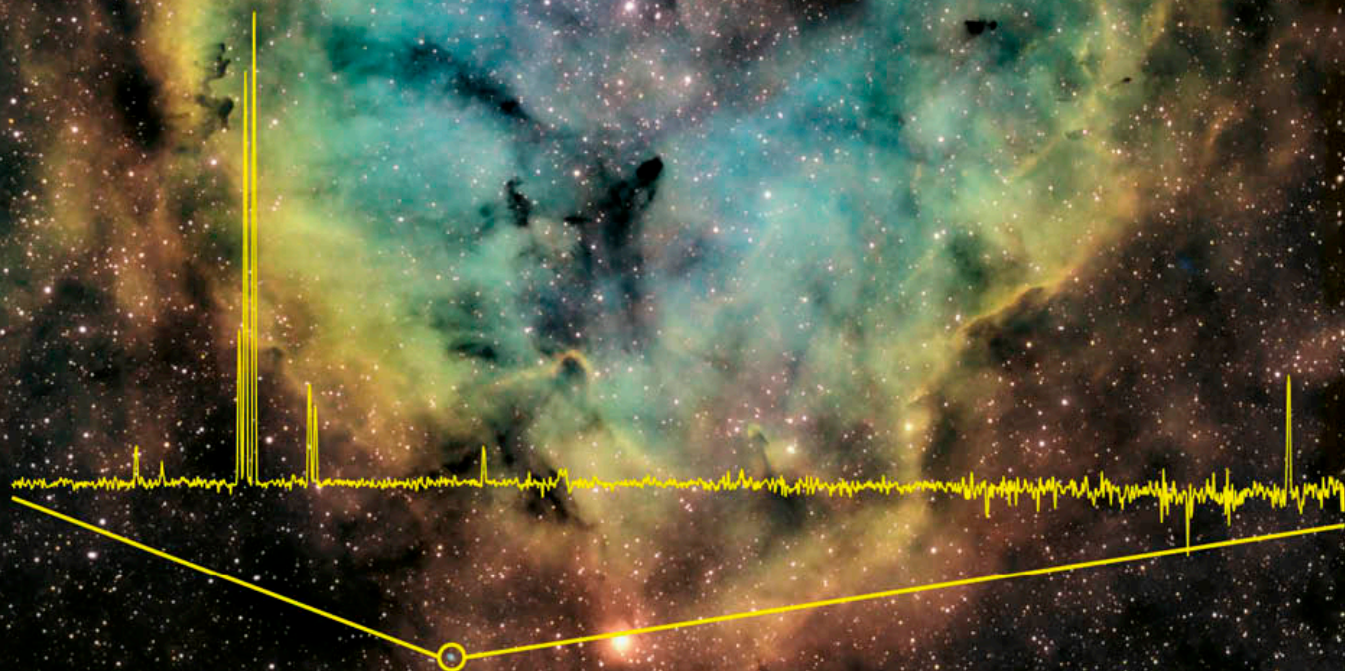


Vincent Boudon, Arnaud Cuisset, Cyril Richard, Maud Rotger

La lumière pour sonder le monde

La spectroscopie et ses applications



Prix 2023 de l'Académie
des sciences, arts
et belles-lettres de Dijon



Préface d'Anne L'Huillier
prix Nobel de Physique 2023

Chapitre 1 - De l'arc-en-ciel aux étoiles : naissance de la spectroscopie moderne

I Mythes et légendes

Bien avant que Sir Isaac Newton ne décompose la lumière blanche et associe le terme « spectre » à l'arc-en-ciel qu'il a artificiellement créé, ce phénomène naturel a été l'objet de nombreuses spéculations pour un grand nombre de peuples dans l'histoire de l'humanité. Il est intéressant de s'arrêter quelques instants sur ces mythes et légendes où l'on pourra se rendre compte que l'on peut trouver traces de concepts physiques dans la fantasmagorie des Hommes. L'arc-en-ciel est le parfait exemple des différentes interprétations que les peuples ont pu donner à un même phénomène physique à travers leurs croyances. Du point de vue scientifique et avec le recul que nous pouvons avoir aujourd'hui, certaines paraissent farfelues, mais d'autres, remontant à un temps où la pensée scientifique n'en était qu'à ses balbutiements, ne sont pas si éloignées des théories contemporaines.

