

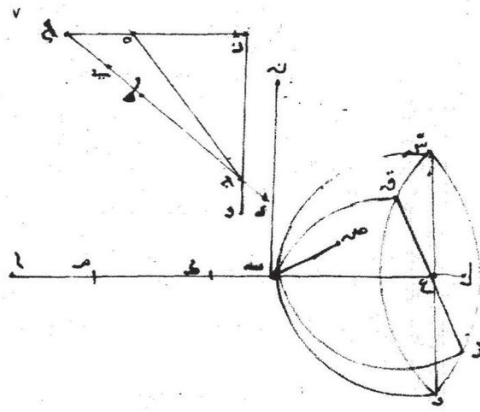
## UNE BRÈVE HISTOIRE DE L'OPTIQUE

### 1 Les premières conceptions de la vision et de la lumière

Durant l'antiquité, trois conceptions différentes de la vision et de la lumière apparaissent et s'opposent.

- Les atomistes tels Leucippe (-500/-420) et Démocrite (-460/-370) pensaient que la vision était due à l'arrivée dans l'œil d'une réplique éthérée de l'objet observé. Ainsi, de chaque objet sont projetées en permanence une myriade d'émanations appelées simulacres qui ont la forme de l'objet et qui, en s'approchant de l'œil, diminuent jusqu'à le pénétrer et transmettre la forme de l'objet. Dans cette conception, la lumière n'existe pas vraiment : il s'agit en fait de simulacres qui se déplacent et qui causent la vision.
- Pour les Pythagoriciens, c'est l'œil qui émet des rayons en direction des objets observés. Ces rayons proviennent du feu intérieur de chaque être vivant. Euclide (-330/-270) publie un ouvrage sur le sujet : l'*Optique*. La théorie d'Euclide est essentiellement géométrique : elle décrit les ombres, la réflexion de la lumière sur un miroir plan ou sphérique, la réfraction. On y trouve également l'égalité de l'angle de réflexion à l'angle d'incidence :  $i = i'$ , mais la réfraction est incorrectement décrite.
- Enfin, Aristote (-384/-322) s'oppose à l'idée que l'œil émette la lumière. Il pense que la vision est causée par une propagation de l'objet vers l'œil à travers un milieu. Aristote estime donc que l'œil ne pourrait voir dans le vide (il n'admet pas l'existence du vide de toute façon). Aristote donne à la lumière une existence indépendante, mais cette conception plus moderne de la lumière ne sera pas suivie dans l'Antiquité, malgré la grande influence d'Aristote dans tous les autres domaines.

Il faudra attendre Alhazen (Ibn Al-Haytham) (965/1039) qui est le plus célèbre physicien arabe du Moyen-Âge pour que l'optique prenne vraiment naissance. Selon lui, la lumière a une réalité indépendante de l'objet émetteur et de l'œil récepteur. La lumière est d'abord émise par des sources lumineuses, puis elle se propage en ligne droite, et est enfin captée par l'œil. Il considère également l'émission secondaire de lumière, par une autre source tel qu'un grain de poussière. Il formule les lois de la réflexion et les explique avec le rebondissement d'une particule sur un mur. Enfin, il interprète la réfraction comme un changement de vitesse de la lumière à l'interface entre deux milieux. Après observation, il conclut que l'angle de réfraction est proportionnel à l'angle d'incidence correcte dans la limite des petits angles.



لانه ان ماتة عليها سطح مستوي غيره فلان هذا السطح يقطع سطح بصر  
 على نقطة تب فلا بد من ان يقطع احد خطي ب ن نص فليكن ذلك  
 الخط بصير والعصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع و ر  
 خط ب ش فلان هذا السطح يماس سطح ب على نقطة تب فخط  
 ب ت يمس سطح قطع و ب ر على نقطة تب وكذلك خط بصير وهذا حال  
 فلا يماس سطح ب على نقطة تب سطح مستوي غير سطح ب ن نص ٥

FIGURE 1 – Extrait du traité d’optique d’Alhazen (Ibn Al-Haytham)

