

Arc de cercle en ciel



Sommaire

- 3 *A travers l'histoire*
- 8 *Poster d'arc-en-ciel*
- 10 *L'arc-en-ciel et le mystère de l'Indigo*
- 12 *Les nuits de l'arc-en-ciel*
- 14 *Les fronts d'ondes*
- 16 *Extrait de textes historiques de Descartes et de Newton*

Edito

Vous avez entre les mains le deuxième numéro du magazine de l'IRH. Sa sortie coïncide avec les « journées de l'Académie des Sciences à Nice » durant lesquelles l'IRH réalise un arc-en-ciel de nuit devant l'ancienne préfecture dans le vieux-Nice. Ces journées seront l'occasion de montrer le résultat de la collaboration que nous avons lancée il y a un an avec le lycée professionnel « Les Eucalyptus » pour créer un prototype de malette pédagogique sur la mécanique et le mouvement. Les informations sur ce projet sont disponibles sur le site web de l'IRH.

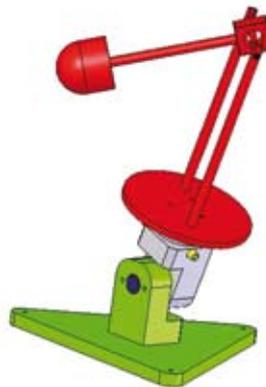
La sortie du magazine coïncide également avec l'arrivée des vacances pendant lesquelles ce numéro vous sera très pratique pour comprendre ce phénomène météorologique et pour en reproduire chez vous ou les trouver un peu partout, lors de ballades à la montagne, sur les plages ou tout simplement lorsque vous arrosez. Vous pourrez devenir ainsi un véritable chasseur d'arcs-en-ciel.

Le numéro précédent a été un succès : il a été distribué à 3000 exemplaires, notamment dans l'ensemble des lycées et plusieurs collèges du département. Nous continuerons dans ce sens grâce au financement de quatre numéros par le Conseil régional et le Conseil général. De quoi couvrir en plus de *l'arc-en-ciel*, *le mouvement*, *l'optique* et un numéro spécial sur *Robert Hooke*.

Tous les textes de ce magazine sont disponibles sur notre site web (irh.unice.fr) avec en outre des textes complémentaires et des simulations. Vous êtes d'ailleurs de plus en plus nombreux à visiter notre site. Vous pouvez y (re)trouver les vidéos de la plupart des conférences organisées par l'IRH, des publications, des vidéos d'expériences, des simulations numériques, une revue de presse de l'actualité scientifique, un calendrier de nos activités, ...

Dès aujourd'hui nous vous donnons rendez-vous lors de la prochaine fête de la Science qui aura lieu du 9 au 15 octobre 2006 au parc Valrose à Nice. L'IRH organisera en coopération avec les étudiants et les laboratoires une série d'expériences dans des domaines variées de la science, des soirées thématiques, des conférences, ...

Marc Monticelli



I.R.H.

Magazine de culture scientifique de l'Institut Robert Hooke
Université de Nice-Sophia Antipolis

Siège de la publication

I.R.H.
28 av. Valrose
06103 NICE CEDEX 2

Tél : 04 92 07 64 60

Courriel : irh@unice.fr

Site : irh.unice.fr

Directeur de la publication

Albert Marouani

Directeur scientifique

Pierre Coulet

Rédacteur en chef

Marc Monticelli

Rédaction : Méderic Argentina,
Jean-Luc Beaumont, Pierre Coulet,
Jean-Marc Levy-Leblond

Crédit photographique : Jean-Luc
Beaumont, Marc Monticelli,
Jean-Luc Filippi

Maquette : Jean-Luc Filippi, Marc
Monticelli

Impression : Imprimerie Crouzet,
Nice

ISSN

En cours d'identification

Copyright

La reproduction des textes, illustrations, partiellement ou dans leur totalité, est interdite, sauf accord préalable de la rédaction.

Ce magazine a reçu le soutien financier du Conseil régional PACA et du Conseil général des Alpes-Maritimes.



A TRAVERS L'HISTOIRE

par Pierre Coulet

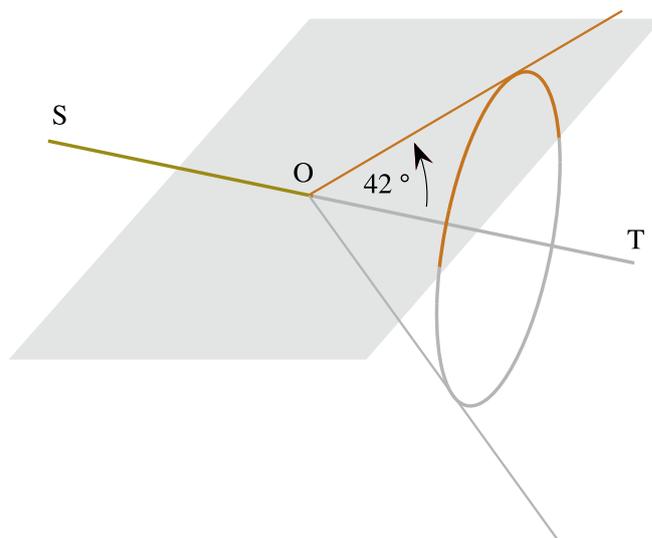
De tous les phénomènes météorologiques, l'arc-en-ciel est l'un des plus spectaculaires. Son étude remonte aux débuts de la science, au moment même où des philosophes comme Thalès, tentaient de démystifier les phénomènes naturels. Ce n'est que depuis quelques décennies seulement que l'arc-en-ciel est compris dans tous ses détails. On doit distinguer plusieurs époques dans l'étude de l'arc-en-ciel. Depuis Aristote (384-322), on sait placer correctement l'arc dans le ciel, par rapport au soleil et à l'observateur. C'est vers la fin du Moyen Âge, grâce à l'expérimentation, que les phénomènes physiques contribuant à la formation de l'arc ont été identifiés. Le calcul de l'arc, quant à lui, remonte au dix-septième siècle. C'est finalement au dix-neuvième que la nature ondulatoire de la lumière était prise en compte.

L'arc-en-ciel est caractérisé par une surintensité lumineuse colorée. Il prend la forme de deux arcs de cercle parfaits que l'on observe généralement sur le fond plus sombre d'un mur d'eau se situant à l'opposé du soleil par rapport à l'observateur.

Dans son ouvrage intitulé « Les Météorologiques », Aristote décrit avec beaucoup de précision la géométrie apparente de l'arc : « Quant à l'arc-en-ciel, jamais il ne forme d'arc de cercle complet, ni de segment plus grand qu'un demi-cercle. C'est au lever et au coucher du soleil que le segment est le plus grand [...] Il n'y a jamais plus de deux arcs de cercle en même temps. Chacun d'eux alors à trois couleurs, les couleurs sont les mêmes dans l'un et dans l'autre, ainsi que leurs nombres ; mais, dans l'arc extérieur, elles sont plus faibles et leurs positions sont inversées [...] L'arc-en-ciel a lieu pendant le jour, et l'on croyait autrefois qu'il n'apparaissait jamais la nuit par l'effet de lune ».

Afin de placer précisément les arcs, définissons la droite antisolaire comme celle qui passe par le soleil et la tête de l'observateur. L'ombre de la tête de l'observateur sur le sol est évidemment aussi sur cette droite. Avec le bras indiquons une direction quelconque faisant un angle de l'ordre de 41 degrés avec la droite antisolaire, c'est-à-dire avec la droite passant par la tête de l'observateur et l'ombre au sol de sa tête. Faisons tourner le bras en maintenant l'angle de 41 degrés avec la direction antisolaire. La main de l'observateur dessine alors un cercle dont la partie au-dessus du sol matérialise le premier arc. Dans son mouvement, le bras engendre un cône de demi-angle au sommet de 41 degrés. Le second arc est obtenu de façon similaire en fixant l'angle entre le bras et la droite antisolaire de l'ordre de 53 degrés.

Pour Aristote, l'arc-en-ciel est un phénomène de réflexion. Aujourd'hui on dirait que la lumière émise par le soleil est réfléchi par la pluie et forme l'image



La construction géométrique de l'arc selon Aristote.

