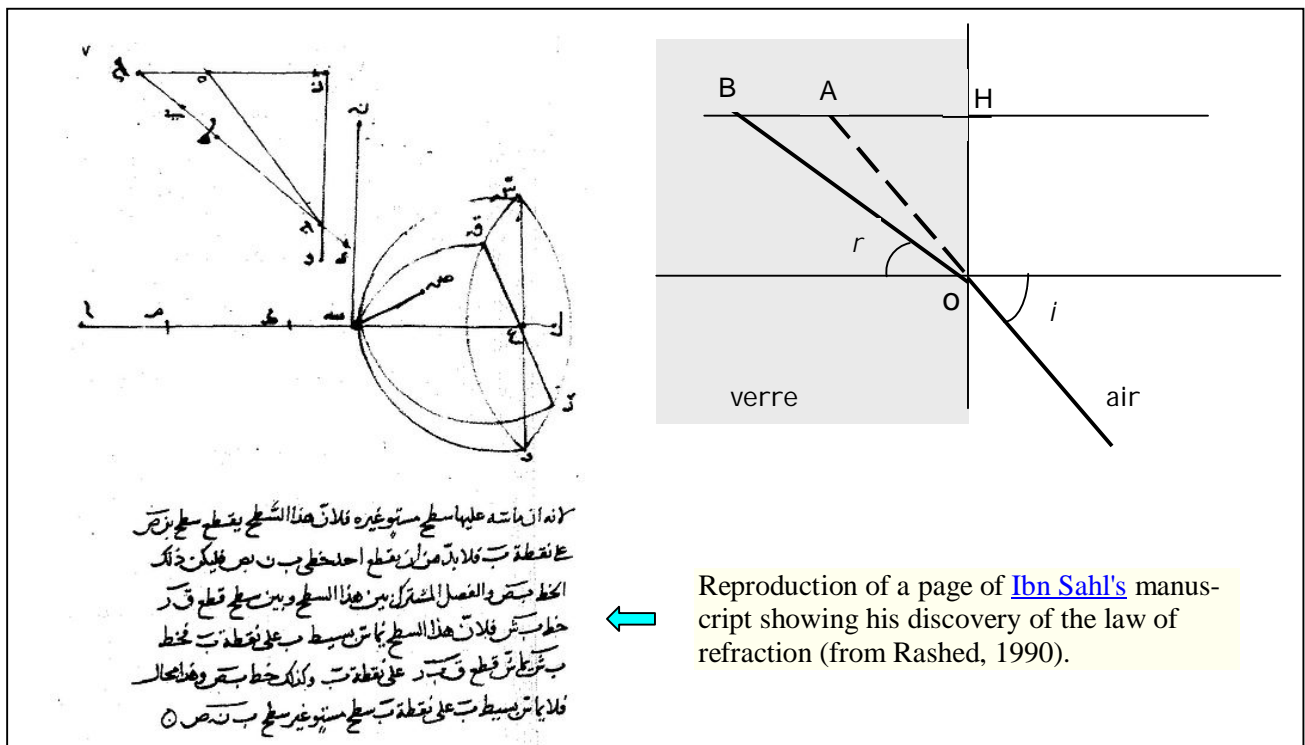
$$\frac{OB}{OA} = k \quad \text{où } k \text{ est une constante} \quad (a)$$

On peut retrouver, à partir de cette loi, celle que donneront sept siècle plus tard Snell et Descartes. En effet , la figure montre que :

$$\frac{OH}{OA} = \sin i \quad \& \quad \frac{OH}{OB} = \sin r \quad (b)$$

A partir de (a) & (b) on obtient la loi des sinus:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = k$$



Figures VII.2

Ibn Sahl a également effectué de nombreux travaux sur les miroirs et sur les lentilles. Le manuscrit reproduit sur la figure porte sur l'étude du trajet de rayons lumineux à travers une lentille bi-convexe limitée par 2 hyperboles

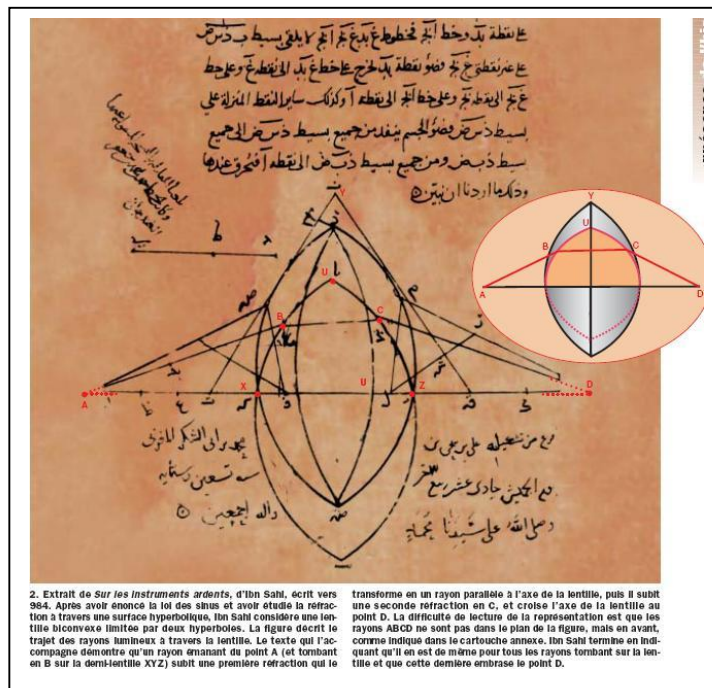
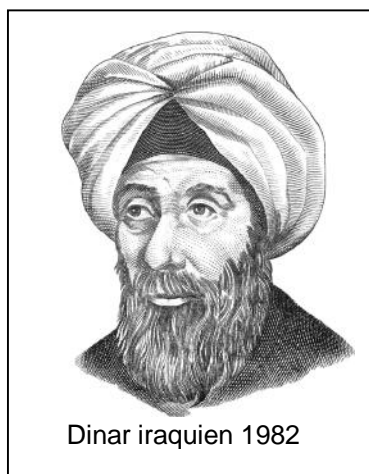


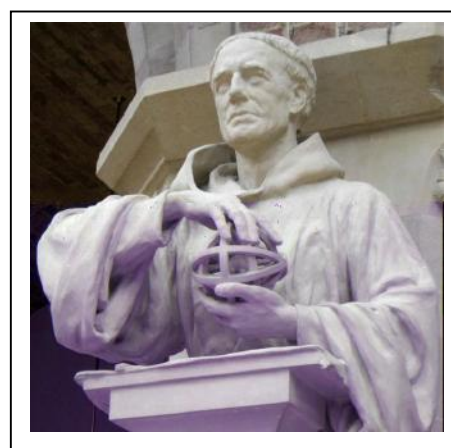
Figure VII.3.

Ibn Al Haytham apporta une importante contribution à l'optique, à l'astronomie ; il entreprit plusieurs expériences en l'optique et écrit de nombreux ouvrages dont "*Kitab al manadhir*".

Il a été le premier à préconiser que la lumière a une existence propre et n'est pas émise par l'œil de l'observateur comme le pensaient les grecs dans l'antiquité, mais par une source de lumière.



Ibn Al Haytham 965 1039



Roger Bacon 1214- 1294

Selon Rossmorduc, c'est Ibn Al Haytem qui introduit le concept de "*rayon lumineux*" qui n'apparaît pas dans les textes grecs, "*ce qui marque un vrai tournant conceptuel dans l'histoire de l'optique géométrique*".

Il découvre le principe de la chambre noire, traite les problèmes relatifs à l'arc en ciel, aux éclipses, etc..

Selon Djebbar, Ibn Al Haïtem

"adopte une démarche faite d'expériences, d'inductions, de raisonnements, de retours à l'expérience, pour expliquer ou justifier les affirmations qu'il avance, en particulier celles qui contredisent les théories anciennes de la lumière"⁷.

En Europe Au XI^{ème} siècle, les artisans verriers italiens fabriquent des "lentilles" appelées ainsi en raison de leur forme semblable au légume.

Robert Grossetête (1168, 1253) après avoir étudié les traités d'Ibn Al Haytem, s'intéresse à l'optique. Il découvre que les lentilles, utilisées jusqu'à cette époque pour mettre le feu, peuvent servir de loupe.

Il écrit :

" si nous comprenons bien cette partie de l'optique, nous pourrions faire apparaître comme toutes proches les choses"⁸

C'est ainsi que les lentilles convexes ont pu servir à corriger la presbytie, puis on découvrit que les lentilles concaves corrigent la myopie.

Le savant anglais Roger Bacon (1214, 1294) reprend l'étude de la réfraction (expérience du bâton brisé, lentilles). Il donne les conditions d'observation d'un arc en ciel et les positions des différentes couleurs.