Très souvent, l'arc-en-ciel est considéré comme un « *chemin vers le ciel* » prenant la forme d'un pont ou d'une immense échelle qu'empruntent les âmes pour relier la Terre au ciel et à d'autres mondes. Les civilisations amérindiennes, ou encore les peuples insulaires du Pacifique, donnent à l'arc-en-ciel ce type de représentation. D'autres peuples associent l'arc-en-ciel à un objet divin : chez les Zoulous, l'arc-en-ciel était la « *Queen Arch* », une charpente sur laquelle le ciel repose ; dans la Bible, l'arc-en-ciel symbolise le trône de Dieu ou encore, pour les peuples du grand nord, il est l'ourlet du manteau du Dieu Soleil. Sur ce dernier point, on trouve régulièrement dans les récits un lien étroit entre l'arc-en-ciel et notre Soleil. Par exemple, Patrick Drouot, dans son ouvrage intitulé *Le chaman, le physicien et le mystique*, nous révèle que chez les Shasta, peuple amérindien de Californie, le Soleil utilise les couleurs de l'arc-en-ciel pour se peindre lui-même lorsqu'il vient sur la Terre afin de la guérir de ses maladies, tel un chaman [Drouot, 1998].

Il est intéressant de remarquer que dans d'autres civilisations, l'arc-en-ciel est associé non pas au Soleil, mais à la pluie. Les Luyia du Kenya, par exemple, croient que leur Dieu doit créer deux arcs-en-ciel, le plus étroit étant le mâle et le plus large étant la femelle, pour marquer la fin de la pluie. L'arc-en-ciel mâle ne peut pas arrêter la pluie par lui-même, mais lorsqu'il est suivi par la femelle, la pluie cesse. Pour



FIGURE 1.I.1 – *Le Bifröst, chemin arc-en-ciel reliant le monde des Hommes (Midgard) à celui des dieux (Asgard) dans la mythologie nordique (licence image : Free Art License 1.3).*

certains peuples d'Asie centrale, l'arc-en-ciel a le pouvoir d'aspirer l'eau des fleuves et des lacs, emportant avec lui hommes, femmes et enfants, depuis la Terre vers les nuages. Autre exemple, les Négritos Semang, tribu de la péninsule malaise, imaginent l'arc-en-ciel comme un python brillant de toutes les couleurs et montant au ciel pour prendre un bain. Ils redoutent que l'eau du bain se renverse en pluie sur Terre. À travers leurs mythologies, on voit donc que la plupart des peuples ont compris que l'arc-en-ciel requiert deux éléments fondateurs : le Soleil et la pluie.

Il est important de noter que les différents mythes et légendes ne s'accordent pas sur le nombre et les couleurs de l'arc-en-ciel. L'Islam considère un arc-en-ciel composé des 4 couleurs rouge, jaune, vert et bleu en les associant respectivement aux 4 éléments feu, air, terre, et eau. Les trois couleurs manquantes (le violet, l'indigo et l'orange) sont des couleurs indéfinies, vagues, innommables. Chez les Dogons d'Afrique occidentale, l'arc-en-ciel a aussi 4 couleurs (le noir remplace le bleu), elles sont la trace laissée par un bélier céleste qui féconde le Soleil et urine les pluies. Les bouddhistes et les hindouistes, eux, s'accordent bien sur sept couleurs qu'ils associent

respectivement aux sept planètes¹, aux sept continents ou encore aux sept niveaux des cieux.

Enfin, pour conclure sur tous ces mythes, attardons-nous sur la célèbre légende du Bifröst, le pont arc-en-ciel emprunté par les dieux nordiques pour rejoindre le monde des Hommes. Pont rendu célèbre récemment au cinéma dans la série *Avengers* où figure le dieu/héros viking Thor (Figure 1.I.1).