Aristote a décrit avec beaucoup de précision la géométrie apparente de l'arc : « Quant à l'arc-en-ciel, jamais il ne forme d'arc de cercle complet, ni de segment plus grand qu'un demi-cercle. C'est au lever et au coucher du soleil que le segment est le plus grand [...] Il n'y a jamais plus de deux arcs de cercles en même temps. Chacun d'eux alors à trois couleurs, les couleurs sont les mêmes dans l'un et dans l'autre, et leur nombre est le même ; mais, dans l'arc extérieur, elles sont plus faibles et leur position est inversée [...] L'arc-en-ciel a lieu pendant le jour, et l'on croyait autrefois qu'il n'apparaissait jamais la nuit par l'effet de lune ».

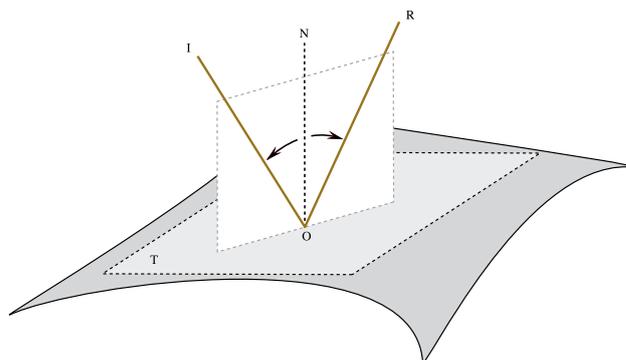
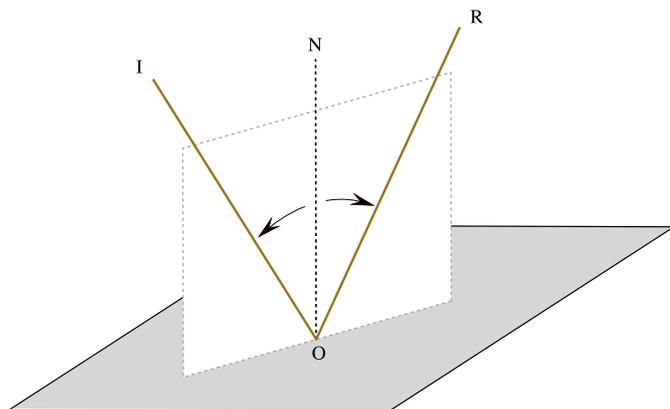
La direction anti-solaire est matérialisée par la droite SO. Elle se prolonge au delà de l'observateur par la direction de son ombre portée.

d'un arc-en-ciel dans l'œil de l'observateur.

Les rayons de la lumière.

La notion de rayons lumineux qui permettra à l'optique de faire des progrès considérables s'est longtemps opposée à celle des « rayons visuels ». La théorie d'un rayon visuel émis par l'œil est due aux pythagoriciens. Le fait qu'un chat par exemple, soit doué d'une certaine « vision nocturne » constituait une « preuve » de l'existence de ces rayons. Les atomistes et Empédocle avaient, quant à eux, développé l'idée de rayons lumineux émanant de tous les objets. C'est grâce à l'opticien Alhazen (965-1039), fondateur de l'optique moderne que l'idée des rayons de lumière émis par des sources, réfléchis et réfractés par des objets, s'est définitivement imposée. L'optique géométrique n'est cependant pas née au Moyen Âge. Le rayon visuel et le rayon lumineux finalement étaient en fin de compte constitués des mêmes segments de droite. Seule l'interprétation relative à l'origine physique de ces rayons est différente. C'est avec Euclide (325-265) que naît véritablement l'optique géométrique.

Dans son traité d'optique, il établit la loi de réflexion des rayons de lumière. Dans sa version moderne, les sources de lumière émettent des rayons lumineux qui sont réfléchis lorsqu'ils rencontrent des obstacles. Lorsque les surfaces de ces obstacles sont particulièrement lisses, comme par exemple la surface plane

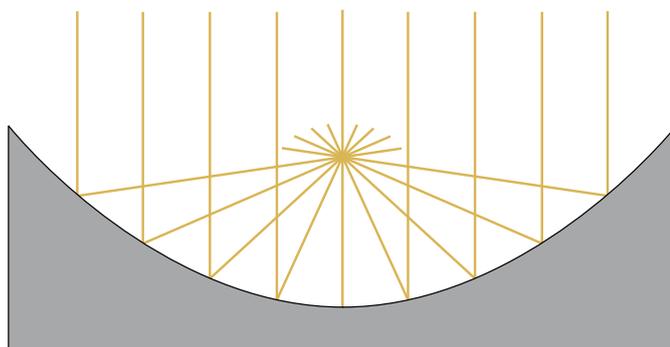


La loi d'Euclide de la réflexion des rayons visuels.

Le rayon lumineux incident I frappe le miroir en O. En O, on trace la normale ON. Les droites IO et ON engendrent un plan normal, dessiné en pointillé sur la figure. Le rayon réfléchi, OR appartient au même plan et est tel que l'angle d'incidence ION et l'angle réfléchi NOR sont égaux.

Lorsque la surface réfléchissante est courbée, la construction d'Euclide s'applique au plan tangent T au point O ou le rayon incident touche la surface.

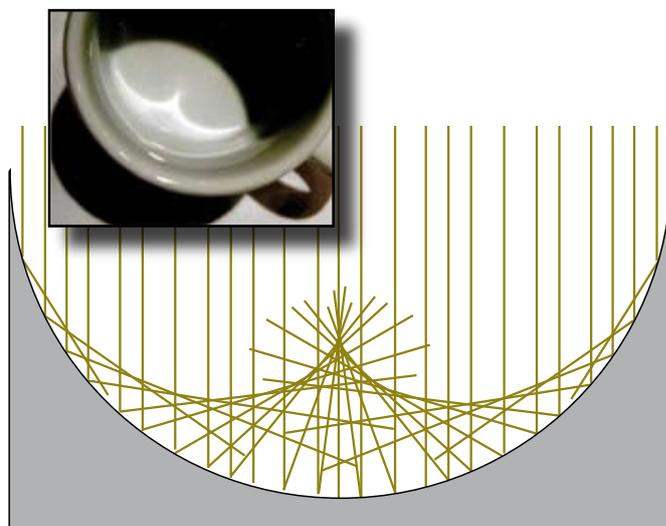
d'une eau calme ou d'un miroir, ces rayons sont réfléchis. La loi d'Euclide stipule que le rayon incident et le rayon réfléchi forment le même angle avec la direction normale à la surface réfléchissante. La normale au point d'incidence et le rayon incident sont dans un plan : le plan d'incidence. Le rayon réfléchi est également dans ce même plan. Lorsque la surface n'est pas plane, c'est son plan tangent au point d'incidence qui joue le rôle de miroir.



Le foyer d'un miroir parabolique

Les rayons qui proviennent d'une source de lumière ponctuelle lointaine se concentrent après réflexion sur un miroir parabolique en un point, le foyer de la parabole.

Le principe de nos antennes paraboliques a été découvert par Dioclès (~240-~180). Il fut utilisé avec succès pour la première fois par Isaac Newton (1643-1727) pour construire le premier télescope parabolique. Lorsque la source de lumière est lointaine, les rayons qui parviennent sur une petite surface sont pratiquement parallèles. Une surface concave parabolique réfléchissante, orientée dans la direction d'une source lointaine, concentre tous les rayons vers un point, le foyer du miroir (voir figure). Cette concentration est un cas très particulier d'un phénomène plus général connu sous le nom de caustique. Si on remplace la surface parabolique par une surface sphérique, la concentration ne se produit plus sur un point mais sur une surface, avec un maximum d'intensité en son centre. L'arc-en-ciel, comme nous le verrons plus loin, n'est rien d'autre qu'une caustique conique.