En Occident, au Moyen-Âge, les travaux remarquables d’Alhazen seront diffusés. L’usage des verres correcteurs, formes de lentilles convexes, pour corriger la presbytie se développent. Le moine polonais Witelo (1220/1275) publie des tables d’angles de réfraction en fonction de l’angle d’incidence dans différents milieux. C’est enfin grâce à Dietrich de Freiberg (1250/1311), que l’arc-en-ciel est interprété correctement :

- Il comprend que l’arc-en-ciel résulte de la réfraction et la réflexion de la lumière solaire par des fines gouttelettes d’eau et étudie par conséquent la réflexion et la réfraction dans une fiole de verre remplie d’eau pour modéliser la gouttelette.
- Il démontre que la déviation est due à la combinaison de deux réfractions et d’une réflexion sur la face interne de la goutte.
- Il observe que la couleur de la lumière observée à travers la fiole change en fonction de l’angle que fait la fiole avec la source lumineuse (le Soleil). Le rayon rouge sortant de la goutte fait un angle de  $42^\circ$  avec le rayon entrant. Le rayon bleu est plus réfracté, mais l’écart angulaire entre les rayons bleus entrant et sortant est moindre, de sorte que le bleu apparaît vers le centre de l’arc et le rouge vers l’extérieur. Il montre aussi que les différentes couleurs de l’arc-en-ciel proviennent de gouttelettes différentes, situées à des angles différents par rapport à l’observateur.
- Il conclut que l’arc secondaire est située à  $11^\circ$  au-dessus de l’arc principal et explique qu’il provient de deux réfractions et deux réflexions à l’intérieur des gouttelettes, ce qui explique que l’ordre des couleurs est inverse.
- Il interprète la lumière comme une combinaison de deux qualités : l’éclat et l’obscurité. La lumière rouge contient plus d’éclat et la lumière bleue plus d’obscurité, alors que la lumière blanche est un mélange équilibré. La lumière rouge est moins rétractée que la bleue parce qu’elle contient plus d’éclat.

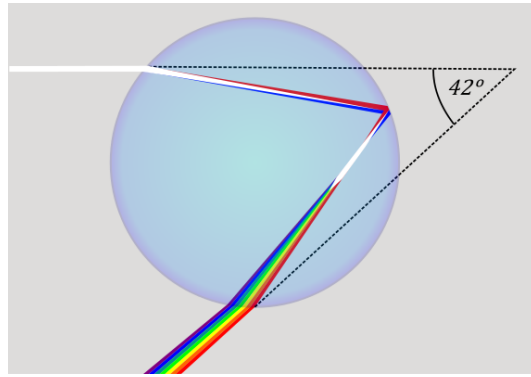


FIGURE 2 – Principe de l’arc-en-ciel

En plus de ses fameux résultats en astronomie, Kepler a également publié sur l’optique l’ouvrage *Ad Vitellionem paralipomena* (1604). Dans ce traité, il définit la notion d’image virtuelle et explique la formation des images géométriquement. Il montre que la vision résulte de la formation d’une image sur la rétine et que les lunettes peuvent la corriger. Kepler, comme Alhazen, remarque que l’angle de réfraction est proportionnel à l’angle d’incidence quand les angles sont petits. Cette loi a été établie expérimentalement par Willebrord Snell (1580/1626) mais non publiée. Le premier à véritablement l’expliquer de façon théorique est Descartes, dans sa *Dioptrique* (1637). Comme Alhazen, il considère que la lumière se propage plus vite dans les milieux plus denses et que la composante de la vitesse du rayon perpendiculaire à l’interface est modifiée, alors que l’autre composante ne l’est pas, *”car il est bien aisé à croire que l’action, ou inclination à se mouvoir, que j’ai dit devoir être prise pour la lumière, doit suivre en ceci les mêmes lois que le mouvement”*. Il démontre alors que la relation entre les angles  $i$  et  $r$  est