Selon la légende, les dieux vikings ont construit un pont arc-en-ciel spectaculaire, doté d'une résistance incroyable pour relier le monde des Hommes à leur propre royaume, Asgard. Chaque jour, à dos de leurs magnifiques chevaux, les dieux traversent le pont pour rejoindre le monde des Hommes. Le seul dieu qui ne chevauche pas est Thor, qui patauge dans les eaux bouillantes sous le pont pour rejoindre Midgard. Dans l'Edda, récit en prose de la mythologie nordique par Snorri Sturluson [Sturluson, 1991], il est dit que « *le Bifröst brille de trois couleurs et dépasse toute autre construction des dieux ou des Hommes* ». Les trois couleurs du pont arc-en-ciel sont l'eau verte, l'air bleu et le feu rouge. La ligne rouge du pont est une bande de feu brûlant constituant l'une des principales défenses d'Asgard contre la venue des géants. Le Bifröst possède également un dieu dédié à sa défense qui se nomme Heimdall. Depuis l'extrémité du Bifröst, côté Asgard, il surveille en permanence le pont arc-en-ciel pour s'assurer que personne ne tente d'atteindre le royaume des dieux sans leur approbation. Le Ragnarök sera la seule attaque du royaume des dieux. Les géants du feu sortis de leur royaume vont envahir le monde des hommes, puis atteindre le Bifröst pour tenter de pénétrer dans Asgard. Bien qu'il soit exceptionnellement solide, le Bifröst va craquer sous le poids et la chaleur de la horde de géants et ces derniers ne parviendront jamais à atteindre le royaume des dieux.

Certains spécialistes de la mythologie nordique voient dans le passage de Thor une explication de la façon dont un arc-en-ciel apparaît dans le ciel. Thor était le dieu du tonnerre, il était donc responsable des orages. Nous savons aujourd'hui que les arcs-en-ciel apparaissent lorsque le Soleil brille après un orage, par suite de la réfraction de la lumière par les gouttelettes d'eau dans l'air. Les anciens devaient cependant imaginer une raison pour expliquer le lien entre le dieu de l'orage et les couleurs du ciel. Les spécialistes interprètent l'histoire de Thor pataugeant dans l'eau chaude comme un symbole de la chaleur et de l'humidité ressenties lorsque le Soleil

1. Dans l'Antiquité, le terme « planète », qui vient du grec *πλανήτης ἀστήρ* (planêtês astêr), autrement dit « astre errant », désigne les objets considérés comme prodigieux ou divins, qui bougent dans le ciel (et donc tournent autour de la Terre, dans la vision géocentrique). À cette époque, et jusqu'à la fin du Moyen Âge, on comptabilise donc 7 planètes : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, mais également le Soleil et la Lune.

apparaît après un orage. Lorsque cela se produit, l'arc-en-ciel semble brûler sous l'effet de la chaleur du Soleil. Enfin, on peut s'arrêter sur l'étymologie du Bifröst, la plupart des spécialistes utilisent le nom alternatif du pont, à savoir, le Bilröst. Le mot nordique Bil signifie « un moment ». Ainsi, le nom peut être traduit par « Le chemin momentané », en référence à la nature éphémère d'un arc-en-ciel. La nature éphémère est le propre d'un spectre qui apparaît, puis disparaît. Dans leurs croyances, les Vikings avaient tous les ingrédients pour expliquer physiquement les conditions nécessaires à l'apparition de l'arc-en-ciel, le premier spectre que la nature nous ait donné.

II L'œil et la lumière

Au-delà des mythes et légendes remontant à la nuit des temps, au-delà des explications magiques ou divines, des méthodes et raisonnements plus rigoureux se sont petit à petit mis en place, de manière très non-linéaire au cours de l'histoire. Il y a actuellement toujours débat sur qui serait l'inventeur de la méthode scientifique telle que nous la connaissons. S'il n'y a pas de réponse unique à cette question, il est courant de citer de grands noms tels que Johannes Kepler, Galileo Galilei (Galilée) ou Isaac Newton. Tous ces scientifiques sont d'ailleurs fortement liés à l'optique et à l'astronomie, disciplines motrices du développement des sciences depuis l'antiquité.

Il convient toutefois de citer ici un autre précurseur très important, en remontant plus loin dans le temps et en quittant l'Europe : Abu Ali al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haytham, connu en Occident sous le pseudonyme de « Alhazen » (Figure 1.II.1). Né à Bassora (actuel Irak) en 965 et mort au Caire en 1040, il s'intéresse aux mathématiques, à l'astronomie et à l'optique et publie de très nombreux livres sur ses travaux, dont seule une petite partie nous est parvenue aujourd'hui [Haidar, 2011].