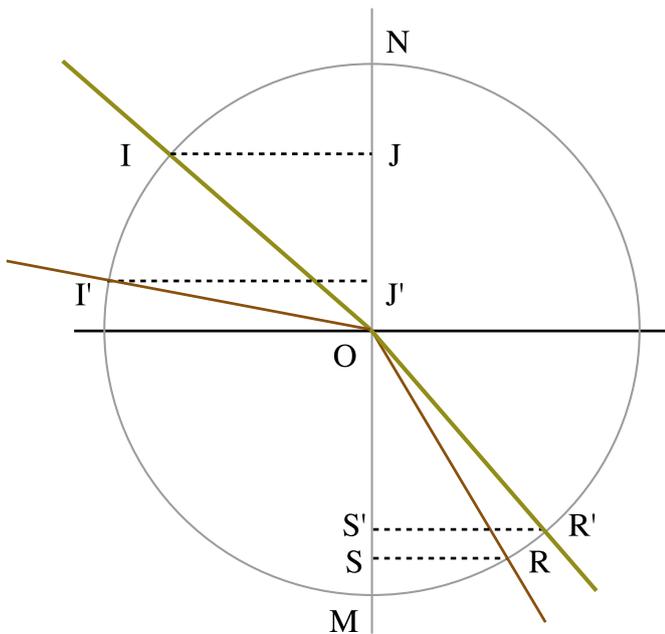


La caustique de la tasse de thé

La focalisation des rayons lumineux ne se produit pas en général sur des points, mais plutôt sur des surfaces et sur des lignes. Ces surfaces et ces lignes sur lesquelles on observe une surintensité lumineuse sont des caustiques. Elles généralisent la notion de foyer simple. La caustique d'un miroir cylindrique est une surface singulière, dessiné par Leonardo da Vinci et calculé pour la première fois par Christian Huygens.

Lorsque le rayon rencontre un obstacle transparent, une partie du rayon est réfléchi et une partie est transmise. Dans sa transmission, le rayon change de direction. Ce phénomène, la réfraction, a été étudié par Ptolémée (~85-~165) qui cherchait à établir des cartes du ciel précise, tenant compte du passage des rayons lumineux dans l'atmosphère. Il mesura des angles d'incidence et de réfraction pour les passages air-eau, air-verre et eau-verre. Bien qu'il ne puisse pas tirer une règle générale, ses tables de mesure constituent un effort remarquable pour cette époque. La loi mathématique de la réfraction a été donnée pour la première fois par Snell (1580-1626), mais publiée plus tard par Descartes qui l'a utilisée en particulier pour faire le premier calcul de l'arc-en-ciel.

C'est vers la fin du Moyen Âge que deux savants indépendamment donnent l'explication du phénomène de l'arc-en-ciel. L'idée vague que l'arc-en-ciel était dû à la réflexion de la lumière par le nuage ne pouvait pas être vérifiée expérimentalement.



La construction géométrique du rayon réfracté

Lorsque un rayon lumineux change de milieu, comme par exemple dans le passage air-eau, sa direction change selon une loi énoncée par Snell et publiée en 1637 par Descartes dans « Dioptriques ». Comme dans le cas de la réflexion, le rayon réfracté se trouve dans le plan que fait le rayon incident avec la normale au point où le rayon touche l'interface qui sépare les deux milieux. La réfraction est un phénomène connu depuis l'antiquité. Ptolémée a produit des tables de réfraction très précises, mais n'a pas réussi à établir la loi mathématique. La difficulté qu'on rencontré tous les savants est liée à leur tentative de trouver une loi reliant l'angle incident et l'angle réfracté. Comme nous le savons cette loi n'est pas simple, sauf pour les petits angles ou l'angle du faisceau réfracté est simplement proportionnel à l'angle d'incidence.

On considère un cercle de rayon arbitraire centré sur le point d'impact du rayon incident.

Le rapport IJ/SR est constant et égal à l'indice n de réfraction du milieu. Dans le cas de la figure on a choisi $n=1.5$, de sorte que $SR=2 IJ/3$. Cette construction est équivalente à la loi des sinus qui stipule que le sinus de l'angle du rayon incident avec la normale est proportionnel au sinus de l'angle du rayon réfracté.

Al Farisi, propose un modèle dans lequel la réflexion sur une face interne d'une goutte d'eau est responsable de la formation de l'arc. Il soumit ce modèle à une expérimentation minutieuse, en remplaçant la goutte d'eau par une sphère transparente remplie d'eau. Plaçant cette fiole dans une chambre noire percée d'un petit trou, il fut à même de suivre le trajet d'un rayon lumineux, confirmant l'hypothèse d'une réflexion sur la face interne de la fiole.

Thierry de Friedberg (1250-1310) arrive indépendamment à la même conclusion qu'Al Farisi en faisant une expérience beaucoup moins sophistiquée.

C'est Descartes qui, le premier effectue le calcul numérique précis de l'image d'une source ponctuelle lointaine par une goutte d'eau sphérique. Pour cela, il a calculé l'angle entre un rayon entrant dans la sphère et la sortie en fonction de l'angle d'impact (voir encadré) en utilisant la loi de Snell-Descartes. Ce calcul montre que cet angle présente un maximum pour une valeur de 41 degrés et demi. Lorsque le rayon subit deux réflexions internes, c'est un minimum qu'il obtient pour

un angle voisin de 52 degrés. Les rayons qui sont dans le voisinage de ces extrema sont nommés les « rayons efficaces de Descartes ». Ils correspondent à une accumulation de rayons lumineux parallèles qui forment une caustique conique de demi-angle au sommet respectivement de 41 degrés et demi et 52 degrés. La zone comprise entre ces deux cônes est plus sombre puisqu'elle ne contient que les rayons réfléchis par la face externe de la goutte. Plus d'un demi-siècle avant, Francesco Maurolico (1494-1575), ne possédant pas la loi de Snell de la réfraction, obtenait 45 et 56 degrés comme valeurs de ces angles.

Le calcul exact des angles sera fait par Newton par une méthode géométrique élégante et par Spinoza par le calcul des extrema de l'angle entre le rayon à l'entrée et à la sortie en fonction de l'« angle d'impact ».

La question des couleurs de l'arc-en-ciel est d'une certaine façon secondaire. La dispersion chromatique d'un faisceau de lumière blanche qui pénètre dans un milieu d'indice différent était connue depuis longtemps. Des expériences à l'aide d'un prisme ont été faites bien avant celle de Newton. C'est pourtant à ce dernier que reviendra le mérite d'établir par une expérience faite à l'aide de deux prismes que la lumière blanche est en fait composée de lumière colorée présentant des indices de réfraction différents. Ce phénomène dit de réfrangibilité de la lumière est à l'origine de l'irisation de l'arc-en-ciel. En fait, pour chaque composante de la lumière, la réflexion sur la face interne de la goutte engendre une caustique conique de demi-angle au sommet légèrement différent. L'inversion des couleurs entre le premier et le second arc est la simple conséquence de la réflexion supplémentaire qui inverse naturellement l'ordre des couleurs.

Les gouttes de pluie sont-elles bien rondes ?

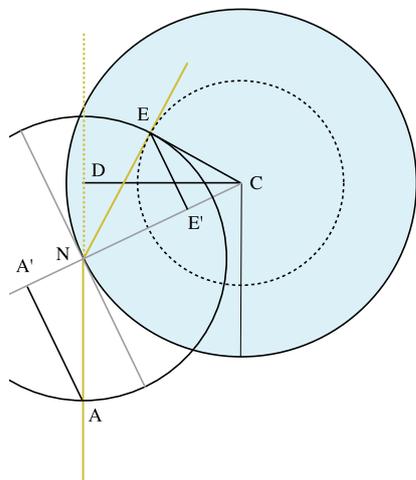
Le modèle de gouttes de pluie sphériques d'Al Farisi est justifié par l'observation de petites gouttes de pluie qui restent après l'ondée sur les feuilles et dans les toiles d'araignées. Mais les gouttes de pluie qui chutent sont-elles bien rondes ? La réponse à cette question ne sera que très tardive. La taille typique d'une goutte de pluie est de l'ordre du millimètre. À cette taille la force qui maintient la goutte sous une forme sphérique, connue sous le nom