3. L'OPTIQUE AU XVII^{ème} SIÈCLE.

Comme nous venons de le voir, l'étude de la lumière a, depuis l'antiquité, suscité l'intérêt des savants, mais ce n'est qu'à partir du dix septième siècle qu'une étude approfondie de l'optique fut menée par de nombreux physiciens, dont Isaac Newton et Christiaan Huygens. Car c'est au cours de ce siècle qu'est née la physique moderne, une physique basée sur l'expérimentation et le calcul mathématique.

3.1. Les précurseurs de Newton et d' Huygens.

Les lois de l'optique géométrique, ébauchées dans l'antiquité et au moyen âge, seront définitivement énoncées au cours du dix septième siècle. L'œuvre d'Ibn Al Haythem a inspiré le savant polonais Vitellion (1230-1300), et c'est à partir de ces travaux que Képler a écrit un livre paru en 1604 "*les paralipomènes à Vitellion*"⁹.

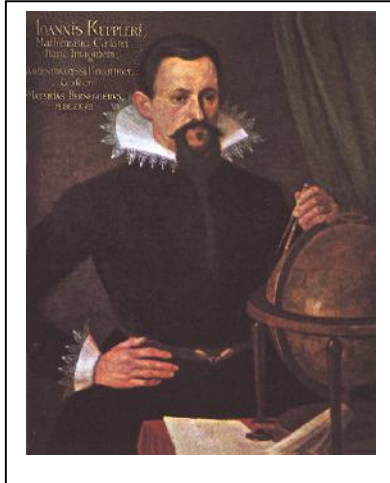
⁷ Djebbar : Une histoire de la science arabe p 229

⁸ Dans Maitte "*La lumière*" p 31

⁹ Johannes Kepler : "*les paralipomènes à Vitellion*" (1604) Les fondements de l'optique moderne : Trad, introd, et notes de Catherine Chevalley Ed ; Vrin Paris 1980.
Les "*paralipomènes à Vitellion*" signifient : les *suppléments* à l'œuvre de Vitellion.

Képler souligne la propagation rectiligne de la lumière et introduit la notion de surface d'onde qui sera développée par Huygens :

“Dans la lumière, le mouvement est simplement une ligne et ce qui se déplace est une certaine surface¹⁰”



Johannes KEPLER 1571-1630



Willebord SNELL 1580-1626

A partir des travaux de Képler, le savant hollandais W. Snell donne en 1620 la loi de la réfraction. Une dizaine d'années plus tard, René Descartes retrouve cette loi en considérant la propagation de corpuscules de lumière. Descartes, dans *la dioptrique* (1637), compare le trajet d'un rayon de lumière, à la trajectoire d'une balle lancée à l'aide d'une raquette.

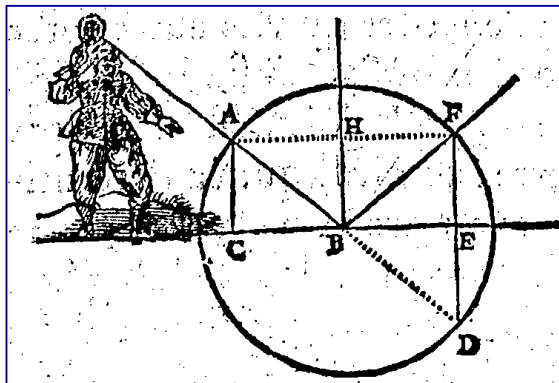
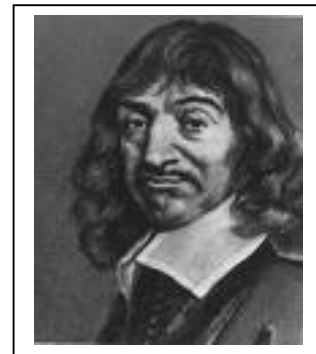


Figure VII. 4



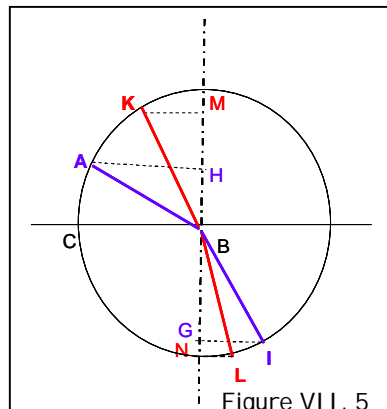
René Descartes 1596 -1650

Il retrouve la loi de la réflexion :

La réflexion se fait selon un angle toujours égal à celui qu'on nomme l'angle d'incidence.

¹⁰ Cité par Ronchi p 76

En ce qui concerne la réfraction¹¹, il compare, là encore, le passage de la lumière d'un milieu à un autre, à celui de la balle lancée avec une raquette



Il considère (figure ci-contre), deux trajets: ABI et KBL et arrive à la conclusion :

Il doit avoir même proportion entre les lignes KM et LN qu'entre AH et IG, Mais non entre les angles KBM et LBN qu'entre ABH et IBG

La relation $\sin i_1 = n \sin i_2$ n'apparaît pas explicitement dans la "dioptrique" de Descartes.

On trouve, dans l' "opticks" de Newton (1704), que *le sinus de l'angle d'incidence est proportionnel au sinus de l'angle de réfraction* (Axiome V)

Selon ce modèle corpusculaire :

la vitesse de la lumière est plus grande dans l'eau que dans l'air.

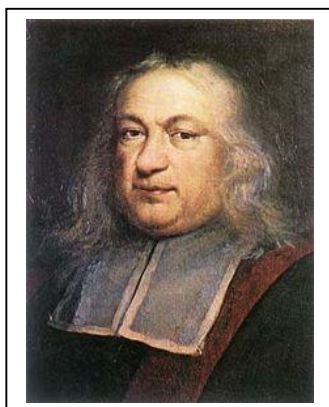
Pierre de Fermat, célèbre mathématicien énonce un principe d'économie naturelle appliqué à l'optique :

La durée du trajet d'un rayon lumineux, à travers différents milieux, est minimale ¹².

Toutes les lois de l'optique géométrique peuvent être démontrées à partir de ce principe.

J'ai trouvé que mon principe donnait justement et précisément la même proportion des réfractions que M. Descartes a établie

Mais dans cette démonstration *la vitesse de la lumière est plus faible dans le verre (ou l'eau) que dans l'air.*



Pierre Fermat 160 ? -1665



Francesco Grimaldi 1618 -1663

¹¹ Comparer les résultats obtenus par Descartes, dans le cas de la réfraction à ceux d'Ibn Sahl. Les œuvres de ce derniers n'ont été retrouvées qu'à la fin du vingtième siècle.

¹² C'est à partir du principe de Fermat que Maupertuis (1698-1759) énonce, en 1744, le célèbre principe de moindre action : L'action est égale à la masse multipliée par la vitesse puis par l'espace parcouru.

Galilée ne s'intéressa pas à l'optique mais sa contribution à cette science a été non négligeable grâce à la construction de sa lunette. Il reçut de violentes attaques de la part de ses contemporains :

” La lunette fait voir des figures plus grandes que les objets réels ou plus proches; elle les fait voir colorés ou déformés, donc elle trompe et ne fait pas connaître la vérité.¹³

Képler, appelé à donner son avis, adopte d'abord une position neutre, puis, après l'avoir utilisée en astronomie, il se range du côté de Galilée et lui écrit : *“Vicisti, Galilae”* : Galilée, tu a vaincu.

Au milieu du siècle, Francesco Grimaldi¹⁴ découvre un phénomène nouveau qu'il appelle “diffraction de la lumière.

”. La lumière non seulement se propage rectilignement, se réfracte, se réfléchit, mais encore se diffracte.

