

L'arc-en-ciel : observations et expériences

par R. JOUANISSON
63540 Romagnat

RÉSUMÉ

Après un rappel historique des données ayant conduit à l'élaboration d'une théorie de l'arc-en-ciel, l'auteur sélectionne un ensemble d'observations et d'expériences réalisables avec le matériel en général disponible dans les collections des laboratoires de physique des lycées et collèges.

HISTORIQUE SOMMAIRE

On n'en finit pas avec l'arc-en-ciel. Ce phénomène naturel exceptionnel qui a captivé les hommes depuis toujours, au point que toutes les civilisations lui ont conféré de nombreux symbolismes, n'a été élucidé sur le plan scientifique que très lentement. Et d'ailleurs, est-on sûr qu'il le soit totalement aujourd'hui ?

Aristote avait remarqué que l'arc, manifestement dû à l'action des nuages sur la lumière solaire, était un phénomène subjectif, sans localisation précise dans le ciel. Dix-sept siècles plus tard on n'était pas beaucoup plus avancé lorsque, en 1304, le moine allemand Théodoric de FREIBERG montra le rôle joué par les gouttes de pluie approximativement sphériques. A l'aide d'un ballon de verre rempli d'eau, FREIBERG mit en évidence la trajectoire des rayons lumineux qui contribuent à la formation de l'arc. On remarquera, à ce sujet, que l'expérimentation scientifique était déjà devenue, grâce à F. BACON notamment, une méthode de recherche prometteuse.

Au XVII^e siècle, DESCARTES reprit les expériences de FREIBERG et fit faire un bond décisif à la théorie du phénomène (1637) [1] en justifiant l'existence des arcs primaire et secondaire par l'application des lois de la réflexion et de la réfraction. Les travaux de NEWTON sur la dispersion permirent de parachever l'édifice théorique rendant compte de l'essentiel des phénomènes observés.

Une difficulté demeurait cependant. Comment expliquer les arcs « surnuméraires » que l'on observe parfois au-dessous de l'arc primaire et, beaucoup plus rarement, (car l'arc secondaire a une faible luminosité) au-dessus de l'arc secondaire ? Ce fut YOUNG qui apporta une première réponse au début du XIX^e siècle en appliquant la théorie des

interférences. Un peu plus tard AIRY montra le rôle de la diffraction. Une théorie plus élaborée devait tenir compte aussi de la dimension des gouttes et de la polarisation de la lumière.

Des développements plus récents, s'appuyant sur les travaux de G. WATSON et H. POINCARÉ, ont permis d'affiner une théorie faisant intervenir le moment cinétique des photons dans les gouttes [4].

Ce rappel sommaire, qui se borne aux aspects scientifiques, a pour but de mettre en évidence la complexité du phénomène qui fait intervenir de nombreux paramètres (et dont certains ne sont pas toujours pris en compte dans les différentes modélisations proposées). L'arc-en-ciel constitue cependant un excellent sujet d'études et d'observations à divers niveaux de connaissances.

Les résultats théoriques essentiels, supposés connus du lecteur, sont sommairement rappelés ici. Pour plus de précisions, on pourra consulter les ouvrages cités en référence [2], [3], [4].

Mon objectif se limite à présenter et à critiquer un certain nombre d'observations et d'expériences (relativement faciles à réaliser avec les moyens usuels dont disposent nos collègues des lycées et collèges). J'ai en effet remarqué que les différents articles traitant de l'arc-en-ciel se cantonnent prudemment, en général, dans des considérations théoriques sans fournir de description précise d'expérience susceptible d'éveiller l'intérêt de nos jeunes. Il arrive même que certaines expériences suggérées et présentées comme des modélisations soient fautives ...

1. RAPPEL DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

A l'aide du modèle classique simplifié (gouttes sphériques et rayons solaires parallèles) on aboutit aux résultats suivants : (voir par exemple [3], [4], [6]).

Un rayon incident SI de lumière blanche rencontre la sphère d'eau (de centre O et rayon R) sous un angle d'incidence i (on utilise aussi la hauteur d'incidence $h = R \sin i$). Le plan d'incidence est défini par (SI, OI). D'après la première loi de DESCARTES, tous les rayons réfléchis tels que IR', JR'', KR''', etc., et tous les rayons réfractés tels que IR₁, JR₂, KR₃, etc., restent dans le plan diamétral qu'on a pris comme plan de figure. (Figure 1).