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{v_i}{v_r}$$

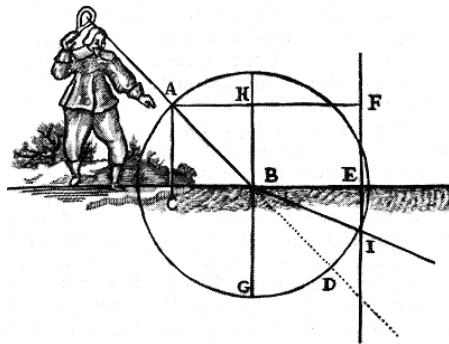


FIGURE 3 – Analogie mécanique de Descartes

Descartes conçoit la lumière comme un phénomène qui s’exerce de proche en proche jusqu’à la rétine. Il affirme également que la lumière est un phénomène instantané (vitesse de propagation infinie). Pourtant, sa démonstration de la loi de Snell par analogie avec un phénomène de collision, en utilisant un modèle de particules en mouvement, nécessite une

vitesse de propagation finie de la lumière. Sa théorie contient donc de fortes contradictions. Pierre de Fermat n'admet pas l'explication de Descartes pour la réfraction, trouvant improbable le fait que la lumière se propage plus rapidement dans un milieu plus dense. Il aboutit aussi à la loi de Snell en utilisant le principe du moindre temps : la lumière se propage entre deux points de manière à minimiser le temps de parcours entre ces deux points.

## 2 Diffraction et dispersion

Au début du XVII<sup>ème</sup> siècle, les phénomènes de réflexion et de réfraction commencent à être bien compris dans les premières théories de la lumière. Bientôt, d'autres phénomènes sont observés mais difficiles à expliquer : la diffraction et la dispersion. Le jésuite italien Francesco Maria Grimaldi (1618/1663) cherche à vérifier expérimentalement si la lumière se propage effectivement en ligne droite. Ainsi, il fait passer un faisceau lumineux par un petit trou, et obtient alors un fin pinceau de lumière, qu'il envoie contre un objet très mince par exemple un cheveu. Derrière l'objet, sur l'écran, il observe non pas une ombre nette du cheveu, mais une tâche floue limitée par une série de franges colorées. Grimaldi vient d'observer le phénomène de la diffraction de la lumière (le mot est de lui). Il montre que la figure de diffraction ne dépend pas de la nature de l'obstacle, mais uniquement de sa taille.

La dispersion de la lumière correspond à la séparation d'un faisceau de lumière blanche en plusieurs couleurs lors de sa réfraction par un prisme ou un autre objet transparent. Ceci avait déjà été observé par Dietrich de Freiberg, qui pensait que les couleurs observables étaient une propriété inhérente à la lumière, révélée par la réfraction. Selon Descartes, les différentes couleurs provenaient de la surface du milieu réfringent : les particules de lumière sont toutes identiques avant de frapper la surface, mais cette dernière les affecte différemment et produit ainsi des couleurs différentes. En 1666, Newton réfute cette idée en réalisant une expérience fondamentale à l'aide de deux prismes :

- Il disperse un rayon de lumière à l'aide d'un premier prisme, isole l'une des couleurs qui en résulte et la dirige vers un deuxième prisme. Le deuxième faisceau monochromatique ne se disperse pas.
- Il dispose le deuxième prisme de manière opposée au premier, envoie sur lui l'ensemble des rayons dispersés par le premier et réussit à mélanger les rayons de couleurs différentes en un seul faisceau de lumière blanche. La lumière blanche est donc composée d'un mélange de plusieurs couleurs.

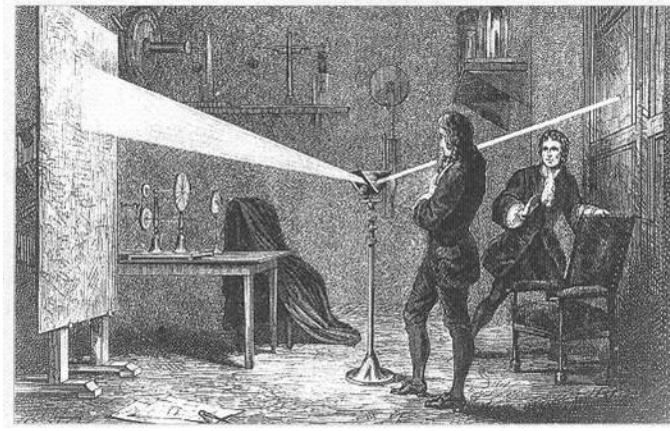


FIGURE 4 – Newton en train de réaliser l’expérience des couleurs (1666)