Ses expériences sont menées dans une chambre obscure fermée par un rideau muni d'une petite ouverture traversée par la lumière du soleil. Grimaldi plaçait, sur le trajet du faisceau lumineux, différents obstacles et observait la figure de diffraction sur un écran. Cette façon d'opérer sera utilisée par Newton (voir figure VII.7)



Robert Hooke 1635 -1703

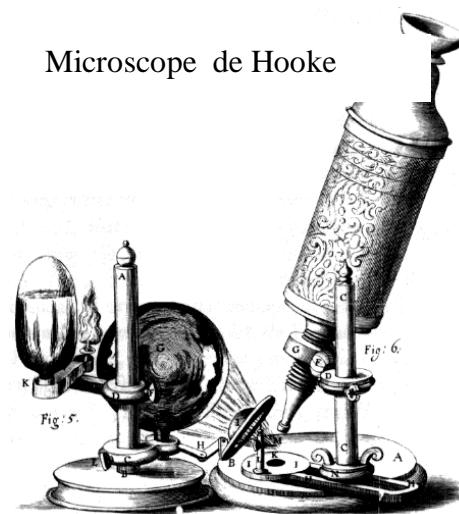


Figure VII. 6

Robert Hooke¹⁵, observe au microscope, instrument qu'il venait d'inventer, des franges et des anneaux colorés, obtenus dans des lames minces, à partir de la lumière blanche. Ce phénomène sera étudié par Newton. Selon Hooke la lumière serait *due à un mouvement vibratoire de la matière*

¹³ Ronchi : page 83

¹⁴ Les travaux de Grimaldi sont publiés en 1665 dans un ouvrage posthume intitulé : *“Physico-mathesis de Lumine, coloribus et iride”*

¹⁵ Hooke est connu pour sa Loi de l'élasticité découverte en 1660 (*loi de Hooke*)



En 1669, le savant danois Erasme Bartholin (1625-1698) découvre, à partir d'expériences sur des cristaux de spath d'Islande, un "étrange phénomène" qu'il appelle *biréfringence*.

La lumière subit une double réfraction :

La *réfraction ordinaire* obéit à la loi de Snell et la *réfraction extraordinaire* ne la suit pas. Selon Bartholin, ce cristal comporte deux sortes de pores, les particules de lumière empruntent alors deux trajets différents.

Toutes ces découvertes vont permettre à Isaac Newton et Christian Huygens d'élaborer, chacun de son côté, deux théories contradictoires sur la nature de la lumière. Newton suppose que la lumière est formée de corpuscules en mouvement dont les trajectoires constituent les rayons lumineux. Huygens, quant à lui, rejette cette théorie et, en procédant par analogie avec les ondes sonores, il propose une théorie ondulatoire de la lumière.



Isaac NEWTON 1642-1727



Christiaan HUYGENS 1629-1695

3.2. La théorie de Newton.

Les travaux de Newton relatifs à l'optique sont rapportés dans un ouvrage intitulé "*Opticks*". Il explique la réfraction par l'existence d'une force d'origine gravitationnelle, qui agit, à l'interface des deux milieux, sur les particules de lumière. Il retrouve la loi des sinus et montre que la vitesse est d'autant plus grande que le milieu est dense.

Il découvre le phénomène de dispersion en opérant comme Grimaldi dans une chambre noire.

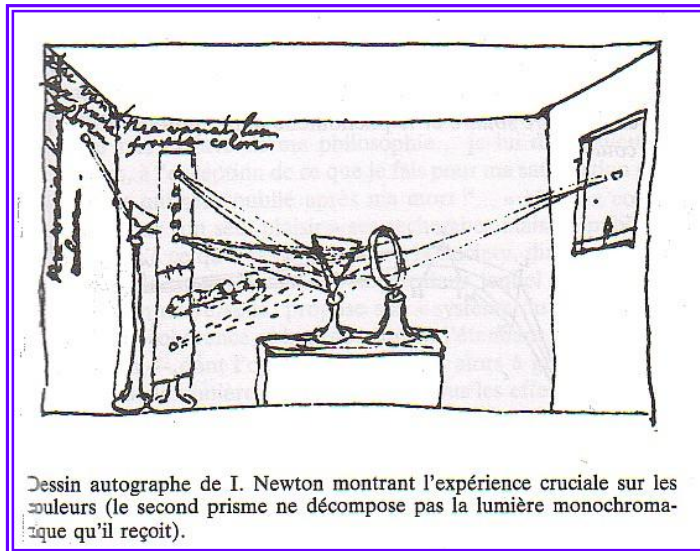
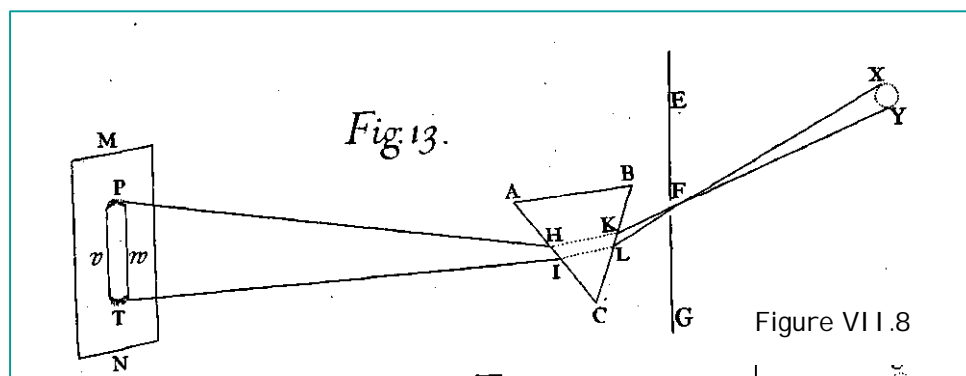


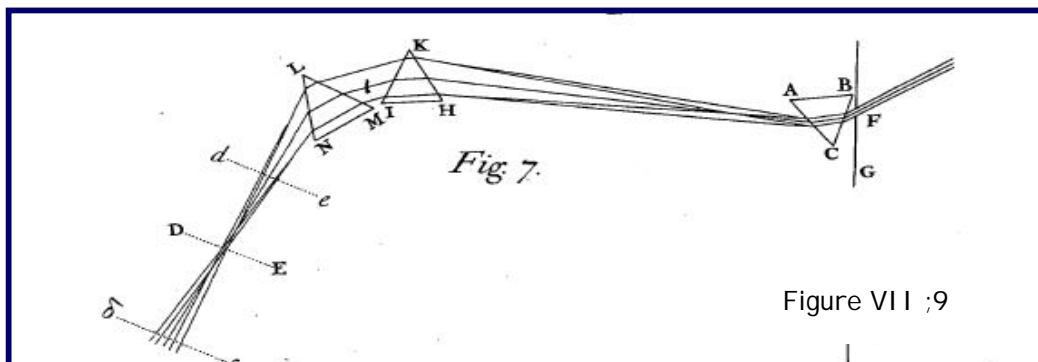
Figure VII. 7

Maitte: *la Lumière* page 119

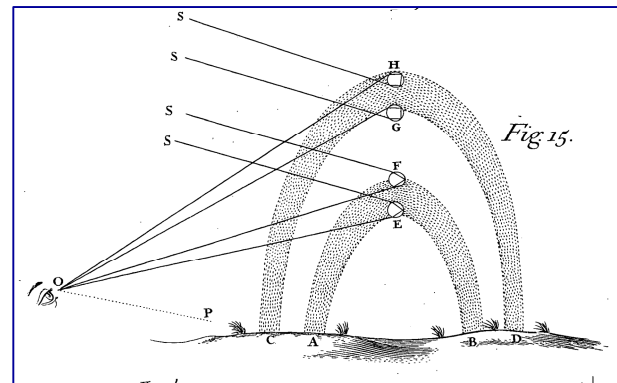
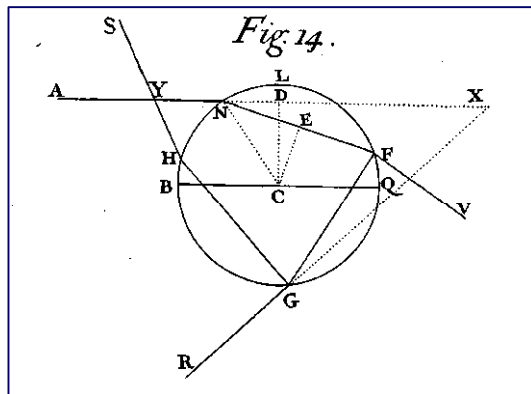
Il montre, à partir de la décomposition, à l'aide d'un prisme, de la lumière blanche émise par le soleil, que celle-ci se compose des "sept" couleurs de l'arc en ciel. Il relie chaque couleur de la lumière à un degré de réfrangibilité du prisme ; autrement dit, l'indice de réfraction du milieu varie en fonction de la couleur de la lumière.



Inversement le mélange de toutes ces couleurs donnent une lumière blanche. Le spectre de la lumière solaire, est obtenu à partir du prisme ABC. Le faisceau émergent est recomposé, à l'aide des prismes HIK & MNL disposés de façon à avoir un point de convergence sur l'écran DE. Ce *point lumineux sur l'écran DE est banc*.



Ce phénomène lui permet d'expliquer la formation d'un arc en ciel : celui-ci résulte de la dispersion de la lumière solaire par les gouttes de pluie, puis Newton donne les conditions dans les quelles il peut être observé.



Figures VII. 10

Newton entreprend des expériences en lumière monochromatique. A cet effet, à l'aide de diaphragmes, il isole, sur un spectre obtenu à sortie d'un prisme, une lumière monochromatique qu'il envoie sur un autre prisme et constate qu'elle n'est plus décomposée.