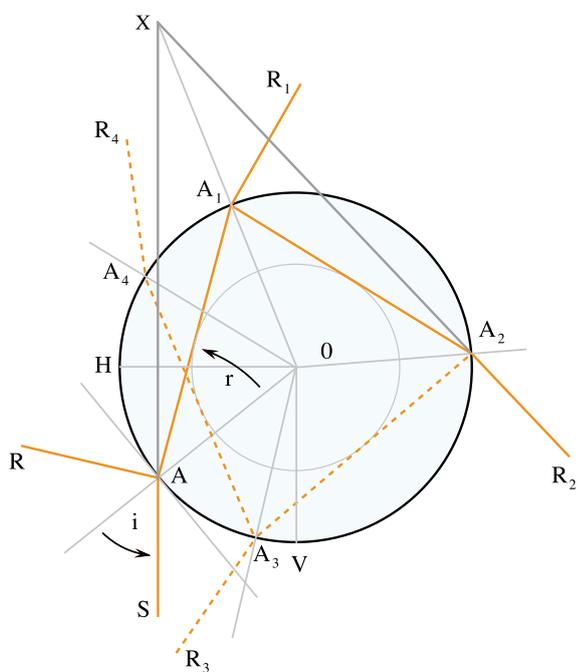
de force capillaire, est dominante. C'est le comportement « grégaire » des molécules de l'eau qui est à l'origine de cette force. Pour une explication détaillée, nous renvoyons le lecteur à un article excellent sur la physique d'une goutte d'eau écrit par David Quéré et Claudius Laburthe (http://www.agrobiosciences.org/IMG/pdf/La_goutte_d_eau.pdf)

Les gouttes chutent alors que le modèle d'Al Farisi était immobile.

La question du mouvement des gouttes n'est pas importante. En effet, la vitesse typique d'une goutte est de

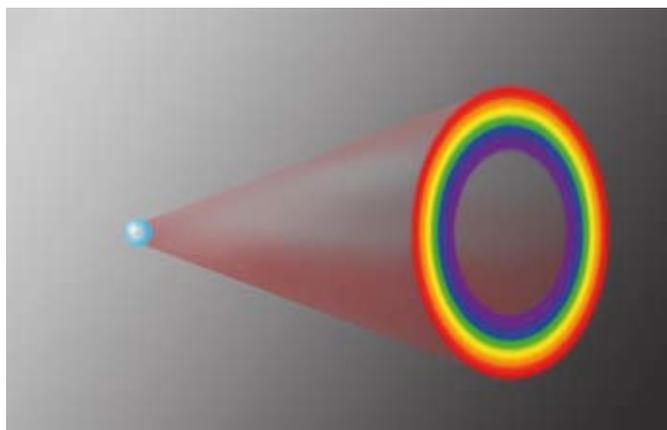


On utilise la construction géométrique du rayon réfracté (figure X). De la similitude des triangles A'NA et DNC et de NEE' et NCE, on en déduit que le rapport $CD/EC=AA'/EE'$ est égal à l'index de réfraction. La loi de Snell sous la forme moderne, $\sin(i) = n \sin(r)$, permet d'obtenir cette relation directement puisque $\sin(r) = EC/NC$ et $\sin(i)=DC/NC$. La distance DC est le « paramètre d'impact » du rayon incident. Il varie entre 0 et le rayon de la goutte. On trace un cercle de rayon CE. Le rayon réfracté est obtenu simplement en traçant la droite tangente à ce cercle passant par le point d'impact.



Le rayon incident SA frappe la sphère en A et se réfléchit partiellement (AR). La partie réfractée rencontre la face intérieure de la goutte en A1. Une fraction de ce faisceau est réfractée à l'extérieur de la goutte (A1R1) et une partie est réfléchi et frappe la face avant de la goutte en A2. A nouveau une fraction est réfractée à l'extérieur de la goutte et une autre fraction est réfléchi vers A3 ... La construction des rayons est triviale et est laissée au lecteur. Les rayons A2R2 sont ceux qui constituent l'arc primaire. Les rayons A3R3 forment le deuxième arc.

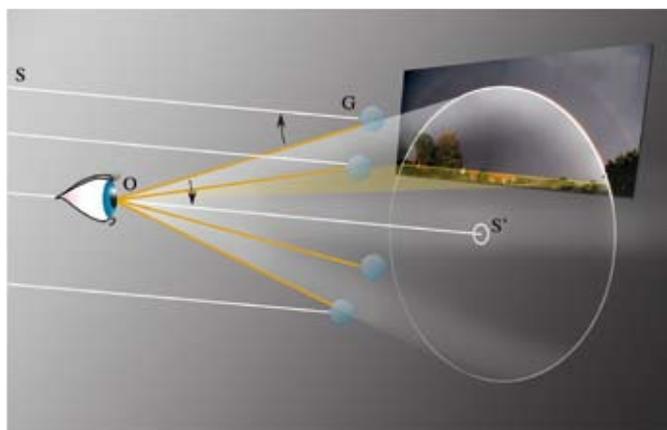
Le calcul classique de l'angle de l'arc arc ciel est due à Spinoza. Il consiste à chercher l'extremum de l'angle entre le rayon d'entrée et le rayon de sortie SXA2 en fonction de l'angle d'incidence. L'angle SXA2 est égal à $4r - 2i$, où r et i sont respectivement l'angle de réfraction et l'angle d'incidence. L'extremum est obtenu en annulant la variation infinitésimale de cet angle : $2 dr - di = 0$, ou encore $dr/di = 1/2$. Différentiant la loi de Snell, on obtient l'angle d'incidence i_c correspondant à l'extremum de l'angle SXA2. Il est donné par $\sin^2(i_c) = (4-n^2)/3$. En utilisant comme valeur de l'indice air-eau la valeur approximative 1.33, on trouve que l'angle extrémum est un maximum et vaut approximativement 42 degrés et 30 secondes. Un calcul similaire permet de calculer le minimum de déviation après deux réflexions interne. Sa valeur approximative est de l'ordre de . Entre ces deux angles, aucun rayon de sort après une et deux réflexions. C'est l'explication de la bande sombre d'Alexandre.



l'ordre de 5 à 7 mètres par seconde. Le rayon lumineux qui pénètre la goutte à la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s, séjourne dans la goutte dont la taille est de l'ordre du millimètre pendant une dizaine de picosecondes (10-11). Pendant ce temps, la goutte se déplace d'une distance de l'ordre d'un Angstrom, c'est-à-dire d'une distance comparable à celle d'un atome d'hydrogène !

Pourquoi l'observateur voit-il un arc de cercle en ciel ?

Chaque goutte renvoie vers le soleil une image avec un maximum d'intensité sur une caustique conique dont l'axe est la direction des rayons solaires. L'observateur remarque particulièrement une goutte seulement si son œil se situe sur la nappe conique. Les gouttes dont la nappe conique passe par l'œil de l'observateur, sont elles-mêmes sur un cône centré sur l'œil de l'observateur de même demi-angle au sommet et dont l'axe est la direction antisolaire.



Chaque goutte renvoie vers le soleil une caustique conique (ensemble des rayons efficaces) de demi-angle au sommet de l'ordre de 41 degrés. L'observateur ne reçoit que les rayons efficaces provenant de gouttes qui se situent elles-mêmes sur un cône dont le sommet est situé sur l'œil de l'observateur et l'axe dans la direction antisolaire OS'. Les demi-angles des caustiques coniques et celui du cône qui porte l'arc-en-ciel sont égaux en vertu d'un théorème de géométrie élémentaire : deux droites parallèles (SG et OS') coupé par une sécante (OG) forme des angles alternes internes égaux (SGO et GOS')

Les surnuméraires.