Tout d'abord, Alhazen est l'un des premiers à poser les bases du raisonnement scientifique d'une manière absolument claire et à esquisser la notion moderne d'esprit critique. Il énonce ainsi dans son ouvrage majeur, le *Traité d'Optique*, ce principe remarquable pour l'époque : « *La vérité est recherchée pour elle-même... Ce n'est pas celui qui étudie les livres de ses prédécesseurs et laisse libre cours à sa disposition naturelle à les considérer favorablement, qui est le chercheur de vérité.* » Sur le sujet de la lumière, Alhazen a une contribution décisive. Si ses travaux n'ont pas de lien direct avec la spectroscopie (il ne semble pas avoir étudié le problème de l'arc-en-ciel, par exemple), il jette les bases correctes indispensables aux travaux de ses successeurs. Il fallait en effet pour cela comprendre le comportement de la lumière et la nature de la vision. Depuis l'antiquité, différents courants s'affrontent sur ce sujet. De grands noms comme Claude Ptolémée (dont les théories astronomiques



FIGURE 1.II.1 – *Hommage à Alhazen et à ses travaux en optique sur un billet de 10 Dinars irakien (années 1980).*

s'imposent jusqu'à la Renaissance) défendent l'idée que c'est l'œil qui émet de la lumière en direction des objets. D'autres, comme Aristote, pensent qu'au contraire l'œil capte la « forme physique » des objets.

Alhazen tranche la question d'une manière beaucoup plus rigoureuse, fondée sur de véritables expériences, en s'intéressant à la fois à la nature de la lumière et au fonctionnement du seul récepteur connu à l'époque (et encore pour longtemps) : l'œil. Il considère que la lumière est constituée de rayons se propageant en ligne droite et que l'œil est un instrument d'optique qui capte ces rayons, le cerveau se chargeant d'interpréter les informations reçues. Sa conception, plus précisément, est mécaniste : les rayons lumineux sont constitués d'un flux de « sphères pesantes » (donc des corpuscules) émises par des sources ponctuelles. Il s'agit d'une vision remarquablement moderne et juste pour l'époque. Alhazen étudie en détail la structure des yeux (Figure 1.II.2).

Ses réflexions sur la propagation des rayons lumineux s'appuient sur l'utilisation de la chambre noire et du sténopé (petit trou dans la paroi de la chambre qui en constitue la seule entrée de lumière, voir Annexe I). En remplissant une chambre noire de fumée, il visualise le trajet des rayons issus du trou d'entrée. Dans une chambre vide, il obtient une image inversée de sources de lumières situées à l'extérieur. Il emploie tout d'abord une série de lampes allumées puis éteintes successivement : la tache lumineuse créée sur l'écran de la chambre s'allume ou s'éteint de manière opposée (Figure 1.II.3). Il montre ensuite que l'on peut former une véritable image, se posant