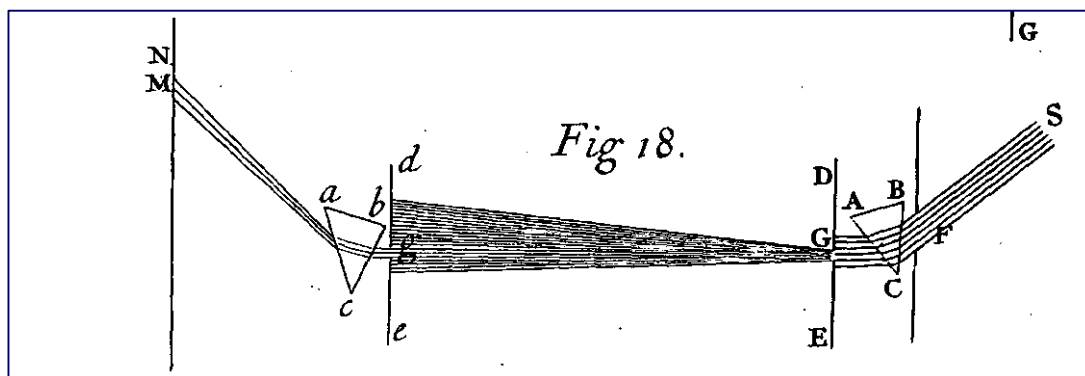


Figure VII. 11

Newton reprend les expériences que Hooke a faites sur des lames minces en lumière blanche. Il met au point un dispositif expérimental, constitué d'une *lame d'air*, d'épaisseur e , comprise entre un plan et une lentille convexe de rayon R très grand. Hooke avait mesuré l'épaisseur de la lame à l'aide de son microscope, Newton calcule e à partir de R , ce qui lui donne des résultats beaucoup plus précis. En outre ce dispositif lui permet de faire des observations par réflexion et par transmission en lumière blanche et lumière *monochromatique*. Il fait plusieurs découvertes : blanc d'ordre supérieur, échelle des teintes etc.. La précision de ses mesures lui permet de trouver les formules des anneaux qui portent son nom. Le phénomène d'interférence étant inconnu à cette époque, Newton explique la formation des "franges" alternativement noires et brillantes par "des zones de facile transmission et de facile réflexion" pour les rayons de lumière.

Les rayons sont plus ou moins réfléchibles selon qu'ils sont renvoyés avec plus ou moins de facilité.

Grimaldi attribue à la lumière quatre propriétés : la propagation rectiligne, la réflexion, la réfraction et la diffraction. Newton, quant à lui, ne considère que les trois premières. Il reprend les expériences de Grimaldi en fait d'autres plus précises mais ne parle jamais de diffraction car elle ne cadre pas avec sa théorie corpusculaire. Il interprète les figures de diffraction obtenues uniquement à partir de la réflexion et de la réfraction de la lumière sous l'action de la force réfringente.

Il donne une explication de la vision : Les corpuscules de lumière en tombant sur la rétine la font vibrer de la même façon qu'une pierre, en tombant sur la surface d'une eau calme, entraîne la formation d'ondes. Les vibrations de la rétine sont transmises au cerveau à travers le nerf optique

Il explique la vision des couleurs : Les corpuscules de lumières sont de grosseurs différentes, en excitant la rétine, les plus petites donnent une sensation de violet et les plus grosses une sensation de rouge.

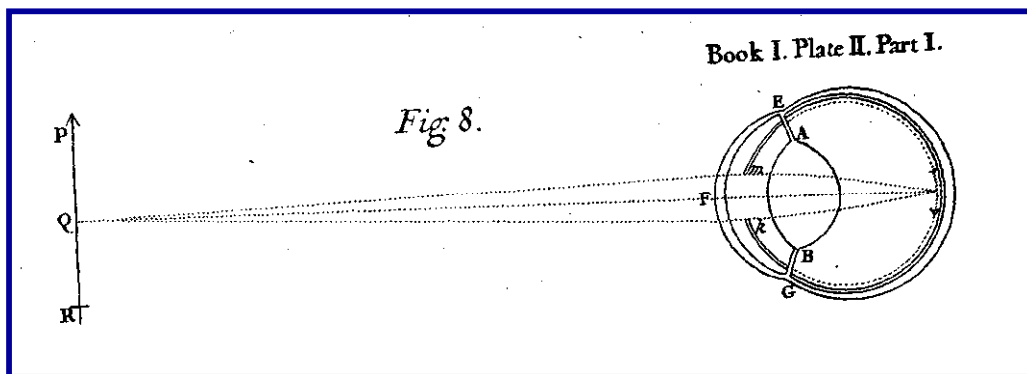


Figure VII. 12

En ce qui concerne la biréfringence, Newton rapporte les expériences de Bartholin, d'Huygens puis les siennes. Il suggère l'idée d'une *polarisation* des particules lumineuses à l'image de petits aimants. Cette idée sera reprise par Malus au XIXe siècle.

3.3. La théorie d'Huygens.

En 1691 Huygens publie le "Traité de la lumière" dans lequel on trouve les phénomènes de propagation, de réflexion et de réfraction et de biréfringence. Mais il n'étudie ni la diffraction ni la dispersion.

Huygens opte pour une théorie ondulatoire de la lumière. En effet Si la lumière était formée de particules, comment expliquer l'intersection des rayons sans chocs entre les particules de lumière. Donc, la lumière est un mouvement: une onde. C'est cette onde qui, en excitant la rétine, crée la vision.

Un raisonnement par analogie avec les ondes sonores montre que le son ne se propage pas dans le vide et nécessite un milieu. La vitesse de propagation du son dans un milieu est finie, et plus le milieu est rigide plus la vitesse est grande. La vitesse de la lumière est, elle aussi, finie, l'astronome Roemer l'a

mesurée, en 1676, à partir d'observations astronomiques. Mais la lumière se propage dans le vide les expériences de Boyle l'ont confirmé.

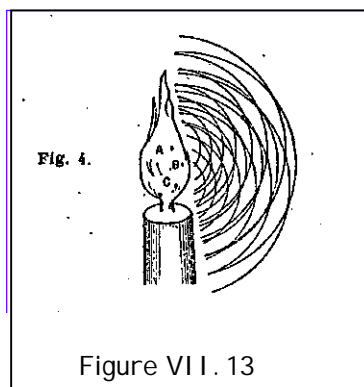
Pour expliquer la propagation de la lumière dans le vide et sa très grande vitesse, Huygens construit un modèle d'éther mécanique dont les particules sont douées d'une très grande élasticité et d'une très grande dureté.

Les particules de l'éther doivent être d'une matière si approchante de la dureté parfaite et d'un ressort que nous le voulons

Dans ce modèle les ondes se croisent sans se gêner.

L'éther, modélisé par des boules sphériques réparties dans les trois dimensions, explique la propagation de la vibration de proche en proche. Dans ce modèle chaque point de l'éther, atteint par l'onde, devient à son tour une *source de lumière secondaire* qui envoie une ondelette :

C'est le principe d'Huygens.



Ainsi, dans le cas d'une source de lumière ponctuelle, les ondes émises sont des sphères concentriques centrées sur la source. Dans le cas d'une source étendue, chaque point se comporte comme une source ponctuelle qui envoie des ondes sphériques. Ces ondes se propagent, *dans l'éther*, sans se gêner et s'ajoutent.

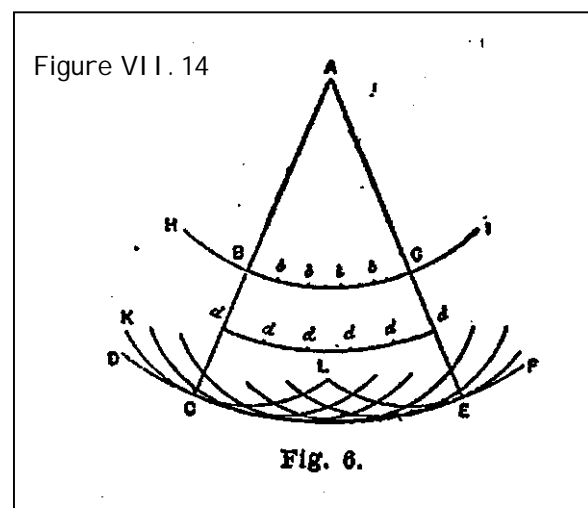
La figure ci-contre explique la propagation rectiligne de la lumière.

A $t = 0$ le point A émet une *onde sphérique*

A t_i elle est en HI dont chaque point **b** devient une source secondaire qui émet une ondelette

A t toutes les ondelettes émises par les points **b** sont tangentes à la sphère DF

" il est clair qu'il n'y aura que l'endroit C de l'onde KCL qui touchera l'onde DCF, à savoir celui qui est dans la droite menée par AB."