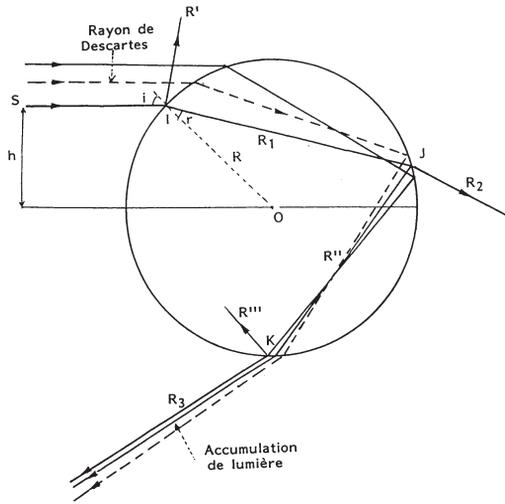


Figure 1

Arc primaire

Il correspond à la lumière qui a subi une réfraction en I_1 , une réflexion (partielle) en J_1 et une réfraction en K_1 . Seule une faible partie de la lumière incidente est concernée (4,6 %) mais, par suite des propriétés du minimum de déviation (voir les notes annexes), il y a accumulation de cette lumière dans une direction faisant un angle de 42° avec la direction du point antisolaire.

De plus, à cause de la dispersion (la constringence de l'eau vaut $v = 56$) ce minimum varie d'environ 2° d'une extrémité à l'autre du spectre visible, ce qui assure à l'œil une visibilité confortable du spectre observé.

L'angle d'incidence pour lequel on observe la déviation minimale (pour la radiation moyenne du spectre) vaut $i_1 = 59^\circ$ (hauteur d'incidence $h = 0,86 R$). Le rayon correspondant est appelé «rayon de Descartes». [voir figures 1 et 2a].

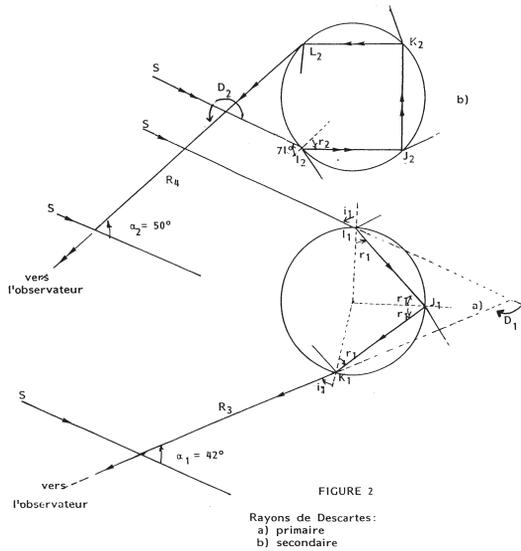


Figure 2

Arc secondaire

Il correspond à la lumière qui a subi deux réflexions (en J_2 et K_2) avant d'émerger selon L_2R_4 et ne transporte que 2 % environ de l'énergie incidente. Le minimum de déviation pour la radiation moyenne du spectre vaut dans ce cas 50° . L'incident correspondant est obtenu pour $i_2 = 72^\circ$ ($h \approx 0,95 R$).

On notera qu'il est assez différent de celui pour lequel on obtient l'arc primaire.

L'arc secondaire est plus étalé ($3,5^\circ$ environ) que l'arc primaire et beaucoup moins lumineux. L'ordre des couleurs est inversé par rapport à l'arc primaire (voir figure 2b, figure 3 ainsi que les courbes donnant $D = f(i)$ en annexe, sur la figure 13).

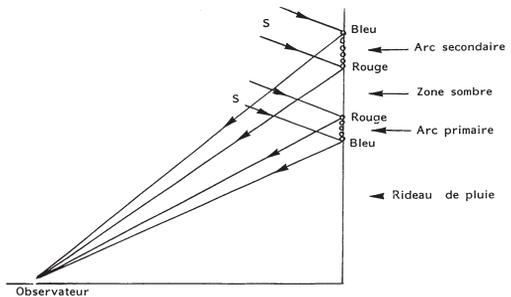


Figure 3

Espace sombre d'Alexandre

Entre les deux arcs on remarque que le fond du ciel est plus sombre (photo n° I). En effet, pour des angles supérieurs à 42° (arc primaire) et inférieurs à 50° (arc secondaire) il n'y a pas de lumière réfléchie pour les parcours étudiés précédemment. En revanche, d'autres types de réflexions sont possibles, comme par exemple la lumière réfléchie sur la face d'entrée de la goutte. (voir les graphes en annexe).