### 3 La théorie corpusculaire de Newton

Newton propose, très tôt, une théorie corpusculaire de la lumière. Mais, son *Opticks* (traité d’optique) ne paraît qu’en 1704, presque 40 ans après ses premiers travaux dans ce domaine. Newton donne une explication mécanique aux phénomènes lumineux. Premièrement, il affirme que la réfraction est due à une force s’exerçant sur les particules de lumière, et qui n’existe qu’à l’interface entre différents milieux. Cette conception permet d’expliquer, comme Descartes, la loi de Snell, par une augmentation ou une diminution de la composante normale de la vitesse des particules de lumière et par le maintien de l’autre composante. Il doit donc supposer que la lumière se propage plus rapidement dans les milieux plus denses. Pour expliquer la dispersion, Newton propose que la lumière est un mélange de différentes sortes de particules selon les couleurs et que la force superficielle, cause de la réfraction, est différente selon les couleurs (plus grande pour le bleu, plus faible pour le rouge).

La difficulté principale dans cette conception est la suivante : un faisceau de lumière n’est jamais complètement réfracté : il y en a toujours une partie qui est réfléchi. De plus, lorsqu’un faisceau subit plusieurs réflexions et réfractions entre deux surfaces, on remarque des franges colorées comme pour la diffraction. Ce sont les fameux anneaux de Newton, observables à travers une lentille convexe posée sur une surface réfléchissante. Le modèle développé par Newton ne peut alors pas expliquer de tels phénomènes.

### 4 La théorie ondulatoire de Huygens

Une grande partie des contributions de Huygens en Optique sont présentes dans son *Traité de la lumière*, publié en 1690, mais rédigé avant 1678. Tout d’abord, Huygens rejette la théorie corpusculaire de la lumière car il ne peut concevoir que ces corpuscules n’entrent jamais en collision avec le reste de la matière ou entre eux. Ainsi, selon lui, il est impossible de comprendre la propagation rectiligne de la lumière avec des corpuscules qui devraient être constamment déviés. Huygens utilise ensuite une analogie avec les ondes sonores et les vagues sur l’eau et propose que la lumière soit une onde qui se propage dans

un milieu (l'éther) qui remplit tout l'espace. Comme dans une onde sonore, les particules du milieu créent un mouvement collectif qui se propage en ligne droite. Huygens est ici l'héritier de Descartes qui conçoit la lumière comme une pression qui se propage mais Huygens a délivré cette conception cartésienne de ses contradictions. Huygens précise la façon dont une onde se propage de la manière suivante.

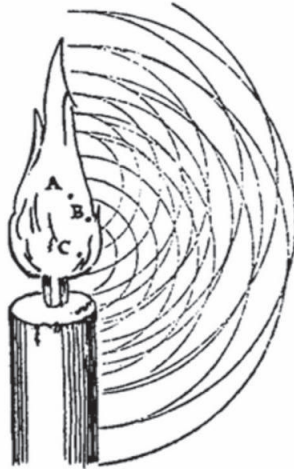


FIGURE 5 – Illustration du principe de Huygens expliquant la propagation de la lumière

Les contributions de toutes ces ondelettes s'additionnent et l'onde, un instant suivant, se situe sur l'enveloppe de toutes les ondelettes, qui forme une droite dans un milieu homogène. Cette droite est en fait le front d'onde, perpendiculaire à la direction de propagation. Ce principe permet facilement d'expliquer la loi de Snell-Descartes, si on suppose que la vitesse de la lumière est inférieure dans les milieux plus denses. En effet, les ondelettes se propagent alors moins vite dans le milieu plus dense, ce qui fait dévier l'enveloppe des ondelettes dans la direction du rayon réfracté.