Ainsi l'onde émise par A, à $t = 0$, se trouve répartie, à t , sur la sphère DCEF. Tout se passe comme si l'onde DCEF n'était émise que par A.

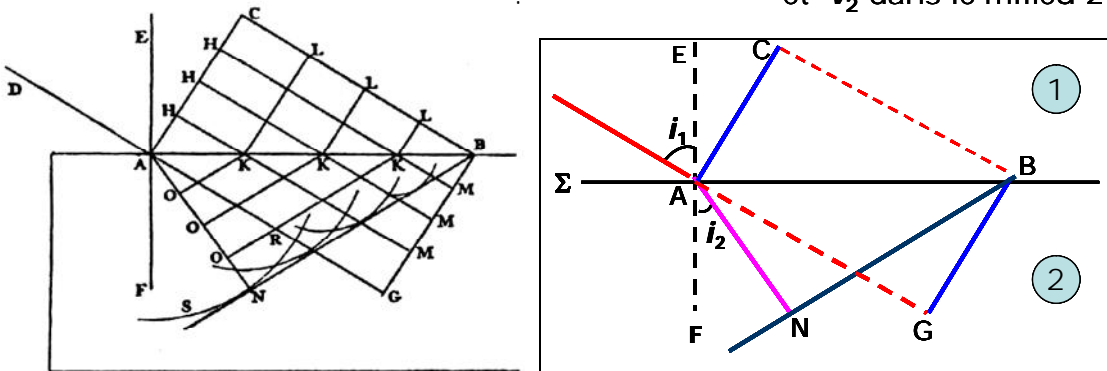
Pour expliquer les lois de la réflexion et de la réfraction, il raisonne sur des surfaces d'ondes qui, dans le cas de faisceaux de lumière parallèles sont des

plans. Ce raisonnement lui permet de démontrer que *la vitesse de la lumière dans un milieu plus dense que l'air est inférieure à celle que l'on obtiendrait dans l'air*. La figure VII. 15 fait apparaître les plans AC & BG de l'onde incidente et BN de l'onde réfractée.

Huygens justifie, à l'aide de sa théorie, le principe de Fermat et montre que La durée du trajet ABC, qui vérifie la loi des sinus, est plus la courte.

Cette théorie ondulatoire lui permet d'expliquer certains phénomènes étranges analogues aux mirages. La variation de la densité de l'air en fonction de la température et de l'altitude, entraîne une déformation de la surface d'onde et par conséquent une courbure des rayons lumineux.

Loi de la réfraction



La vitesse de l'onde est v_1 dans le milieu 1
et v_2 dans le milieu 2

Figure VII. 15

On considère les triangles rectangles ABG & ABN

$$\begin{aligned}
 i_1 &= \widehat{ABG} \quad \text{côtés } \perp \rightarrow AG / AB = \sin i_1 \\
 i_2 &= \widehat{ABN} \quad \text{côtés } \perp \rightarrow AN / AB = \sin i_2
 \end{aligned}
 \left. \begin{array}{l} AG = v_1 t \quad \& \quad AN = v_2 t \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$i_1 > i_2$

\Rightarrow

$v_1 > v_2$

Il explique, à l'aide de sa théorie le phénomène de biréfringence :

“ Comme il y avait deux réfractions différentes, je conçus qu'il y avait aussi deux différentes émanations d'ondes de lumière”.

A la réfraction “régulière” qui correspond à un indice constant, il associe des ondes sphériques et à la réfraction “irrégulière”, il fait correspondre des ellipses car l'indice, donc la vitesse de l'onde, varie avec l'incidence.

Huygens remarque que la biréfringence est une propriété de tous les cristaux, le quartz, le mica etc..Il aborde ainsi la structure cristalline de ces matériaux.

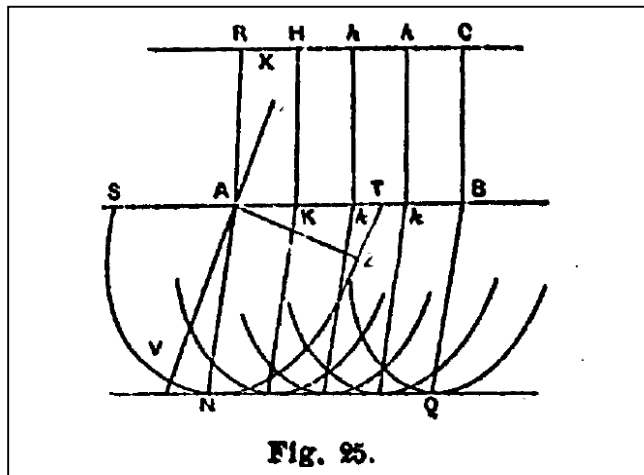


Figure VII. 16

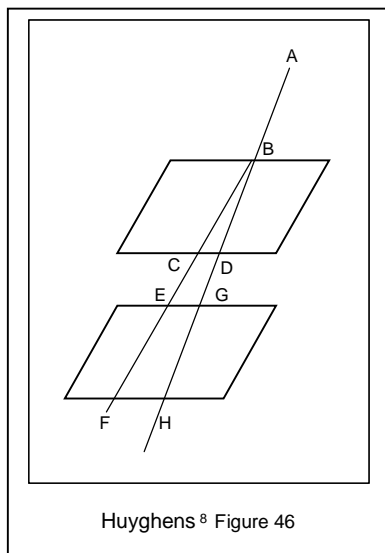
Un rayon incident RA perpendiculaire à l'interface AB, donne deux rayons réfractés le rayon ordinaire, qui n'est pas représenté, n'est pas dévié, le rayon extra ordinaire AN subit une déviation. La surface d'onde qui lui correspond est une ellipse tangente en N à la surface d'onde.

AV est le demi axe de cette ellipse.

Puis il étudie la propagation de la lumière à travers deux cristaux de spath.

Devant que de finir le traité de ce cristal, j'ajouterai encore un phénomène merveilleux, que j'ai découvert après avoir écrit tout ce que dessus. Car bien que je n'en aie pas pu trouver jusqu'ici la cause, je ne peux pas laisser pour cela de l'indiquer, afin de donner occasion à d'autres de la chercher.

Deux cristaux étant disposés l'un à la suite de l'autre, Un rayon qui pénètre dans le premier cristal devrait donner à la sortie du deuxième quatre rayons émergents : Il n'en est pas toujours ainsi.



1^{ier} cas : les sections principales des deux cristaux sont dans un même plan : il obtient deux rayons émergents au lieu de quatre.

2^{ieme} cas : les sections principales des deux cristaux sont perpendiculaires : là encore, il obtient deux rayons émergents.

3^{ieme} cas : les sections principales des deux cristaux forment un angle quelconque : il obtient quatre rayons émergents.

Mais pour dire comment cela se fait, je n'ai rien trouvé jusqu'ici qui me satisfasse.