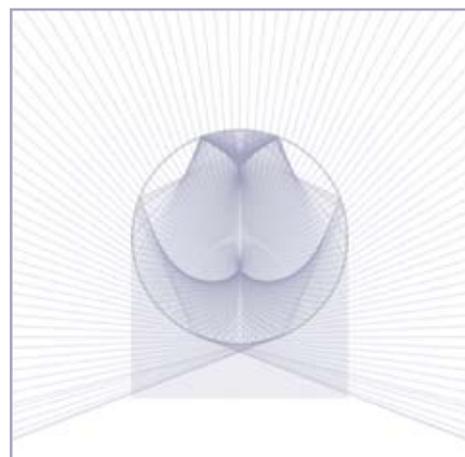
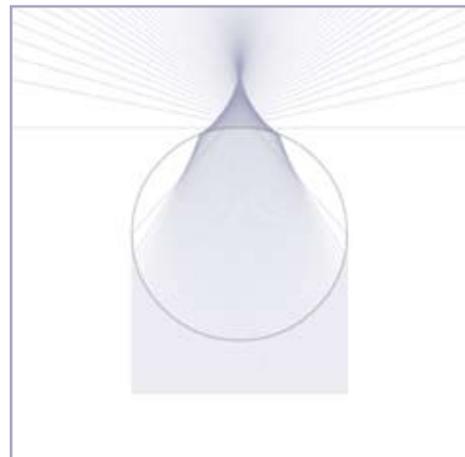
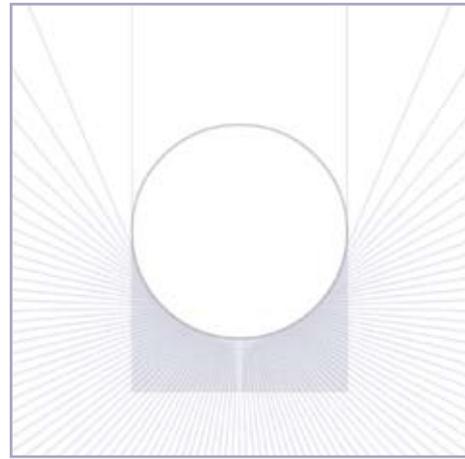
Dans certaines occasions, l'arc primaire se « décore » d'un certain nombre d'arcs supplémentaires, moins colorés. Ces arcs « surnuméraires » ont été notés par les savants dès le Moyen Âge et ont constitué une



énigme importante. C'est au médecin et égyptologue Thomas Young (1773-1829), physicien anglais d'une très grande originalité que devait revenir l'explication du phénomène. La lumière est un phénomène ondulatoire. Deux rayons qui sortent de la goutte dans des directions parallèles, après avoir parcouru des chemins différents dans la goutte, « interfèrent » donnant naissance à des franges d'interférences. L'observation de ce phénomène d'interférence dépend cette fois de la taille des gouttes. Chaque goutte produit son propre système d'interférence. Si les gouttes ont des tailles très différentes, le phénomène d'interférence est brouillé. Dans certaines circonstances météorologiques, la pluie est formée de petites gouttes de taille relativement calibrées, c'est-à-dire de taille voisine. Dans ce cas, les arcs surnuméraires sont observés.

La formule de Mie.

En 1904, un physicien livrait ce que l'on pourrait appeler la formule définitive de l'arc-en-ciel. Techniquement, elle donne la solution des équations qui décrivent la propagation d'une onde plane incidente qui interagit avec une sphère d'indice différent. Cette formule tient compte de tous les aspects de la lumière, y compris les phénomènes de polarisation. La formule de Mie est très compliquée et de nombreuses approximations ont été proposées pour la simplifier. La meilleure approximation qui fait intervenir la théorie des rayons lumineux « imaginaires », date seulement de quelques décennies ! □







© Photo J.L. Filippi/IRH, 2005 Sicile

L'arc-en-ciel et le mystère de l'indigo*

par Jean-Marc Lévy-Leblond

Dominique, physicien(ne), a emmené son ami(e) Claude, plutôt littéraire, assister à une des "Nuits de l'Arc-en-ciel" organisées par l'Institut Robert Hooke. De leur retour, ce dialogue :

Dominique. Magnifique, ces arcs-en-ciel artificiels, non ?

Claude. Oui, mais quelque chose me trouble : je n'y vois pas les sept couleurs habituelles. Serait-ce que le phénomène diffère en quelque façon de celui des arcs-en-ciel naturels ?

Dominique. Mais vous les avez déjà vues, vous, les sept couleurs, dans un "vrai" arc-en-ciel ?

Claude. À bien y repenser, et en toute honnêteté, non. J'y distingue bien du rouge, du jaune-orangé, du vert, du bleu-violet, mais c'est à peu près tout.

Dominique. Oui, comme tout le monde. Je crois que personne ne peut sérieusement y différencier plus de 4 ou 5 bandes, aux limites d'ailleurs floues.

Claude. Il en va d'ailleurs ainsi, cela m'étonne toujours, des arcs-en-ciel représentés par les peintres, toujours assez flous et aux couleurs en nombre assez réduit.

Dominique. Par contre, les figurations symboliques ou publicitaires si communes de l'arc-en-ciel présentent toujours quant à elles des bandes uniformes à bords tranchés, même si elles ne comportent que six couleurs ou moins.

Claude. Mais, pour en revenir au sept couleurs de l'arc-en-ciel, que l'on trouve dans tous les dictionnaires, c'est comme si une représentation mythique l'emportait sur l'image réelle... Ne serait-ce pas, justement, le vieux mythe babylonien du Sept, celui des jours de la Création, des Merveilles du monde, des péchés capitaux, etc., qui se manifesterait ici ?

Dominique. ...sans oublier les bottes de sept lieues du Chat botté, ni la fratrie du Petit Poucet ! Pourtant, les Anciens, eux, n'attribuaient pas sept couleurs à l'arc-en-ciel : Aristote lui en donne trois, les atomistes

grecs quatre – comme les quatre éléments, ce qui montre bien l'influence des symbolismes préconçus sur notre perception.

Claude. Mais alors, d'où vient ce sept ? Et d'abord, quelle est cette septième couleur, qui manquait aux six déjà évoquées (même si elles sont difficiles à distinguer) ?

Dominique. Voyons, c'est l'indigo, bien sûr !

C. Je comprends mieux pourquoi je n'ai jamais vu les sept couleurs ! Car l'indigo, c'est tout simplement un bleu, qu'on serait bien en peine de singulariser et de séparer sur l'ensemble de la bande bleu-violet.

Dominique. D'ailleurs, le mot lui-même, venu du portugais, désigne une teinture arrivée des Indes au XVII^e siècle.

Claude. Ce qui veut dire qu'il ne pouvait y avoir d'indigo dans l'arc-en-ciel auparavant ! Mais alors, quel est le premier à l'y avoir mis ?

Dominique. Eh bien, le coupable n'est autre que Newton, celui-là même qui le premier aussi a donné une théorie scientifique sérieuse de la couleur ! C'est dans son *Optique*, ce fameux livre qui étudie la composition de la lumière blanche par le prisme, qu'il décrit le spectre coloré comme formé de sept couleurs.

Claude. J'ai du mal à croire que ce grand théoricien et expérimentateur scrupuleux ait donné une classification aussi arbitraire – et si peu rationnelle !

Dominique. Oui, j'ai eu la même surprise. C'est que nous sommes encore victimes d'une conception traditionnelle de l'activité scientifique comme pur exer-

cice de rationalité. En réalité, elle est intimement marquée par le contexte culturel, les inclinations idéologiques, les représentations symboliques. Et Newton en offre une excellente illustration, puisqu'il n'était pas seulement physicien, mais théologien et alchimiste aussi.

Claude. Mais comment cela explique-t-il l'intrusion du Sept ? Sans doute, sa culture biblique lui aura-t-elle imposé cette numérologie ?

Dominique. C'est probable. Plus précisément encore, l'aspiration à une harmonie universelle – et divine – de la nature impose à l'esprit de Newton la notion d'un spectre à sept couleurs par homologie stricte avec la gamme musicale à sept notes.

Claude. Mais c'est absolument arbitraire ! Les sept notes de la gamme n'ont rien de "naturel"... Alors, un Newton chinois, accoutumé à une musique pentatonale, aurait vu cinq couleurs dans l'arc-en-ciel ? Comment peut-on faire de la bonne science si l'on ne se débarrasse pas de telles préconceptions ?