Arcs surnuméraires

Au-dessous de l'arc primaire et (plus rarement) au-dessus de l'arc secondaire, on observe parfois des arcs supplémentaires, faiblement colorés en vert et pourpre. La théorie simple élaborée par Descartes et Newton, et qui ne fait appel qu'à l'optique géométrique, est inopérante pour expliquer ces arcs surnuméraires. De plus, cette théorie ne permet pas d'expliquer les différences d'aspect de l'arc que l'on observe selon la taille des gouttes.

La théorie élaborée par YOUNG (1803) fait appel à la nature ondulatoire de la lumière. Dans cette théorie, le minimum de déviation joue encore un rôle prépondérant : pour une direction d'émergence donnée (correspondant à une déviation supérieure au minimum), il existe deux trajets différents des rayons dans la goutte ; au minimum de déviation ces deux trajets sont confondus avec le rayon de DESCARTES, donc la différence de marche δ entre eux est nulle.

En variant un peu la direction d'émergence, de façon que la déviation s'écarte de son extremum D_m , on obtient des valeurs de δ croissant d'abord lentement ; quand $\delta = \frac{\lambda}{2}$ on observe une frange noire ; pour $\delta = \lambda$, on observe à nouveau une frange brillante, mais, moins lumineuse que la frange d'ordre zéro car celle-ci coïncide avec l'accumulation de lumière, etc.

A chaque longueur d'onde correspond un système de franges décalé (car le minimum de déviation dépend de l'indice de réfraction). La séparation des couleurs dépend de la largeur des franges et celles-ci sont plus fines avec de grosses gouttes.

L'ensemble des franges d'ordre zéro est à la base de la formation de l'arc primaire (figure 4). Or, l'aspect que prend l'arc dépend au moins de deux autres facteurs : la sensibilité de l'œil aux diverses couleurs et la dispersion non uniforme de la lumière par les gouttes.

– l'œil présente un maximum de sensibilité pour le vert moyen, qui correspond au maximum d'énergie émise par le spectre solaire : d'où l'importance du vert dans l'arc.

– d'autre part, dans un intervalle spectral de largeur $d\lambda$ donnée, la déviation extrême D_m est plus dispersée dans le violet que dans le rouge, d'où le renforcement de cette dernière couleur.

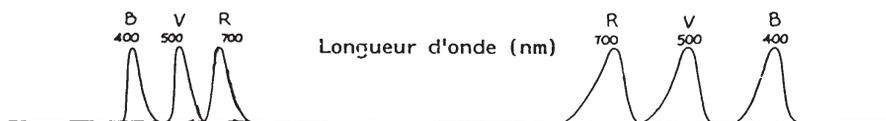


Figure 4

En lumière blanche on ne voit que très peu d'arcs surnuméraires (ordres 1,2,3,...) car les systèmes de franges des différentes longueurs d'onde se détruisent rapidement quand l'ordre d'interférence atteint quelques unités (le brouillage est encore plus efficace si les gouttes ont des diamètres très différents) : on obtient alors un «blanc d'ordre supérieur».

La présence des arcs pâles, alternativement verts et roses, comme les teintes de NEWTON proches du blanc d'ordre supérieur (photo II), s'explique alors par la prédominance de la sensibilité au vert : si le vert est présent dans une cannelure claire, on a une frange brillante verdâtre lavée de blanc, mais si le vert est absent, on a une frange plus sombre de la couleur complémentaire, pourpre, lavée de blanc.

En réalité il n'y a pas décroissance brutale de l'intensité lumineuse du côté de la bande sombre comme le prévoit la théorie de YOUNG à cause de la diffraction (théorie d'AIRY), et comme le montrent la figure 5 et les photographies (VII) et (VIII) prises en lumière monochromatique. En effet, au minimum de déviation, d'après l'optique géométrique, il y a cessation brusque de la lumière. Or, ce dispositif se comporte comme le bord d'un écran qui diffracte et envoie de la lumière dans l'ombre géométrique.

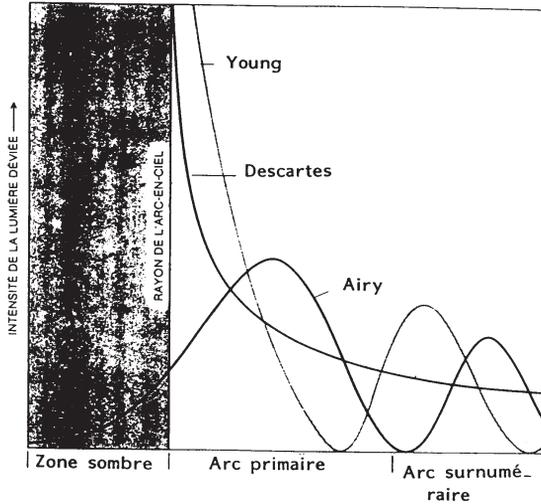


Figure 5

Polarisation de la lumière réfléchi

La lumière des arcs ayant subi une ou deux réflexions vitreuses est partiellement polarisée rectilignement et perpendiculairement aux plans d'incidence respectifs de chaque goutte, c'est-à-dire tangentiellment aux arcs.