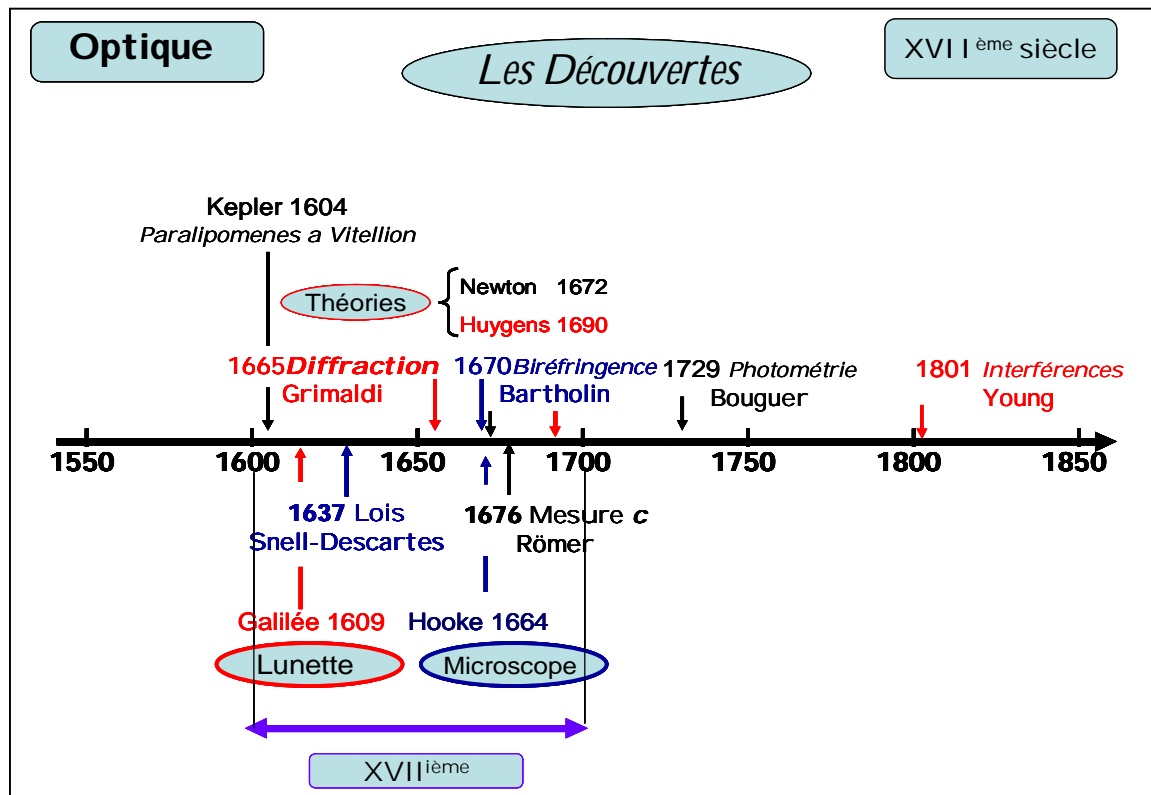
Figure VII. 17

3. 4. L'optique à la fin du XVIII^{ème} siècle .

A la fin du dix septième siècle, les lois de l'optique géométrique étaient bien établies, les phénomènes de diffraction, de dispersion, de biréfringence étaient connus, mais les lois qui les régissent ne seront énoncées qu'au dix neuvième siècle. Car si l'outil expérimental permettait des mesures suffisamment précises pour faire de grandes découvertes, l'outil mathématique était rudimentaire. Les démonstrations étaient basées essentiellement sur la géométrie euclidienne qui ne permettait pas aux savants d'aller plus loin. Le calcul intégral et différentiel, qui venait d'être inventé par Newton et Leibnitz, n'était pas assez performant pour résoudre les problèmes d'interférences et de diffraction.

Le dix huitième siècle a vu très peu de découvertes en optique, Bouguer découvre la photométrie et Bradley l'aberration de la lumière. Par contre les mathématiques, notamment le calcul intégral et différentiel sera développé par les mathématiciens du dix huitième siècle et servira aux physiciens du dix neuvième.

Deux théories de la lumière étaient avancées, celle de Newton et celle d'Huygens, la première fut privilégiée, durant deux siècles, en raison de la notoriété de son auteur, jusqu'à ce que l'expérience de Foucault vienne, en 1850, trancher en faveur de la théorie ondulatoire : La vitesse de la lumière est plus faible dans l'eau que dans l'air.



4. L'OPTIQUE AU XIX^{ème} SIÈCLE.

4.1. Interférences, diffraction & polarisation.

Thomas Yong et le phénomène d'interférences.

La découverte, dès le début du XIX^{ème} siècle (1802), des phénomènes d'interférences de la lumière par le physicien anglais Thomas Young allait remettre à jour la controverse sur la nature de la lumière et apporter de nouveaux arguments aux partisans de la théorie ondulatoire. Adeptes de la théorie d'Huygens, Young veut mettre en évidence un phénomène d'interférence de la lumière analogue à celui que l'on obtient avec des ondes sonores et qui permet d'obtenir, en certains endroits, un maximum d'intensité du son, et en d'autres un minimum ou l'extinction complète du son.

A cet effet, il procède de la même façon que Grimaldi (§ 3.1) lorsqu'il découvrit, deux siècles plus tôt, la diffraction. La source est une fente qui reçoit la lumière solaire¹⁶, celle-ci passe ensuite à travers deux fentes fines parallèles, puis elle est recueillie sur l'écran. Young obtient des franges d'interférences irisées. Néanmoins ce résultat n'a pas réussi à convaincre ceux qui restaient fidèles au modèle corpusculaire de Newton. Il subit de violentes attaques qui l'amènèrent à se consacrer à son métier de médecin et à sa passion l'égyptologie.



Thomas YOUNG 1773-1829



Augustin FRESNEL 1788-1827

Young, en tant que médecin, s'est intéressé à la vision des couleurs et a découvert que seulement trois couleurs du spectre de la lumière (le rouge, le vert, le bleu : les couleurs primaires) suffisent pour reconstituer la lumière blanche

Etienne Malus¹⁷ découvre par hasard¹⁸ en 1808 la *polarisation*¹⁹ de la lumière par réflexion et publie ses résultats en 1809 puis sa *Théorie de la double*

¹⁶ A l'époque on ne disposait pas encore de source de lumière monochromatique.

¹⁷ Etienne Malus (1775-1812)

¹⁸ Malus en examinant, des fenêtres de sa maison à l'aide d'un cristal biréfringent, les rayons du soleil réfléchis par les vitres du palais du Luxembourg, retrouve le phénomène découvert par Huygens avec deux cristaux.

réfraction de la lumière dans les substances cristallisées en 1810. Il donne la loi qui portera son nom

$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

I_0 est l'intensité d'une lumière polarisée rectilignement qui entre dans le cristal et I celle du faisceau émergent, α est l'angle formé par les plans de polarisation des faisceaux incident et émergent. Malus essaye d'expliquer tous les résultats qu'il a obtenus à l'aide de la théorie corpusculaire à laquelle il avait adhéré²⁰. A l'image des *molécules magnétiques* qui constituent les milieux magnétiques, Malus suppose que la lumière est composée de *molécules lumineuses* et, par analogie avec le magnétisme il introduit le concept de polarisation. Ces *molécules lumineuses* sont susceptibles de s'orienter après réflexion sur une surface vitreuse ou après réfraction à travers un cristal (spath ou cristal) de la même façon que des molécules magnétiques à près aimantation. Le faisceau lumineux est alors polarisé.

En 1815 le physicien écossais David Brewster²¹ reprend les expériences sur la polarisation, à partir de la lumière naturelle, et trouve l'angle d'incidence i_B qui, donne un faisceau réfléchi polarisé. Cet angle i_B , appelé angle d'incidence brewstérienne, est tel que :

$$\tan i_B = n$$

Où n est l'indice de réfraction du verre du miroir.

Jean Baptiste Biot²² explique la polarisation chromatique et la polarisation rotatoire découvertes en 1811 par Arago, à l'aide de l'hypothèse de Malus. L'étude de la polarisation rotatoire lui permet de mettre au point un dispositif expérimental, le polarimètre, pour déterminer le taux de sucre présent dans une solution.

Augustin Fresnel²³ s'intéresse, dès 1814, aux travaux de Young et monte un dispositif interférométrique à l'aide de deux miroirs²⁴ qui lui permet de s'affranchir du phénomène de diffraction qui apparaît dans l'expérience des fentes de Young. L'étude des interférences l'amène, comme Young, à opter pour la théorie ondulatoire d'Huygens.

Dans une première étape il considère une onde longitudinale pour étudier la diffraction de la lumière : L'onde se propage à travers l'éther sous forme de sphères centrées sur la source de lumière, et lorsqu'elle rencontre un obstacle, chaque point de l'éther devient, en vibrant, une source secondaire qui, à son tour, émet de la lumière. L'addition de toutes ces ondes secondaires donne sur l'écran une figure de diffraction. Le calcul mathématique, basé sur cette méthode, justifie la figure de diffraction qui correspond à chaque

¹⁹ C'est Malus qui a introduit ce terme pour la première fois

²⁰ Dans la *Théorie de la double réfraction de la lumière dans les substances cristallisées*, Malus écrit : "L'hypothèse d'Huygens est sujette à de grandes difficultés, elle semble même incompatible avec les phénomènes chimiques que produit la lumière. J'adopte donc l'opinion de Newton, non comme un moyen incontestable mais comme un moyen de fixer les idées et d'interpréter les opérations de l'analyse.

²¹ David Brewster (1781-1868)

²² Jean Baptiste Biot (1774-1862)

²³ Augustin Fresnel (1788-1827)

²⁴ Les miroirs de Fresnel

obstacle et inversement l'expérience vérifie tous les calculs. Arago rapporte que Poisson, chargé par l'Académie d'examiner le mémoire de Fresnel, a

“ déduit des intégrales rapportés par l'auteur le résultat singulier que le centre de l'ombre d'un écran circulaire opaque devait lorsque les rayons y pénétraient sous des incidences peu obliques, être aussi éclairé que si l'écran n'existait pas”.²⁵

Fresnel procède à l'expérience et confirme ce résultat théorique.

L'impossibilité de faire interférer un faisceau lumineux ordinaire et un faisceau extraordinaire issus d'un cristal biréfringent amène Fresnel à représenter, à partir de 1816, la lumière par une onde transversale.