Dominique. Le fait est qu'on ne peut pas s'en débarrasser, au moins immédiatement, et que le tri, dans les énoncés de la science, entre fait et fiction, est une tâche sans fin, à poursuivre perpétuellement. La langue de la science, après tout, est la langue commune, et sa terminologie est tributaire d'associations mentales et de charges symboliques inévitables, et d'autant plus lourdes qu'elles ne sont pas conscientes.

Claude. Oui, j'ai toujours noté, en lisant des articles ou en écoutant des conférences de vulgarisation, la négligence langagière des scientifiques, qui utilisent des mots comme "chaos", "trous noirs" ou même "relativité" sans se rendre compte des effets de sens

aberrants qu'ils entraînent. Faute de recourir à un vocabulaire technique et ésotérique qui a aussi ses inconvénients, ils devraient au moins mettre en évidence les décalages entre sens commun et signification savante.

Dominique. Je vous l'accorde volontiers. Mais ce qui rend le problème complexe, et d'autant plus intéressant, c'est que ces confusions sémantiques et ces archaïsmes de pensée, peuvent à l'occasion se révéler étonnamment féconds.

Claude. Auriez-vous un exemple ?

Dominique. Oui, et qui va justement nous ramener à Newton et aux sept couleurs. C'est que l'analogie entre le spectre coloré et la gamme musicale, pour contingente qu'elle soit, recèle une intuition d'une extrême profondeur – celle de la nature ondulatoire commune des deux phénomènes, que Newton est le premier à énoncer, à la fin de son *Optique* justement.

Claude. Une analogie infondée et arbitraire aurait ainsi conduit à en découvrir une réelle et profonde ! Ainsi, selon vous, la science aurait non seulement à s'accommoder de l'imaginaire, mais même à s'en recommander ?

Dominique. C'est bien cela. Au fond, la vérité scientifique ne sort jamais toute nue du puits. Elle reste à jamais vêtue, entourée de voiles peut-être changeants, mais qui la révèlent autant qu'ils la cachent.

Claude. Et dont la couleur, naturellement, est l'indigo ! □

* Les questions évoquées dans ce texte sont traitées en détail, avec toutes les références nécessaires, dans l'article de l'auteur « Les x couleurs de l'arc-en-ciel », disponible en ligne. Pour un traitement historique complet de la physique de l'arc-en-ciel, voir le livre de Bernard Maitte, *Histoire de l'arc-en-ciel*, Seuil, 2005.

LES NUITS de l'ARC en CIEL

par Jean-Luc Beaumont

Lorsque le camion des sapeurs-pompiers arrive sur le lieu de l'animation, le Soleil vient juste d'achever sa course diurne. Il a disparu de notre horizon par le ponant, à l'ouest, d'abord caché par les collines alentour, puis dissimulé sous la rotondité de la Terre. Depuis une demi-heure, de là où nous observons, l'astre solaire est descendu sous les 6° (crépuscule civil). Bientôt débutera le crépuscule nautique (12° au-dessous de l'horizon), soit le moment idéal pour observer ce que certains qualifient comme « un phénomène remarquable par sa beauté et sa pureté » : l'arc-de-cercle-en-ciel.

Finalement, pour que le spectacle soit parfait, le décor est fort simple. Un authentique crépuscule vieux d'une bonne demi-heure, un espace dégagé sur une centaine de mètres, de l'eau sous pression, une source ponctuelle lumineuse puissante, une salle de conférences, un professeur et le public. Nous nous jouons même des intempéries pour produire artificiellement cet arc-en-ciel nocturne, bien qu'il semble préférable pour l'assistance de le contempler lorsque le temps est plus clément.

Nous avons conçu un cycle de conférences et de spectacles scientifiques, où se mêlent physique, géométrie, physiologie, chimie, mythologie et art, pour sensibiliser tous les publics et apporter l'éclairage nécessaire sur ce phénomène météorologique terrestre naturel appelé « météore », objet temporel et éphémère produit par la lumière, certainement le plus visible bien qu'étonnamment mal connu dans sa composition par le plus grand nombre. En témoigne l'intérêt de tous lors des spectacles donnés dans le cadre des « Nuits de l'arc-en-ciel » organisés par l'Institut Robert Hooke de l'Université de Nice-Sophia Antipolis.



Il est très surprenant qu'un phénomène de cette nature, compris pour l'essentiel depuis le Moyen Âge, soit aussi peu connu alors qu'il s'agit d'un problème qui fait intervenir un grand nombre d'idées sur la lumière. L'arc-en-ciel est un formidable outil de médiation culturelle scientifique.

Conférence sur l'arc-de-cercle-en-ciel

En simultané des préparatifs orchestrés par le « metteur-en-ciel », la conférence donnée par Pierre Coulet a débuté dans l'amphi tout proche. Près de trois cents personnes sont venues écouter l'exposé magistral pour

passer du mythe à la réalité, de l'ignorance à la connaissance, voire de l'obscurantisme à la lumière. Aborder en pratiquement une heure tous les aspects touchant à l'arc-en-ciel, la chronologie des idées et la compréhension du phénomène à travers les âges relèvent de l'objectif pédagogique que nous nous sommes fixé. Et, sur cette question précisément, l'impressionnante iconographie et les simulations numériques qui illustrent abondamment le sujet permettent à chacun d'appréhender le phénomène dans sa globalité (voir pages précédentes les articles présentant de larges extraits de l'exposé).



Alors que les sapeurs-pompiers sollicités pour l'occasion se sont affairés à préparer le matériel, obéissant avec complaisance aux consignes de disposition et de mise en scène : tuyaux en sortie du réservoir, emplacement du camion et de la « queue de paon », optimisés pour assourdir les bruits de la motopompe et produire le mur d'eau en demi-lune, les derniers essais d'éclairage et de projection en « lumière du jour » s'achèvent.

Le spectacle scientifique : de la théorie à la pratique

La conférence touche à sa fin et la nuit est pratiquement stabilisée. Le public est convié à poursuivre la compréhension par la perception du phénomène longuement expliqué lors de l'exposé, et à rejoindre le site d'expérimentation.

Seul venu troubler le noir ambiant de l'obscurité le puissant projecteur qui envoie de mille feux un faisceau de lumière ponctuel dirigé vers la base de la queue de paon. « Que le spectacle commence ! ».

Au départ il ne se passe rien de surprenant. Chacun doit prendre place le long d'une ligne fictive symboliquement tracée par les gestes de l'animateur de circonstance. Devant soi, à sept mètres, un tuyau d'incendie est posé sur le sol, complété d'une courte lance au bout de laquelle en terminaison un dispositif appelé « queue de paon » est fixé afin de compléter le système. Puis l'ordre de mise en eau est donné. La pression et le liquide gonflent le tuyau et l'eau vient violemment percuter la plaque en sortie de lance. Rapidement le rideau d'eau en forme de demi-lune prend de la hauteur, pour atteindre les sept mètres attendus de rayon. Et soudain, l'arc-en-ciel apparaît. Il étincelle dans pratiquement tous les tons connus de celui

en plein jour. Et mieux encore pour ceux qui se sont approchés au plus près du météore de lumière, car ils peuvent en distinguer l'arc primaire, mais aussi le secondaire, situé plus haut, entre les deux arcs la bande grisée dite d'Alexandre et les surnuméraires, juste en dessous du primaire. Les autres, plus prudents, restent à bonne distance, à l'abri du mur d'eau pour encore quelques instants, car l'émerveillement et les acclamations des premiers sollicitent, interpellent, rassurent et attirent les seconds. Place à la magie lumineuse et colorée de l'éphémère arc-en-ciel ainsi artificiellement formé.