Huygens parvient également à expliquer les mirages et autres effets se produisant lorsque la densité de l'air varie beaucoup en fonction de l'altitude. Dans ce cas, les fronts d'onde ne sont plus des droites mais des surfaces courbes et la lumière ne se propage plus de manière rectiligne. Tout cela se comprend facilement à l'aide de son principe de propagation. Son expression mathématique n'a cependant pas été obtenue par Huygens : c'est Kirchhoff qui la formulera au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. Malheureusement, Huygens manque le principal : il ne voit pas que les différentes couleurs correspondent à des longueurs d'ondes différentes. Il n'explique pas non plus le phénomène de diffraction, en raison du faible développement mathématique de l'époque. En dépit de l'élégance de la théorie de Huygens, c'est la théorie de Newton qui sera adoptée pendant tout le XVIII<sup>ème</sup> siècle, surtout à cause de l'immense prestige de Newton et de sa mécanique.



du caractère ondulatoire de la lumière : il fait traverser un faisceau de lumière par une petite ouverture. De l'autre côté, une onde sphérique est générée en vertu du principe de Huygens. Cette onde traverse deux fentes pratiquées dans un deuxième écran et deux ondes sphériques sont générées, qui se superposent dans cette région, de manière parfois constructive, parfois destructive avec une intensité lumineuse différente. Young interprète correctement les franges colorées observées en lumière blanche en attribuant aux différentes couleurs des longueurs d'ondes différentes. Young donne également une nouvelle explication correcte au phénomène des anneaux de Newton et aux couleurs observées sur les films minces, comme les bulles de savon.

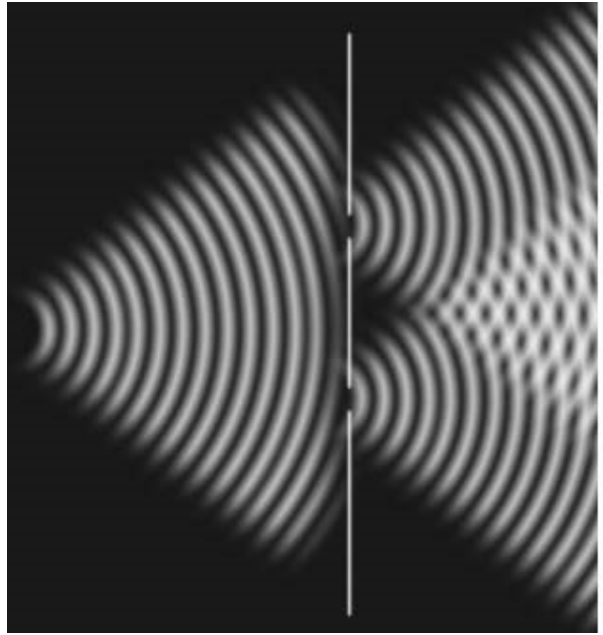


FIGURE 7 – Illustration de l'expérience des fentes d'Young

Augustin Fresnel (1788/1827) recommence les expériences de Young et redécouvre les mêmes phénomènes. Fresnel en supposant que les ondes lumineuses sont sinusoïdales, arrive à démontrer mathématiquement l'existence des franges d'interférence. Fresnel poursuit ses travaux en collaboration avec Francois Arago (1786/1853) et réussit à prévoir, à l'aide de sa théorie, les résultats des nouvelles expériences qu'ils réalisent ensemble. Ces résultats suscitent une grande controverse entre les partisans (majoritaires) de la théorie corpusculaire de Newton et ceux (moins nombreux) de la théorie ondulatoire. L'Académie des sciences procède à un nouveau concours pour étudier la propagation de la lumière à proximité des obstacles (1819) et Fresnel remporte le prix avec un mémoire magistral. Denis Poisson (1781/1840), partisan de la théorie corpusculaire, objecte que, selon la théorie de Fresnel, il devrait y avoir une tâche claire au centre de la zone d'ombre causée par un obstacle circulaire, ce qui lui paraît évidemment absurde. L'expérience est faite et la tâche claire est observée. C'est la victoire de la théorie ondulatoire de la lumière. Cependant, plusieurs, dont Poisson, continueront à enseigner la théorie corpusculaire jusqu'à leur mort... La seule difficulté de la théorie ondulatoire est le problème des polarisations et de la biréfringence. Fresnel observe que deux faisceaux originaires de la même source, dont l'un a vu sa polarisation tournée par un cristal de calcite, ne produisent pas de franges