Dans le cas de l'arc primaire, le minimum de déviation a lieu pour un angle $i_1 = 59^\circ$, soit $r_1 = 40^\circ$. L'angle de BREWSTER correspondant au passage du milieu d'indice n au milieu d'indice 1 est donné par :

$$\tan r_B = \frac{1}{n}$$

soit :

$$r_B = 37^\circ \text{ (figure 6)}$$

c'est-à-dire très voisin de l'angle r_1 du rayon de DESCARTES. Le taux de polarisation est donc très élevé (0,9). (Ce taux est en réalité un peu inférieur, car dans la direction de l'arc, on observe aussi de la lumière ayant subi des trajets différents).

par conséquent un arc peu coloré. N'oubliez pas de vous placer correctement par rapport au soleil et, de préférence, face à un fond sombre. Avec un tel arc artificiel, on pourra :

- observer un arc-en-ciel en forme de cercle complet (s'arranger pour obtenir un rideau de pluie au-dessous de la ligne d'horizon) ;
- Vérifier que l'arc n'est pas localisé, on l'observe dans une direction donnée ; il se déplace avec l'observateur.
- Voir simultanément deux arcs qui se croisent (un pour chaque œil) si les gouttes sont très proches des yeux (fermer alternativement un œil puis l'autre).
- Remarquer également que l'aspect de l'arc et la présence éventuelle de l'arc secondaire et des arcs surnuméraires dépendent de la position de l'observateur (en fait de la dimension des gouttes d'eau) (photo III).

b) On peut voir à l'Exploratorium de San Francisco un dispositif constitué de deux plaques de verre (dimensions : 60×110 cm) entre lesquelles on a réparti une couche de billes de verre de 3 mm de diamètre. A l'aide d'une lampe fournissant un faisceau parallèle l'observateur peut voir des courbes colorées en forme d'arc.

2. Étude du spectre d'une goutte d'eau

Comme modèle d'arc-en-ciel on trouve fréquemment décrite l'expérience du ballon d'eau qu'on éclaire avec un faisceau grossièrement parallèle de lumière blanche. C'est à partir de cette expérience que FREIBERG, puis DESCARTES, ont établi une théorie de l'arc-en-ciel.

Il n'est pas inutile de préciser que cette expérience, comme on va le voir ci-dessous, ne constitue pas une représentation de l'arc-en-ciel mais qu'elle ne fait que matérialiser le spectre de la goutte qui, par raison de symétrie, est situé sur un cône ayant pour axe le rayon passant par le centre de la sphère (figure 7). Le fait que les deux phénomènes se présentent sous le même aspect ne devrait pas nous autoriser à les confondre !

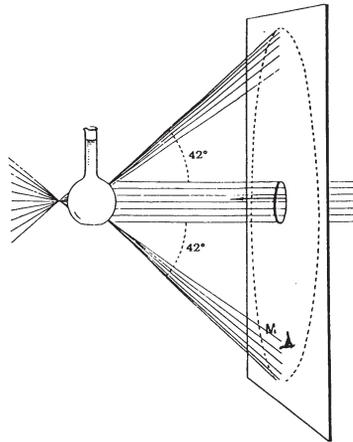


Figure 7

L'étude préalable du spectre d'une goutte est indispensable pour la compréhension de l'arc-en-ciel. On obtient des résultats satisfaisants en utilisant le matériel suivant :

- comme modèle de goutte : un ballon à fond rond aussi sphérique que possible (par exemple un ballon de 250 ml). Il existe également des ampoules pour appareils de projection anciens qu'on peut aménager (certains sont même munis d'un miroir réfléchissant). A défaut, on utilisera un récipient cylindrique (bécher ou bouteille de fabrication soignée) mais on ne pourra dans ce cas faire l'étude expérimentale que dans un plan normal à l'axe du cylindre.
- comme source de lumière : un projecteur de diapositives avec lequel on obtiendra des faisceaux de largeur convenable en projetant des diapositives opaques dans lesquelles on a percé des ouvertures circulaires (on peut aussi utiliser une plaque d'aluminium de 5×5 cm de côté dans laquelle on a percé une ouverture à l'aide d'un foret). Avec une ouverture de 2 mm, on obtiendra un faisceau «explorateur» utilisable à un ou deux mètres de l'objectif ; avec une ouverture de 8 à 10 mm, le faisceau couvrira tout le ballon.
- pour les observations : installer un écran blanc rigide percé d'une ouverture de même diamètre que le ballon (figure 7). Se munir d'un petit écran pour intercepter le faisceau.