Et ce qui nous rend enthousiaste, à notre tour, c'est de constater avec quelle acuité chacun explique à son plus proche voisin les phénomènes rendus visibles ici, expérimentalement, et expliqués plus tôt en conférence. Les commentaires vont bon train, qu'il faut parfois compléter ou corriger en cours de séance. Les plus téméraires, ceux qui ne craignent pas la très légère bruine qui auréole le mur d'eau, peuvent apprécier l'ensemble des arcs, primaire, secondaire et surnuméraires, dans un cercle-en-ciel complet et parfait, d'une rareté et d'une beauté sans pareil, qui confond d'admiration le spectateur. Et tout autant remarquable, cette démonstration par l'exemple, de taille plus qu'humaine, qui est de pouvoir vérifier, de visu, que chaque observateur perçoit son propre arc-en-ciel, différent de celui de son voisin immédiat, ou d'une personne placée à deux ou trois mètres d'elle. En effet, la ligne imaginaire partant du centre du projecteur, symbole du Soleil, parallèle aux rayons lumineux, passant par les yeux de l'individu (qui prend ici tout son sens) et franchissant l'arc-en-ciel, perfore symboliquement ce dernier en son centre et se dirige vers le point « antisolaire », à l'infini. Donc lorsque le spectateur marche latéralement le long de ce mur d'eau, l'image de l'arc-en-ciel se déplace avec lui, selon la géométrie évoquée à l'instant.

Au bord du rideau d'eau, il ne peut voir qu'une faible partie de l'arc. C'est également la raison pour laquelle, dès qu'il se trouve proche de la queue de paon, à proximité du mur d'eau, cette ligne imaginaire butant sur le centre de l'arc-en-ciel monte à hauteur des yeux de l'individu, et permet de pratiquement visualiser le cercle-en-ciel dans son intégralité, bande sombre d'Alexandre et arc secondaire compris. Désormais une petite estrade est disposée centralement, juste au-devant du rideau d'eau, permettant

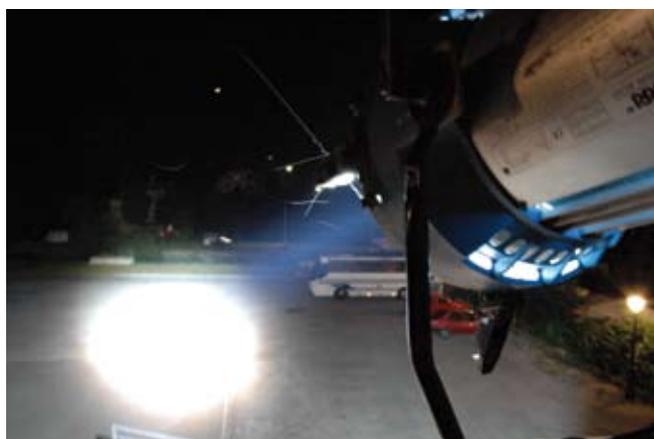
d'élever sensiblement la hauteur des yeux de chacun, à cet endroit, et distinguer sans effort la parfaite rotondité naturelle de l'arc-en-ciel.



Certains utilisent la fonction photo de leur mobile pour immortaliser l'événement, d'autres plus prévoyants, parfois couverts d'un imper, mitrillent de leur appareil photo (grand angle indispensable) l'objet de lumière qui se prête volontiers aux séances de poses. À cet égard, nous prévoyons d'organiser un concours (sans obligation d'achat !) de photographies d'arcs-en-ciel nocturnes, dont nous publierons sur le site Web de l'IRH (irh.unice.fr) les meilleurs clichés.

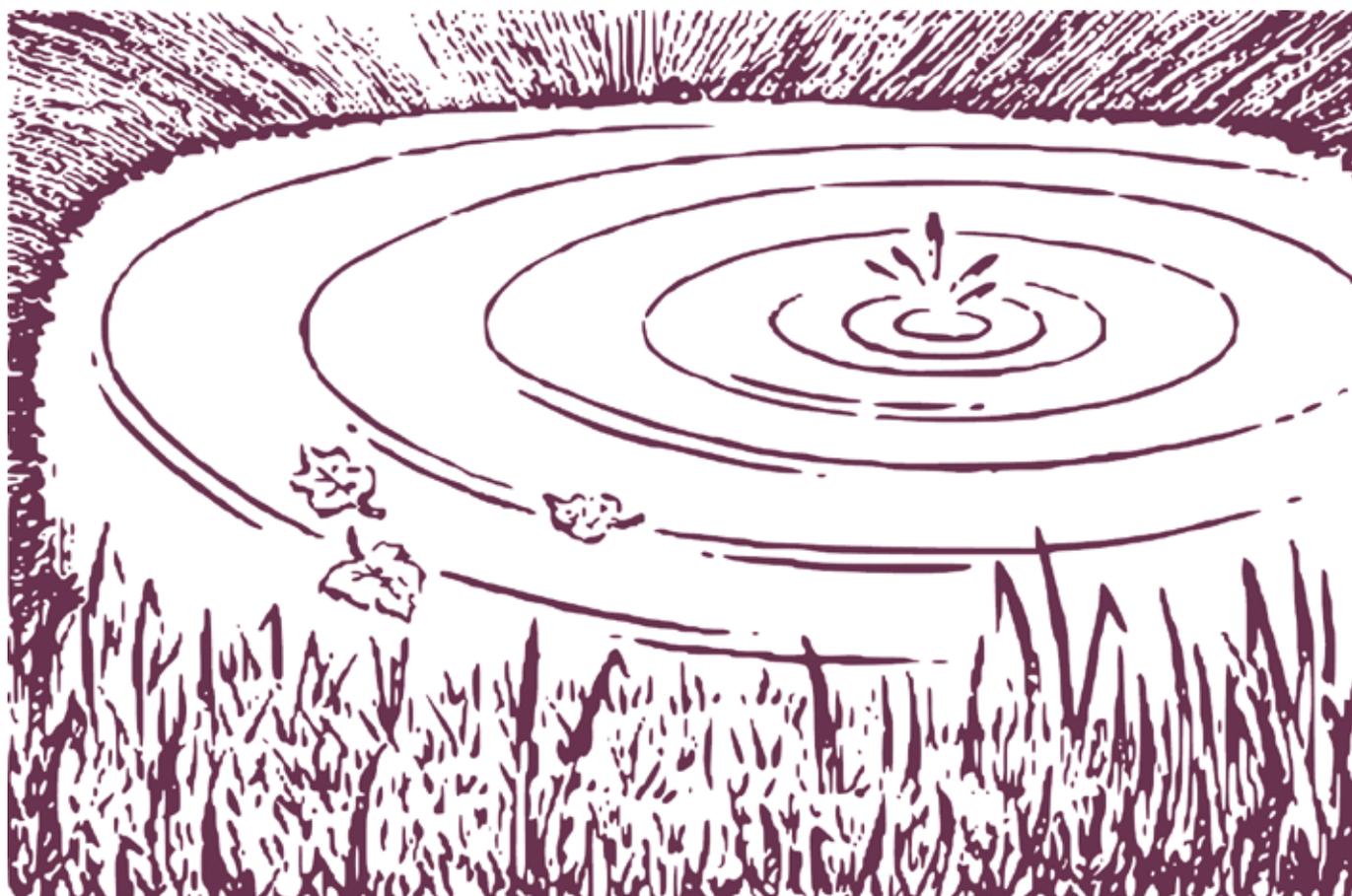
Pour clore le spectacle, une brusque fermeture de la vanne de pression fait tomber le mur d'eau, subitement, donnant au phénomène toujours visible une impression diaphane de légèreté par les gouttes les plus fines restées en suspension quelques courtes secondes. Puis l'arc-en-ciel s'évanouit, au gré de la gravitation, ajoutant une féerie supplémentaire et spectaculaire au final, sous les applaudissements du public conquis. □

NB : Les « Nuits de l'Arc-en-Ciel » ont reçu le soutien financier du Conseil général des Alpes-Maritimes