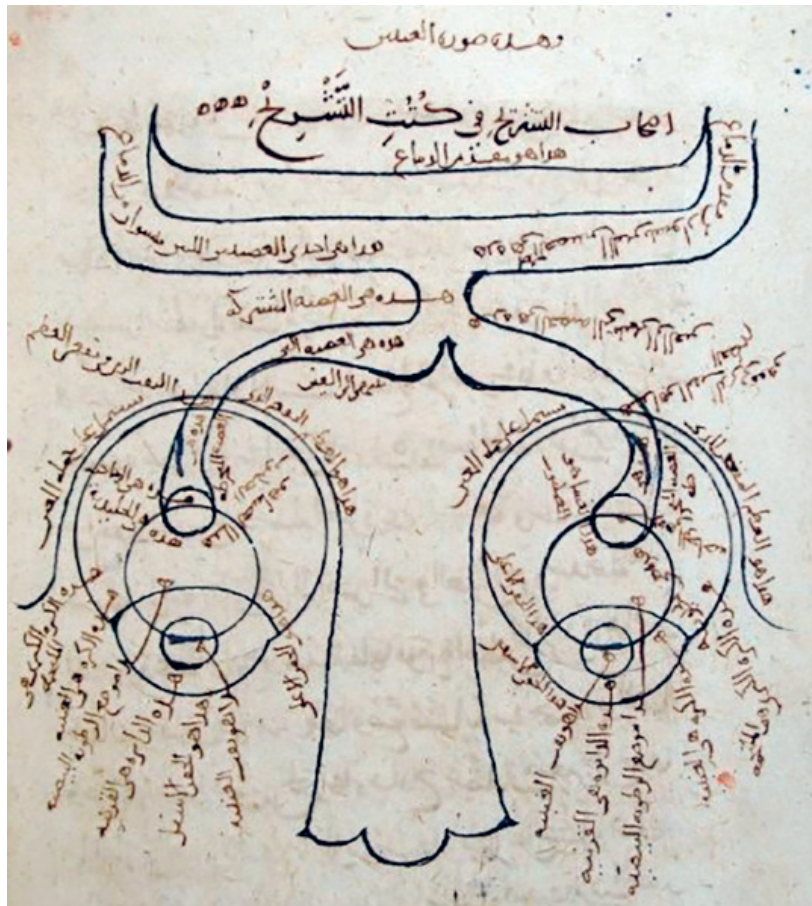


FIGURE 1.II.2 – *L'œil humain selon Alhazen (extrait du Kitāb al-Manāzīr, MS Fatih 3212, vol. 1, fol. 81b, Süleimaniye Mosque Library, Istanbul).*

en précurseur de la photographie, même si, à l'époque, il ne dispose pas de moyen autre que le dessin pour enregistrer cette image (Figure 1.II.4).

Si le sténopé (un simple trou) est l'élément optique le plus élémentaire, Alhazen s'intéresse également à la vision à travers un récipient d'eau, puis aux lentilles sphériques dont il note le pouvoir grossissant. Il étudie les lois de la réflexion, ainsi que de la réfraction (mais sans aller jusqu'à bout pour comprendre la dispersion de la lumière, comme mentionné plus haut, laissant à Snell, Descartes, puis Newton le soin de la comprendre en détail). Tous ces travaux remarquables constituent les prémices d'une étude scientifique de la lumière au cours des siècles suivants. Ils influenceront Léonard de Vinci, Johannes Kepler, Galilée et René Descartes, qui le citeront.

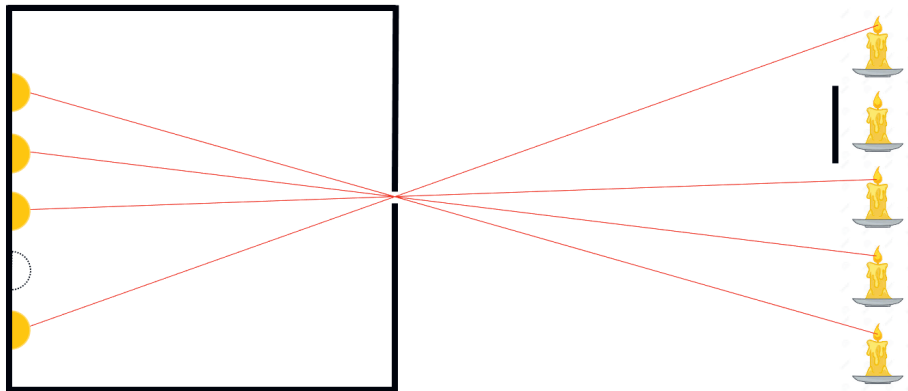


FIGURE 1.II.3 – *Principe de l'inversion d'image dans la chambre noire. En cachant une des lampes, on peut voir la position de l'image manquante, à l'opposé sur l'écran.*