On peut alors réaliser les expériences suivantes :

a) Le faisceau étroit (à peu près parallèle), de un à deux centimètres de large est centré sur le ballon rempli d'eau et débarrassé des bulles d'air éventuelles. Ce ballon est monté sur un support de manière à pouvoir être déplacé facilement. Si l'on veut matérialiser le trajet de la lumière dans la sphère, on ajoute une ou deux gouttes de lait ou des traces de fluorescéine. Mais, si l'on veut montrer un beau spectre, il est indispensable que l'eau soit exempte d'éléments diffusants.

Pour centrer le faisceau sur la sphère, on repère les faisceaux réfléchis par la face avant et la face arrière sur l'écran : ces images doivent être concentriques. On notera que le faisceau transmis par la goutte est beaucoup plus intense et ne participe pas à la formation de l'arc-en-ciel.

Translater alors le ballon dans un plan horizontal par exemple. Les deux faisceaux réfléchis se séparent et, pour une hauteur d'incidence h voisine de $0,86 R$, on voit apparaître un petit spectre situé dans le plan d'incidence défini par la position initiale. Si le projecteur est suffisamment puissant, on verra simultanément un deuxième spectre, situé sur l'écran, dans une direction diamétralement opposée au précédent (il faudra utiliser pour cela une hauteur d'incidence comprise entre $0,85 R$ et $0,95 R$; vérifier que ce spectre correspond à de la lumière ayant subi deux réflexions. En plaçant un doigt mouillé (qui atténue le faisceau réfléchi) au point B, on fait disparaître les spectres (figure 8).

On notera également que si l'on déplace le ballon dans une direction quelconque, ces deux spectres restent toujours dans des directions diamétralement opposées, c'est-à-dire dans un plan défini par la direction du faisceau et la normale au point d'incidence (conséquence de la première loi de DESCARTES).

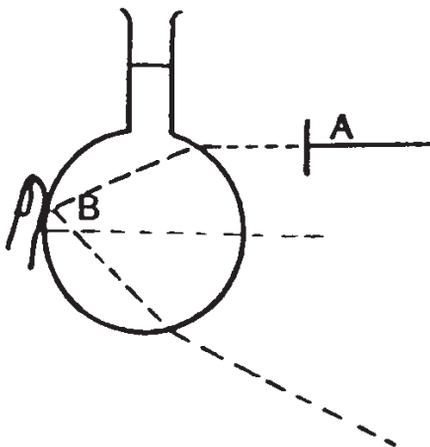


Figure 8

b) Utiliser le faisceau large couvrant toute la sphère : on observe le spectre primaire circulaire centré sur l'axe du faisceau (et si la source est suffisamment puissante, un spectre secondaire).

Les couleurs sont ordonnées

comme l'indique la figure 3. On peut évaluer grossièrement les angles formés par l'axe du faisceau avec les directions des arcs.

c) Vérifier que la lumière qui se propage en direction du spectre est polarisée (voir plus loin). Attention, si on observe la lumière du spectre diffusée par l'écran, la polarisation a pratiquement disparu (dépolariation par diffusion).

d) Pour faire comprendre maintenant la relation qui existe entre les spectres circulaires qu'on vient de matérialiser sur un écran et qu'on peut voir de n'importe quelle position, et l'arc-en-ciel réel, tel qu'un observateur le voit dans le ciel dans une direction donnée, on peut imaginer que cet observateur soit placé dans le plan de l'écran et regarde le ballon (la goutte), adossé à la source de lumière. Même s'il est situé en un point M du spectre, il ne voit, compte tenu des performances de sa pupille, qu'un tout petit morceau de cercle coloré, rien de plus ! (voir figure 7). Cependant, il peut recevoir aussi, en ce point, de la lumière colorée provenant d'une autre goutte située dans l'espace, de telle façon que l'angle formé par le rayon incident avec le rayon émergent soit le même que précédemment. Or, l'ensemble des gouttes qui ont cette propriété, se trouve sur un cône ayant pour axe le rayon incident passant par l'observateur et pour demi-angle au sommet, l'angle correspondant au cercle coloré observé. L'arc est donc différent pour chaque observateur (il peut être différent pour les deux yeux du même observateur, voir plus loin) et il dépend de sa position. C'est le grand nombre de gouttes qui entrent en jeu qui permet de voir un phénomène continu. Ce ne sont pas les mêmes gouttes

qui peuvent donner l'arc primaire et l'arc secondaire, ni les mêmes gouttes qui peuvent donner les arcs rouges et les arcs bleus (figure 3).