LES FRONTS D'ONDES

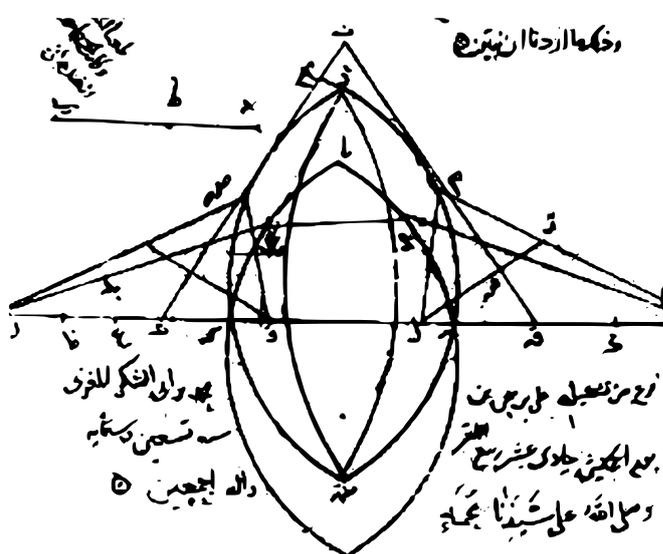
par Médéric Argentina



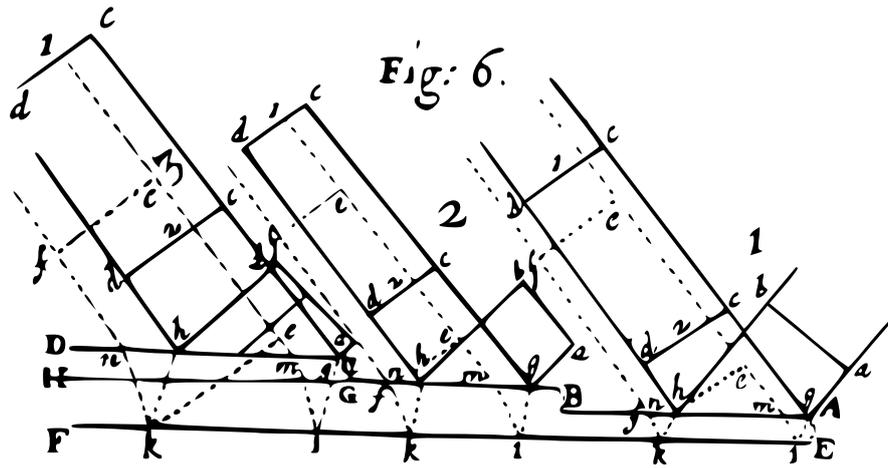
Quand un objet est lâché dans un récipient rempli de liquide, nous observons des déformations à la surface. Ces déformations prennent la forme de bosses - des petites vagues - quasiment circulaires dont le rayon croît avec le temps. Les physiciens nomment ce phénomène la propagation d'ondes. Par définition l'onde propage une perturbation. De surcroît, les ondes sonores véhiculent des perturbations de pression que l'appareil auditif enregistre. La lumière est également transportée par des ondes qui forment des variations de champs électriques et magnétiques. Ces ondes électromagnétiques en se propageant constituent les faisceaux lumineux.

Le concept d'onde est d'un intérêt général, car nous le rencontrons dans tous les domaines de la physique. Ce concept invite vers le questionnement concernant la propagation des ondes. Deux approches peuvent être adoptées : le point de vue du rayon lumineux, introduit par Euclide (325-265 AJC), qui se propage en ligne droite. Mais dont la direction de propagation peut changer lorsque le rayon se réfléchit sur un miroir, ou se diffracte lors de la traversée d'une interface séparant deux milieux différents. Descartes (1596 -1650) le mesurera quantitativement bien plus tard.

En fait, la loi de la diffraction sur une sphère est connue depuis le XIII^e siècle grâce à al-Farisi (1260-1320), qui fut inspiré par les très célèbres traités "éléments" d'Euclide.



Ce point de vue est largement décrit dans le magazine, mais notre article adoptera un autre point de vue : celui des surfaces d'ondes. Au lieu d'analyser la propagation de l'onde à l'aide des rayons, c'est la propagation de la déformation elle-même qui est exploitée. Pour revenir à l'exemple du caillou jeté dans un étang, la vague est la surface d'onde. Robert Hooke (1635-1703) sera le premier scientifique qui s'éloignera du point de vue d'Euclide.

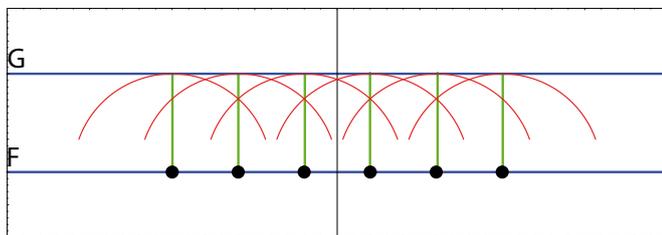


Dans son ouvrage « Micrographia », le physicien anglais dessine des surfaces d'ondes.

Le schéma ci-dessus représente la propagation et la réflexion d'une onde lumineuse sur une plaque en verre dont l'épaisseur prend la forme d'un escalier. Ainsi, le plan d'onde « ab » se trouve transformé en « cd » (dû à la première réflexion sur la lame de verre) et « ef » dessiné en pointillé lorsque l'onde passe au travers du verre.

Pour un rayon lumineux, les lois de la propagation sont bien connues à l'époque de Hooke, par contre les lois de propagation des surfaces d'ondes ne seront découvertes qu'avec Christian Huygens (1629-1695), fortement inspiré des travaux de Hooke.

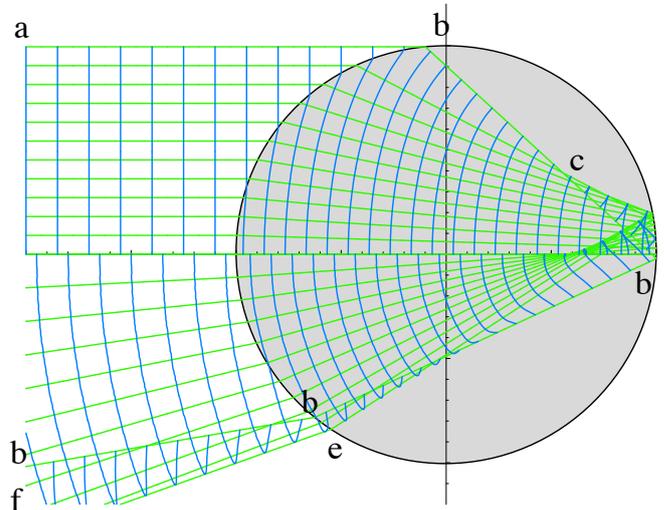
Dans « le traité de la lumière », en 1678, Huygens énonce la loi de propagation des surfaces d'ondes. Chaque point (représenté avec un disque noir) de la surface d'onde (courbe bleue labellisée F), se comporte comme une source et émet une nouvelle surface d'onde de forme circulaire ou sphérique qui se propage (les cercles rouges). La superposition de ces cercles reconstruit une nouvelle surface d'onde (la courbe bleue G).



Les rayons lumineux correspondant sont représentés en vert. Lorsque ce processus est itéré, le front d'onde avance. Cette approche permet de comprendre la formation d'un arc-en-ciel. En utilisant la loi de Huygens, nous avons propagé un front d'onde au travers d'une goutte d'eau sphérique et nous traçons le résultat sur la figure suivante.

Dans cette figure, les plans d'ondes sont représentés en bleu et les rayons lumineux en vert. Initialement,

le front d'onde plat, se trouve sur le segment aA, se propage vers la droite, et se déforme lors de la rentrée dans la goutte, puis se produit une réflexion sur la face arrière de la goutte, et une sortie du plan d'onde de la goutte. On constate que les rayons lumineux se trouvent concentrés dans une direction particulière qui correspond au calcul des trajectoires des rayons lumineux de Descartes. Ainsi, l'observateur qui regarde dans cette direction remarquera une sur-intensité lumineuse, c'est-à-dire une caustique. En raison de la sphéricité de la goutte c'est plutôt un cône lumineux qui sera créé. C'est la présence d'une constellation de gouttes renvoyant vers la source lumineuse une multitude de cônes lumineux qui est responsable de l'apparition de ce magnifique phénomène qu'est l'arc-en-ciel.



Nous observons alors la formation d'un *cusps*, c'est-à-dire un repliement du front d'onde en forme de la lettre v. L'intensité se trouve donc concentrée dans cette zone.

L'approche ondulatoire de Huygens permet aussi de comprendre l'existence de surnuméraires. Le front d'onde dédoublé en v pourrait être aussi obtenu avec deux sources ponctuelles, ce qui explique la formation d'arc surnuméraires, superbe manifestation du phénomène d'interférence. □