d'interférence (comme si leurs vibrations ne se combinaient pas). Enfin, il propose que les ondes lumineuses ne sont pas des ondes de compression longitudinales, mais des ondes transversales. Les différentes polarisations correspondent alors à des oscillations transversales dans des directions différentes. L'idée originale est soumise par André-Marie Ampère (1775/1836). Cela suppose que le milieu de propagation (l'éther) est plus semblable à un solide ou à un gel qu'à un liquide. Étant donnée la vitesse considérable de la lumière (300 000 km/s), ce milieu doit être incroyablement rigide et en même temps incroyablement tenu, puisqu'il ne semble pas interférer avec les autres formes de matière. Par ailleurs, Hippolyte Fizeau (1819/1896) et Léon Foucault (1819/1868), indépendamment, évalueront la vitesse de la lumière, en 1850. Ces mesures démontrent que la célérité de la lumière dans l'eau est inférieure à la célérité dans l'air, contrairement à la théorie corpusculaire et en accord avec la théorie ondulatoire.

## 6 La lumière : une onde électromagnétique

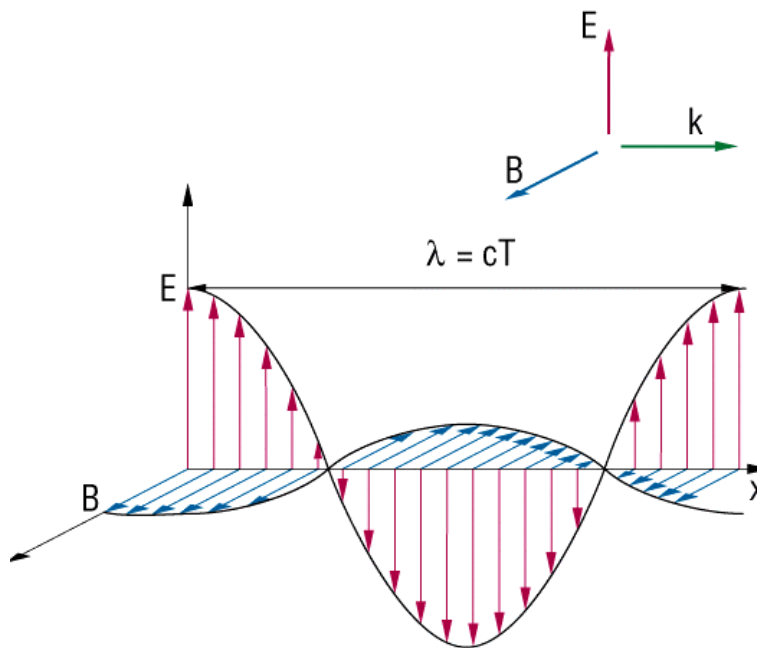


FIGURE 8 – Représentation de la lumière en tant qu'onde électromagnétique

En 1857, Weber et Kohlrausch arrivent au résultat fondamental que le produit de la constante de l'électricité  $\epsilon_0$  et de la constante du magnétisme  $\mu_0$  donne l'inverse d'une vitesse au carré... et que cette vitesse correspond à la vitesse de la lumière. James Clerk Maxwell, en s'inspirant de cette coïncidence, pose en 1873 des équations de l'électricité et du magnétisme qui permettent de décrire des ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse  $c$ . Il n'est donc pas utile de connaître la nature de l'éther : le champ électromagnétique est en fait une grandeur vectorielle, qui a une valeur en chaque point de l'espace et à chaque instant. Le champ électrique  $\vec{E}$  et le champ magnétique  $\vec{B}$  permettent d'exprimer alors la force exercée sur une particule chargée :  $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$ . La lumière correspond à une onde électromagnétique transverse, la polarisation de la lumière étant assimilable à

la direction du champ électrique oscillant.

Les équations de Maxwell représentent alors une unification considérable contenant les phénomènes de l'électricité, du magnétisme, et de la lumière. L'engouement de certains physiciens était tel que, en 1903, Michelson écrit : *"Les lois et les faits les plus fondamentaux des sciences physiques ont tous été découverts, et sont maintenant si fermement établis que la possibilité qu'il soient supplantés un jour, à la suite de nouvelles découvertes, est excessivement lointaine [...]. Nos futures découvertes doivent être recherchées du côté de la sixième décimale."*

A cette même époque, alors que les phénomènes lumineux paraissent tous pouvoir être interprétés à l'aide de concepts ondulatoires, Lord Kelvin pense cependant que *"la clarté et la beauté de la théorie [...] est à présent obscurcie par deux nuages"*. Le premier est la difficulté à mettre en évidence l'éther expérimentalement, tandis que le second est le problème de la loi du rayonnement thermique des objets. Quelques années après la déclaration de Michelson, les "nuages" de Lord Kelvin vont justement donner lieu aux deux plus importantes révolutions de la physique du XX<sup>ème</sup> siècle : la théorie de la relativité restreinte et la physique quantique. La première a conduit les physiciens à repenser l'espace-temps, et à abandonner au passage la notion d'éther. La seconde a transformé le siècle précédent par l'étendue des phénomènes qu'elle a permis de comprendre et les applications engendrées.