Une conséquence qui peut surprendre à première vue est que, si l'on observe un arc visible par réflexion à la surface de l'eau, cet arc est différent de celui que l'œil voit au même moment dans le ciel (voir figure 9). On s'en rend compte par exemple en repérant la position des arcs par rapport à un nuage.

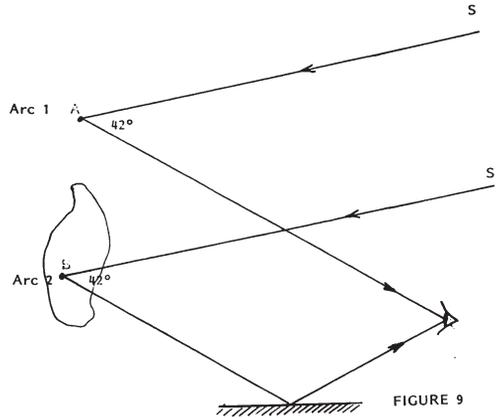


Figure 9

Une autre conséquence est que l'on ne peut voir un arc de profil ! Ainsi, la figure 10 extraite du traité de DESCARTES est fautive. On ne manquera pas de noter que la même figure recèle une autre erreur : on y voit en effet que la même goutte participe à la formation des arcs primaire et secondaire !

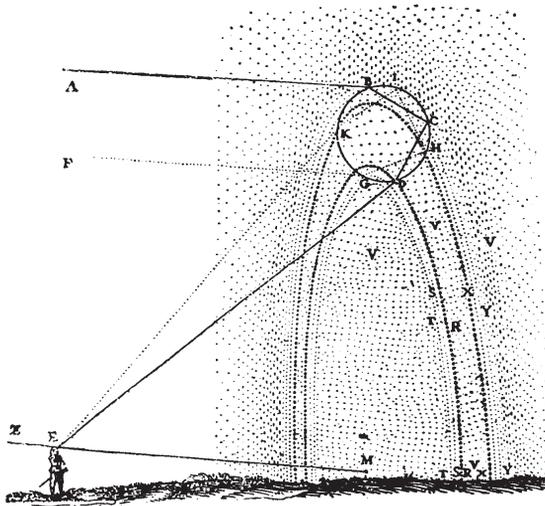


Figure 10

Pour terminer ce chapitre, un conseil : abstenez-vous de rechercher des trésors, comme on l'a cru longtemps possible, au pied des arcs, vous risqueriez des déplacements longs et inutiles ! ...

3. Autres expériences permettant de réaliser un spectre circulaire

A défaut de pouvoir projeter un véritable arc-en-ciel visible par plusieurs personnes simultanément -ce qui est impossible, comme on vient de le voir- on montrera un beau spectre circulaire, où les couleurs sont réparties comme dans l'arc primaire en utilisant, par exemple, les propriétés dispersives d'un système optique convergent.

a) Condenseur de rétroprojecteur

Découper soigneusement dans un support opaque un espace annulaire de grand diamètre (20 cm) et de faible largeur (3 ou 4 mm). Centrer l'anneau sur la platine du rétroprojecteur et faire son image sur un écran : cette image est blanche. Éloigner alors l'objectif de projection, de manière que la mise au point se fasse dans un plan situé au-dessus de la platine : on observe sur l'écran des anneaux colorés avec le rouge à l'extérieur et le bleu à l'intérieur. Le spectre est d'autant plus pur que l'espace annulaire est plus étroit. En fait, on a mis en évidence l'aberration chromatique du système condenseur du projecteur.

b) une variante du système précédent est obtenue avec une lentille convergente de grande ouverture. Utiliser par exemple une lentille plan-convexe ($f = 20$ cm, $D = 12$ cm) avec laquelle on réalise l'image d'une très petite ouverture circulaire (un ou deux millimètres de diamètre)... sur laquelle on focalise la lumière d'un projecteur de diapositives dont on a retiré l'objectif. La lentille est recouverte d'un écran dans lequel on a découpé un espace annulaire de faible largeur et de grand diamètre. Plus la largeur de l'anneau sera faible (un ou deux millimètres par exemple), meilleure sera l'image. Plus le diamètre de l'anneau sera grand, plus grande sera la dispersion mais un trop grand diamètre peut introduire une aberration de sphéricité gênante si la largeur de l'anneau n'est pas très petite : un compromis sera trouvé. Dans tous les cas, on améliorera la qualité de l'image en utilisant la lentille dans les conditions qui se rapprochent le plus du minimum de déviation (voir figure 11). Par exemple, la lentille sera placée à un mètre du trou vivement éclairé et de manière qu'elle soit couverte entièrement par le faisceau incident (non coloré), la face bombée tournée vers la source.