Or une onde transversale ne se propage pas à l'intérieur d'un fluide. Par conséquent l'éther, pour permettre la propagation d'une onde transversale doit se comporter comme un solide très rigide. Alors comment expliquer qu'un tel milieu n'exerce aucune force de freinage sur le mouvement des planètes ?

Pour Georges Stokes (1819-1909) l'éther devrait être suffisamment plastique pour permettre aux corps solides de se mouvoir et assez rigide pour transmettre des ondes transversales²⁶.

En partant de cette hypothèse d'un éther qui se comporte comme un solide élastique, Fresnel a élaboré une théorie mécanique des ondes lumineuses dont les résultats confirment les expériences d'interférence de diffraction et de polarisation de la lumière. Malgré ces résultats beaucoup de savants, dont Laplace et Biot, restaient fidèles à la théorie corpusculaire de Newton.

Or en 1850, Léon Foucault²⁷, à l'aide d'un dispositif utilisant un miroir tournant, trouve que :

la vitesse de la lumière est plus faible dans l'eau que dans l'air.

C'est l'expérience cruciale qu'attendaient, depuis Newton et Huygens, tous les physiciens pour opter définitivement entre l'une ou l'autre des deux théories. La nature ondulatoire de la lumière, confirmée par cette expérience, devient alors une certitude. Mais, selon Pierre Duhem, le rôle d'une expérience est de valider ou de rejeter une théorie physique et non pas de trancher sur la nature d'un phénomène physique²⁸ (voir chapitre II § 4.1)

Au milieu du dix neuvième siècle une théorie ondulatoire complète de la lumière était disponible et enseignée dans les universités bien au delà de la fin de ce siècle²⁹. La contribution de Fresnel³⁰ à cette théorie a été capitale ;

²⁵ Cité dans Rosmorduc page 227

²⁶ Scott Walter définit, dans le dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences [1], l'éther comme : “ Une substance subtile distincte de la matière, servant à fournir ou à transmettre des effets entre des corps. L'air, par exemple, transmet des ondes sonores mais n'est pas un éther, parce qu'il n'est pas subtil. Les particules de lumière, quant à elles sont subtiles mais ne constituent pas un milieu de transmission” .

²⁷ Léon Foucault

²⁸ Au XX^{ème} siècle, la mécanique quantique va introduire la dualité “onde-particule

²⁹ Voir Bruhat Optique.

la lumière y est représentée par une vibration mécanique transversale (vecteur de Fresnel) qui se propage dans les milieux transparents et dans le vide rempli d'éther. Mais comme nous venons de le voir ce concept d'éther reste confus.

4.2 Théorie électromagnétique de la lumière.

Dans la deuxième moitié de ce siècle une autre interprétation de la nature de la lumière va être avancée suite aux progrès effectués dans l'étude de l'électromagnétisme. En 1865 le savant écossais J.C. Maxwell résume toutes les lois de cette discipline en quatre équations qui portent son nom et, en combinant ces dernières, il met en évidence des équations de propagation des champs électriques et magnétiques. En outre ces ondes électromagnétiques se propagent dans le vide à la même vitesse c que la lumière. Maxwell a réussi à unifier l'optique et l'électromagnétisme, ce qui amène Einstein à écrire :

L'incorporation de l'optique dans la théorie de l'électromagnétisme représente un des plus grands triomphes dans l'effort d'unification des fondements de la physique. Maxwell a réussi cette unification..

La théorie électromagnétique de la lumière, où la vibration lumineuse est représentée par le champ électrique, vérifie toutes les lois de l'optique précédemment énoncées.

Mais ces équations de Maxwell ne restent pas, toutes les quatre, invariantes lors d'une transformation de Galilée. Pour résoudre ce paradoxe, on est amené encore une fois à faire appel à l'éther. Les équations de l'électromagnétisme ne sont valables que dans un repère fixe lié à l'éther. Ainsi, on attribue à l'éther deux rôles essentiels : c'est un support pour les ondes électromagnétiques et il sert de repère absolu, il constitue un milieu de référence.

Pour mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, Michelson et Morley ont entrepris une série d'expériences à partir de 1887 qui se sont toutes traduites par un échec.

Ils en arrivent à la conclusion que s'il existe un mouvement de la Terre par rapport à l'éther, il doit être tellement faible que toutes les théories basées sur ce concept ne sont plus justifiées.

Cette expérience, répétée, plusieurs fois³¹ par d'autres physiciens, a toujours donné un résultat négatif.

Pour expliquer le résultat de l'expérience de Michelson et Morley, Fitzgerald et Lorentz ont émis l'hypothèse d'une contraction de la longueur du bras de

³⁰ Voici le jugement porté par Charles Fabry (1867-1947) sur l'œuvre de Fresnel à l'occasion du centenaire de sa mort: " Un siècle s'est écoulé depuis la mort de Fresnel...Les lois qu'il a découvertes, les grandes notions introduites par lui sont restées à la base de la science ; mais les idées ont continué à évoluer. Nous ne croyons plus à l'existence réelle d'un éther élastique, construit à l'image des milieux matériels se laissant traverser sans résistance tout en ayant des propriétés analogues à celles de l'acier... Fresnel, d'ailleurs, avait sagement laissé dans l'ombre les propriétés de ce milieu, mais ses successeurs, moins prudents, essayèrent de préciser ces propriétés et n'y réussirent pas. Et cependant, les notions fondamentales introduites par Fresnel sont restées et ont permis d'aller plus loin". R. Massain : *Physique et Physiciens*, Ed. Magnard (1966)

³¹ La dernière en date est celle de Stephan Schiller à l'Institut de physique expérimentale de Düsseldorf en 2003

l'interféromètre qui est parallèle à la direction du mouvement de la Terre. Bien qu'elle fût un échec, cette expérience est l'une des plus importantes de l'histoire de la physique, car elle est à l'origine de la théorie de la relativité.

4.3. La Spectroscopie.

Le spectre de la lumière blanche a été observé pour la première fois, à l'aide d'un prisme, par Isaac Newton au 17^{ième} siècle³². Mais ce n'est qu'au début du dix neuvième siècle que des études approfondies et de plus en plus fines allaient donner des résultats spectaculaires.

En 1800 William Herschel³³, découvre l'existence du rayonnement infra-rouge³⁴ en plaçant un thermomètre noirci dans un spectre obtenu à partir de la lumière solaire. De son côté l'allemand R.W.Ritter (1776-1810) met en évidence le rayonnement ultra-violet qui agit sur le chlorure d'argent. L'action de la lumière sur des sels d'argent sera, une quarantaine d'années plus tard, à l'origine de la découverte de la photographie par Louis Daguerre³⁵.

En 1814 Joseph Fraunhofer³⁶ entame une étude précise du spectre du Soleil au moyen de prismes en flint et de réseaux plans³⁷ qu'il met au point grâce à la formation dans le travail du verre qu'il avait reçue dans son jeunesse. Il décrit et *dessine*³⁸ avec précision les spectres solaires qu'il obtient.

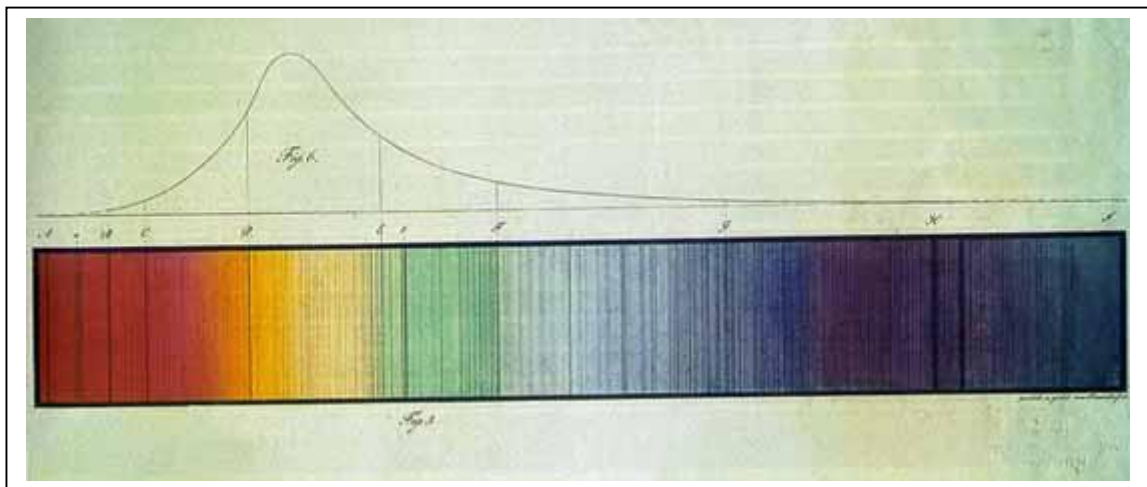


Figure VII.19 : Spectre de Fraunhofer avec 476 raies noires

³² Voir § 3.2.