## 7 Vers une optique quantique

Dans le cadre de la physique quantique, il apparaît que la description ondulatoire des phénomènes lumineux ne suffit pas toujours. L'échange d'énergie entre la lumière et la matière ne peut en effet se produire que sous forme de « quanta de lumière » dont l'énergie est bien déterminée. Ainsi, un rayonnement de fréquence  $\nu$  peut être considéré comme composé de très nombreux quanta, appelés photons, ayant tous la même énergie  $E_{\text{photon}} = h\nu$ , où  $h$  est une nouvelle constante fondamentale de la physique nommée constante de Planck. Le comportement de ces quanta d'énergie électromagnétique n'a rien à voir avec celui de corpuscules classiques, puisque ces photons sont délocalisés. La lumière n'est ainsi ni un phénomène strictement ondulatoire, ni un phénomène strictement corpusculaire. Le point de vue sous lequel le physicien a intérêt à la décrire dépend de l'expérience considérée, du contexte. L'idée que la lumière est composée de quanta a été introduite pour la première fois par Einstein pour expliquer l'effet photoélectrique, dans l'un de ses trois articles révolutionnaires de l'année 1905 (les deux autres introduisaient la théorie de la relativité restreinte et l'égalité  $E = mc^2$ ). Heinrich Hertz avait caractérisé cet effet en 1887 : lorsqu'on éclaire une plaque métallique avec de la lumière ultraviolette, des électrons sont éjectés du métal avec une énergie cinétique non négligeable. Si on éclaire le métal avec un rayonnement de plus faible fréquence (par exemple une lumière bleue), l'énergie cinétique des électrons éjectés est plus faible. Si l'on baisse encore la fréquence du rayonnement incident (par exemple une lumière rouge), plus aucun électron n'est éjecté. Einstein comprend que l'éjection d'un électron provient de l'absorption d'un quantum de lumière d'énergie  $h\nu$ , comme illustré sur la figure ci-dessous. Un électron n'est éjecté, suite à l'absorption d'un quantum de lumière, que si ce dernier lui apporte une énergie  $h\nu$  plus grande que l'énergie de liaison de l'électron dans le métal. L'éventuel excédent d'énergie est transformé en énergie cinétique de l'électron éjecté.

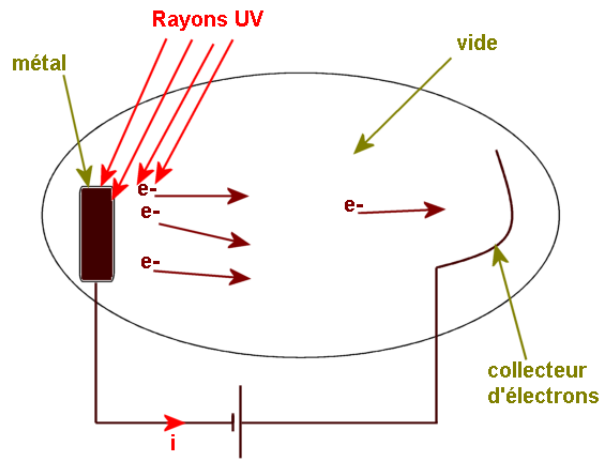


FIGURE 9 – Effet photoélectrique

Les deux aspects corpusculaires et ondulatoires peuvent parfois être mis en évidence par une même expérience : par exemple, la photographie ci-dessous montre la figure d'interférence obtenue en faisant passer de la lumière dans deux trous d'Young, photon par photon. Les photons sont détectés un par un, ce qui est caractéristique d'un comportement corpusculaire, mais la figure d'interférence finale est typique d'un comportement ondulatoire. Les photons (comme toutes les autres « particules », d'ailleurs) ne sont ni des ondes ni des corpuscules ; ils obéissent à des règles très particulières, les lois de la physique quantique. Les applications que la physique quantique a permises au 20ème siècle sont considérables, avec par exemple les dispositifs clés de la révolution de l'information : le laser, le transistor et le disque dur.