On observe le spectre, sur un dépoli, dans un plan normal à l'axe du système. On peut photographier ce spectre sur le dépoli.

Si on veut projeter le spectre, on retire le dépoli et on place à la suite un objectif de projection (une simple lentille suffit) de manière à faire l'image de ce spectre sur un

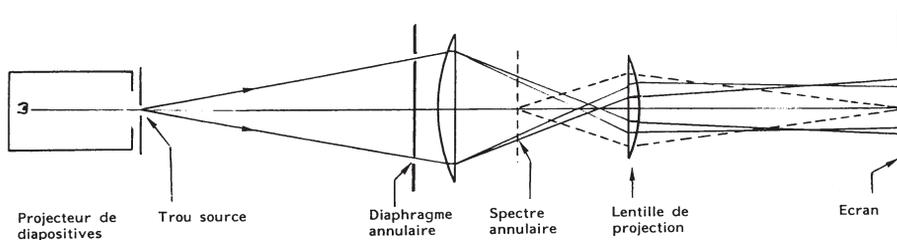


Figure 11

écran. Pour avoir plus de lumière, on sera contraint de prendre une ouverture un peu plus grande. Comme dans l'expérience précédente, on met en fait en évidence l'aberration chromatique de la lentille utilisée. Cette expérience est plus délicate à mettre en œuvre mais elle permet d'obtenir des images de meilleure qualité (voir photo IV).

4. Polarisation de l'arc-en-ciel

L'analyseur le plus commode est un morceau de Polaroid. Repérer sa direction de polarisation (en utilisant par exemple la lumière réfléchiée par une flaque d'eau). Observer la lumière provenant de l'arc à travers le Polaroid et orienter celui-ci de manière à obtenir un minimum de lumière. La polarisation au sommet de l'arc est horizontale (normale au plan d'incidence de la lumière sur les gouttes). Pour éteindre successivement les différentes régions de l'arc, il faut tourner progressivement le Polaroid. Observer simultanément l'arc primaire et l'arc secondaire : le minimum de lumière est plus accusé pour l'arc primaire, ce qui s'explique par le fait que le degré de polarisation (rectiligne) est plus élevé. Examiner le reste du ciel : on constate une faible polarisation, surtout au voisinage de l'arc primaire, sauf dans la bande obscure d'Alexandre (pas de lumière réfléchiée).

NB : un coin de ciel bleu montre également une polarisation mais celle-ci est due à la diffusion de la lumière par les molécules gazeuses. Cette polarisation est théoriquement parfaite et rectiligne pour les portions de ciel situées à 90° de la direction du soleil.

A défaut de Polaroid, on peut utiliser un morceau de verre (polarisation par réflexion) qui joue le rôle d'analyseur. Prendre un verre teinté dans la masse, de manière à ne pas être gêné par des images par transmission. On rappelle que la lumière à analyser doit faire un angle de 57° (angle de BREWSTER pour le verre) avec la normale au miroir.

5. Expériences utilisant le faisceau laser

Le laser est utilisé ici pour la finesse du pinceau (ce qui permet de matérialiser des rayons lumineux) et son intensité (on peut observer par exemple un grand nombre de réflexions à l'intérieur d'une goutte).

Le laser permet également, grâce à la cohérence de la lumière, de mettre en évidence les phénomènes d'interférences et de diffraction qui expliquent la présence des arcs surnuméraires.

a) Dans le premier cas, on a réalisé l'expérience dans un récipient cylindrique en verre (ce peut être un bécher) contenant de l'eau avec des traces de produit diffusant (une ou deux gouttes de lait écrémé, par exemple). Veiller à la qualité de la paroi de verre et à l'absence de bulles gazeuses. La photographie V montre qu'il est possible de voir 7 ou 8 réflexions successives.

La photo VI a été obtenue en utilisant un cylindre de plexiglas diffusant de 4 cm de diamètre. On a réalisé un faisceau laser plan vertical (à l'aide d'une lentille cylindrique : un morceau de baguette de verre). L'intersection de ce faisceau avec le plan diffusant horizontal sur lequel repose le cylindre permet de matérialiser le parcours de la lumière à l'extérieur du cylindre. On pourrait également placer le cylindre dans une enceinte rendue diffusante par de la fumée.

b) Pour simuler l'existence des arcs surnuméraires :

On observe le faisceau laser réfléchi par une goutte d'eau aussi sphérique que possible, dans les conditions qui permettent d'obtenir le spectre du 1^{er} ordre.