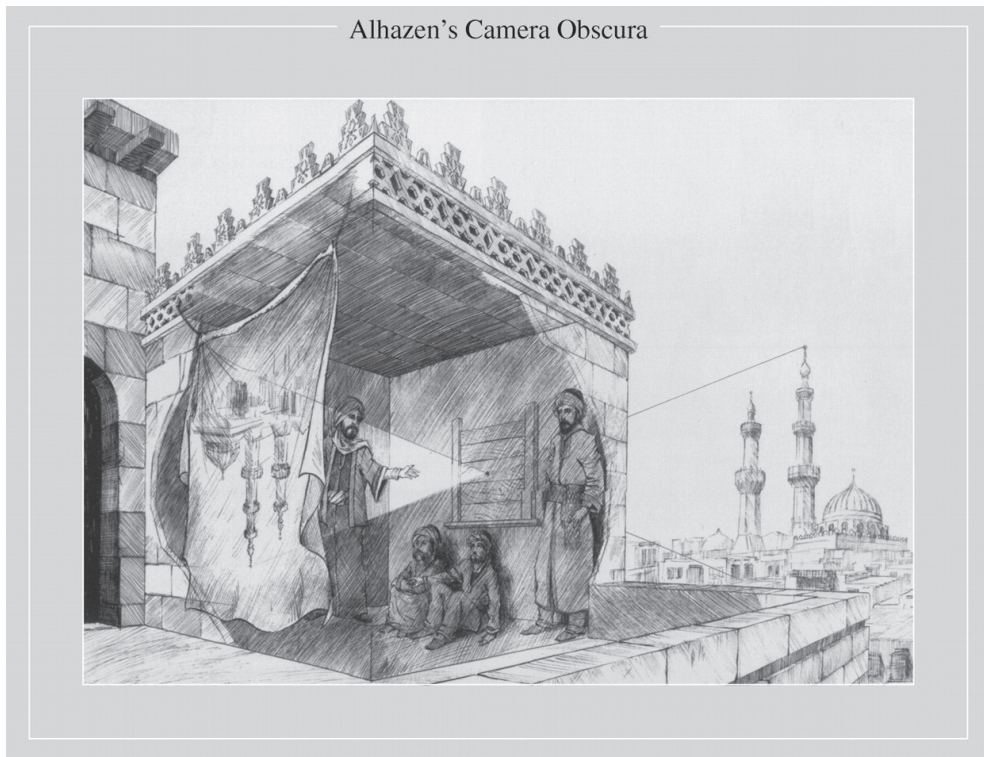


FIGURE 1.II.4 – *Formation d'une image dans une chambre noire avec un sténopé (source : [Zewail, 2010], Figure 2, page 1193).*

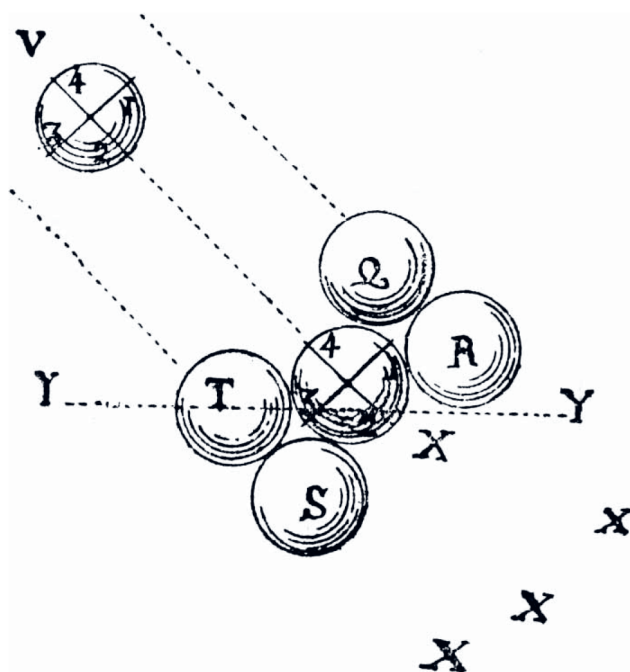


FIGURE 1.II.5 – *Les sphères réfractantes de Descartes (extrait d'un article scientifique [Buchwald, 2008], d'après le livre de Descartes [Descartes, 1637]).*

Concernant l'Europe, au Moyen Âge, la vision de l'arc-en-ciel dérive des travaux du Grec Aristote et des Arabes. L'aspect géométrique était donc essentiel. Le visible est géométrisable : nous pouvons le calculer en tenant compte de réflexions et de réfractions. Au XIII^e siècle, l'aspect corpusculaire d'Alhazen est oublié. Pour expliquer l'arc-en-ciel, l'aspect mystique est présent, mais aussi l'aspect science expérimentale, afin de tenter des premières explications sur l'origine de ses couleurs et ce grâce à quelques précurseurs. Ainsi, l'Anglais Robert Grosseteste et le Polonais Erazmus Ciolek Witelo effectuent les premières tentatives d'explication, encore maladroites, basées sur la réfraction. Surtout, le Français Dietrich (en français Thierry) de Freiberg réalise une série d'expériences utilisant des sphères de verre remplies d'eau.

Mais ce n'est pas avant 1637 que les couleurs de l'arc-en-ciel vont recevoir une première interprétation par René Descartes [Descartes, 1637, Haidar, 2011], grâce à des boules d'éther (notion expliquée dans la section suivante) qui forment la lumière et qui se mettent à tourner sur elles-mêmes lorsqu'elles rencontrent une surface.