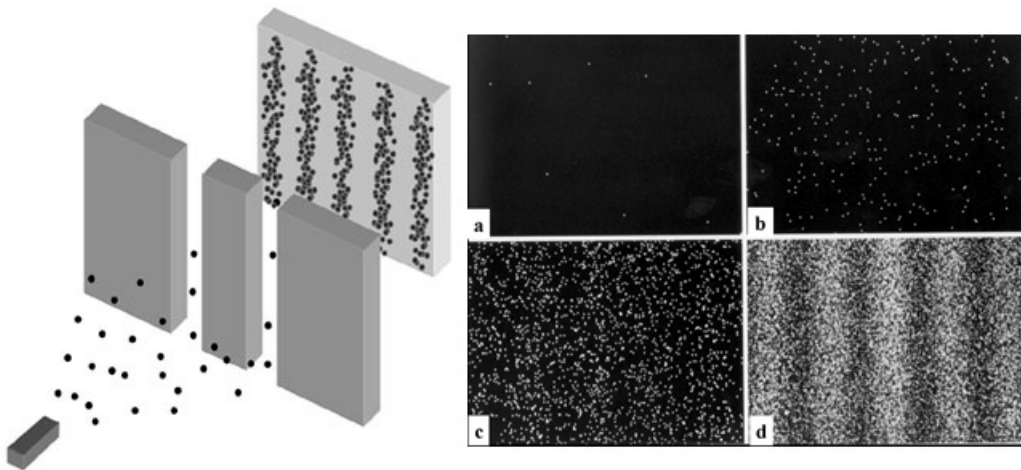


FIGURE 10 – Interférences à l'aide de fentes

## Références

- [1] Baudet. *Penser le monde. Une histoire de la physique jusqu'en 1900*. Paris : Vuibert, 2010.
- [2] Boudenot. *Histoire de la physique et des physiciens*. Paris : Ellipses, 2001.
- [3] Chappert. *Étienne Louis Malus, 1775-1812, et la théorie corpusculaire de la lumière : Traitement analytique de l'optique géométrique, polarisation de la lumière et tentative d'explication dynamique de la réflexion et de la réfraction*. Paris : Vrin, 1977.
- [4] Chappert. *Histoire de l'optique ondulatoire : De Fresnel à Maxwell*. Paris : Belin Sup, 2007.
- [5] Darrigol. *Les équations de Maxwell : De McCullagh à Lorentz*. Paris : Belin Sup, 2005.
- [6] Descartes. *Discours de la méthode suivi de La Dioptrique, Les Météores et la Géométrie*. Paris : Gallimard, 2009.
- [7] Desit-Ricard. *L'histoire de la physique en clair*. Paris : Ellipses, 2009.
- [8] Euclide. *L'Optique et la Catoptrique*. Paris, 1937.
- [9] Grant. *La physique au Moyen Âge : VIe -XVe siècles*. Paris : Presses Universitaires de France - PUF, 1995.
- [10] Huygens. *Traité de la lumière*. Paris : Gauthier-Villars, 1920.
- [11] Kepler. *Paralipomènes à Vitellion*. Paris : Vrin, 1980.
- [12] Lanco. *Physique de la lumière. Notes de cours L1*. Université Paris 7. Denis Diderot, 2010.
- [13] Locqueneux. *Histoire de la physique*. Paris : Que sais-je? - Presses universitaires de France, 1987.
- [14] Maitte. *La lumière*. Paris : Seuil, 1981.
- [15] Newton. *Traité d'optique*. Paris : Gauthier-Villars, 1955.
- [16] Perdijon. *Histoire de la physique*. Paris : Dunod, 2008.
- [17] Rosmorduc. *Une histoire de la physique et de la chimie*. Paris : Seuil, 1985.
- [18] Sénéchal. *Histoire des sciences. Notes de cours*. Université de Sherbrooke, 2001.