³³ William Herschel (1738-1822),

³⁴ Les rayonnements infra rouge et ultra violet sont appelés, lors de leur découverte, *chaleur rayonnante* et *rayons chimiques*

³⁵ Louis Daguerre (??) découvre la photographie en (1839)

³⁶ Joseph Fraunhofer (1787-1826)

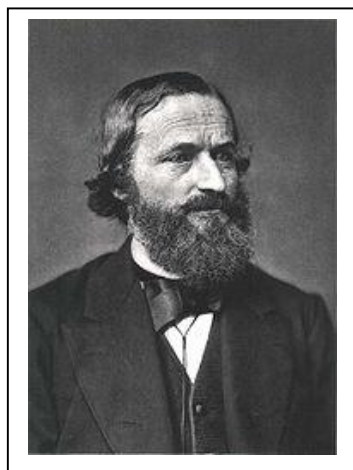
³⁷ Fraunhofer trouve la formule de dispersion du réseau de diffraction qui lui permet de déterminer avec une grande précision les longueurs d'onde des raies.

³⁸ Ce n'est qu'en 1842 qu'Edmond Becquerel (1820-1891) a pu photographier le spectre solaire en utilisant la découverte de Daguerre.

Ces derniers font apparaître des raies noires, dont certaines avaient déjà été observées en 1802 par Wollaston³⁹. Il étudie également les spectres des flammes données par des chandelles et constate qu'une raie double (celle du sodium) correspond exactement à deux raies noires du spectre solaire. L'explication de ces raies noires ne sera donnée que vers le milieu du siècle.

Les recherches sur les spectres de flammes sont poursuivies et amènent en 1826 les physiciens anglais Talbot⁴⁰ et Herschel⁴¹ et à proposer l'utilisation la spectroscopie pour l'analyse chimique des substances.

Dans la deuxième moitié du siècle deux professeurs de l'université de Heidelberg, Kirchhoff⁴² et Bunsen⁴³, fondent l'analyse chimique basée sur l'observation des spectres, grâce à des dispositifs qu'ils ont mis au point (figure) qui comportent un brûleur à gaz conçu par Bunsen : le bec de Bunsen⁴⁴



Gustav Kirchhoff
(1800-1877)

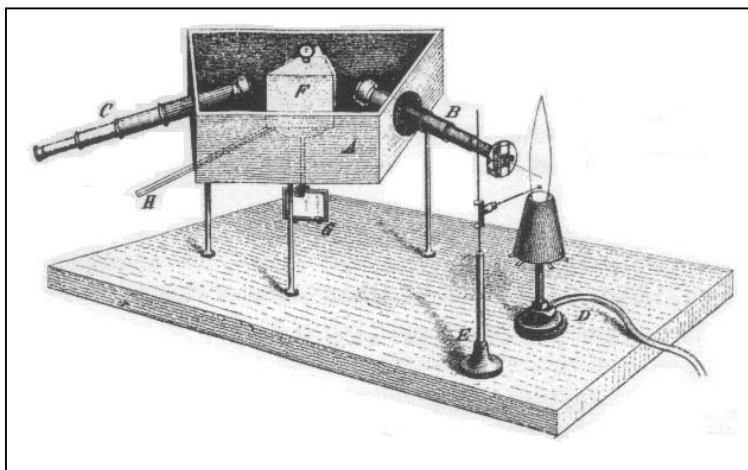


Figure VII.20 Spectroscope de Kirchhoff-Bunsen
Annalen der Physik und der Chemie Vol. 110 (1860) Wikipedia

Ils publient leurs travaux dans deux mémoires publiés dans les annales de Poggendorf et traduits en français⁴⁵. Dans le premier ils exposent leur objectif et leur méthode

³⁹ William Hyde Wollaston (1766 - 1823) découvre en 1809 Le goniomètre

⁴⁰ Talbot (1800-1877)

⁴¹ Herschel John (1792-1871)

⁴² Kirchhoff

⁴³ Bunsen

⁴⁴ Le bec de Bunsen présente l'avantage de donner une flamme peu éclairante dans laquelle on introduit une quantité infime de la matière à analyser ; l'influence du gaz de combustion est pratiquement éliminée. C'est ainsi qu'en 1857 W. Swan observe le doublet du sodium en utilisant une masse inférieure à 2.10^{-11} kg.

⁴⁵ G. Kirchhoff, R. Bunsen, "Analyse chimique fondée sur les observations du spectre", Annales de Chimie et de Physique, 3, LXII (1861) : 452-486 et 3, LXIV (1862) : 257-311.

« On peut fonder sur l'existence de ces raies une méthode d'analyse qualitative qui élargit considérablement le domaine des investigations chimiques et permet de résoudre des problèmes jusqu'ici inabordables.. »

Dans le second ils mentionnent la découverte de nouveaux éléments chimiques : le césium et le rubidium.

En 1859, Kirchhoff donne une explication des raies noires du spectre de Fraunhofer. Deux hypothèses étaient avancées, jusqu'à ce moment : ces raies résultent soit d'un phénomène d'interférence soit d'une absorption de la lumière. Kirchhoff formule une loi (loi du rayonnement de Kirchhoff) qui relie les phénomènes d'émission et d'absorption. Les raies noires de Fraunhofer sont dues à l'absorption, par l'atmosphère solaire, des radiations de mêmes longueurs d'onde. Ce résultat a permis d'élaborer une méthode d'analyse de la photosphère⁴⁶ du soleil, méthode qui a entraîné le développement de l'astrophysique.

En 1868 lors d'une éclipse du soleil, les astronomes ont remarqué, dans le spectre solaire, la présence d'un élément chimique inconnu, dont la raie avait pour longueur d'onde $\lambda = 5876\text{\AA}$. Il fut nommé "hélium"⁴⁷. Sa présence ne fut décelée sur Terre qu'en 1895.

D'un autre côté Wheatstone observe en 1834 les spectres des métaux obtenus à partir d'un arc électrique ou d'une étincelle. Chaque métal est caractérisé par le spectre donné par son étincelle. Ainsi le spectre qu'il a obtenu de l'étincelle du mercure comporte sept raies : un doublet de raies orangées, une verte, un doublet vert bleuâtre, une pourpre et une violette.

Angström utilise une ampoule, munie d'électrodes, contenant un gaz raréfié.

A la fin du dix-neuvième siècle, les scientifiques ont essayé de trouver une relation entre les différentes longueurs d'onde des raies du spectre d'un même élément. C'est ainsi qu'en 1885 Balmer propose une formule qui vérifie avec précision les mesures des longueurs d'onde des 14 raies du spectre de l'hydrogène.

D'autres physiciens, dont Rydberg, étudient les spectres des éléments des trois premières colonnes du tableau de Mendeleïev. Ces spectres sont constitués de trois séries ; les formules proposées font apparaître, pour chaque série, un paramètre différent.

En 1897, Zeeman publie un article⁴⁸ sur l'action d'un champ magnétique sur les raies spectrales. Cette action se traduit par un élargissement des raies. Puis, dans un autre article⁴⁹, il signale que cet élargissement se traduit par le dédoublement ou le triplement des raies du cadmium selon que la direction du champ est parallèle ou perpendiculaire aux rayons lumineux.

Ces travaux, en spectroscopie, notamment ceux de Balmer, Rydberg et Zeemann vont contribuer au développement de la mécanique quantique.

⁴⁶ La photosphère est la couche de gaz qui constitue la surface visible d'une étoile.

⁴⁷ Le Soleil se dit en grec hélios

⁴⁸ P. Zeeman *Nature*, 55, 1897, page 347 (dans Radvanyl page 150)

⁴⁹ P. Zeeman *Phil. Mag.* S. 5, 44, 1897, page 55 (dans Radvanyl page 153)

Principaux ouvrages consultés :

DESCARTES René : *La dioptrique* Ed. Girard Paris 1668 (BnF Gallica)
HUYGENS Christian : *Traité de la lumière* 1691 Ed. Gauthier-Villars Paris 1920
NEWTON Isaac : *Opticks* Ed. Sam Smith London 1704 (BnF Gallica)
LOCQUENEUX Robert. : *Histoire de la Physique* Ed. P.U.F 1987
MAITTE Bernard : *La lumière* Ed. du Seuil Paris 1981
RONCHI Vasco : *Histoire de la lumière* Ed. Jacques Gabay Paris 1996
ROSMORDUC Jean : *Histoire de la Physique* Tome 1 & 2 Ed. Lavoisier Paris 1987