On réalise des gouttes approximativement sphériques en utilisant une seringue maintenue verticalement et dont le bout a été meulé perpendiculairement à l'axe de manière que la goutte adhère à un support bien circulaire et horizontal.

En appuyant avec précaution sur le piston on modifie le diamètre de la goutte (de l'ordre du mm), le faisceau laser est placé dans un plan diamétral horizontal (figure 12). On observe alors, pour l'incidence convenable, un beau système de franges courbes dont la première, plus large, correspond à l'arc-en-ciel, les autres constituant les arcs

surnuméraires. Le nombre de franges diminue (car l'interfrange augmente) lorsque la goutte diminue de volume par évaporation (voir photo VII).

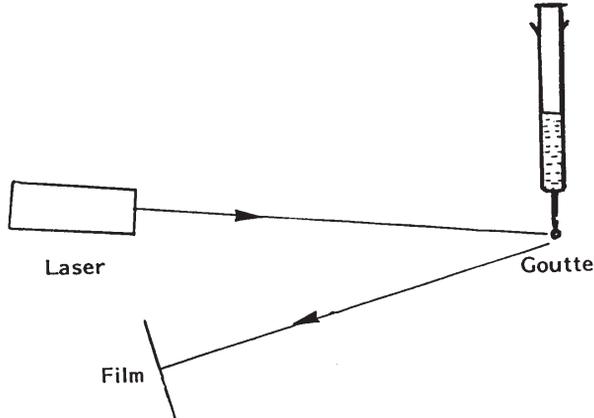


Figure 12

Avec un faisceau laser couvrant toute la goutte (élargir, si nécessaire, le faisceau à l'aide d'une lentille) on pourra obtenir simultanément deux systèmes de franges séparés par un espace sombre : ce sont les arcs qui sont à la base de la formation des arcs primaire et secondaire séparés par la zone sombre d'Alexandre. On remarquera qu'il n'y a pas décroissance brutale de la lumière entre les deux arcs, comme le prévoient les théories modernes (photo VIII).

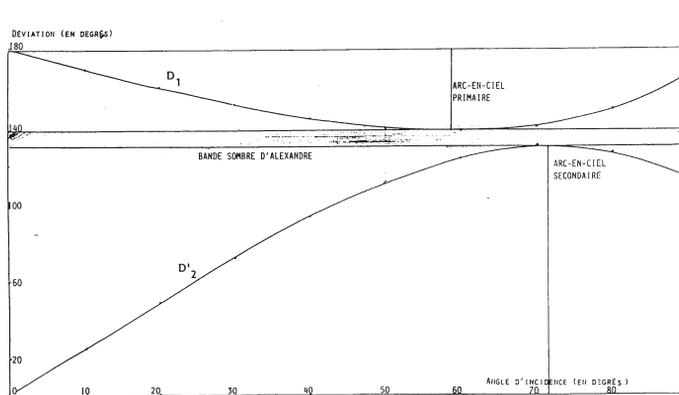


Figure 13

Annexes

1. Étude de la déviation en fonction de l'angle d'incidence

Les figures 2 et 2 bis montrent que la déviation vaut :

$$D_1 = 180^\circ + 2i_1 - 4r_1 \quad \text{pour l'arc primaire}$$

$$D_2 = 360^\circ + 2i_2 - 6r_2 \quad \text{pour l'arc secondaire}$$

$$= 2i_2 - 6r_2 \quad (\text{mod. } 360^\circ)$$

On calcule ces déviations pour la valeur moyenne de l'indice $n = 1,33$ l'angle r est calculé à partir de $\sin r = \frac{\sin i}{n}$.

On trace alors les courbes donnant D_1 et $D'_2 = -D_2$

i°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
r°	0	7,5	14,9	22,1	28,9	35,2	40,6	45,0	47,8	48,8
D_1°	180	170	160,4	151,6	144,4	139,3	137,6	140,2	148,9	165
D'_2°	0	25	49,4	72,6	93,4	111,2	123,6	130	126,8	112,8

Les valeurs des extremums calculés, à partir de $\frac{dD}{di} = 0$, correspondent à :

$$\text{arc primaire : } \cos^2 i_1 = \frac{n^2 - 1}{3} \quad \text{soit } i_1 = 59,6^\circ \quad D_1 = 138^\circ \quad \text{soit } \alpha_1 = 42^\circ$$

$$\text{arc primaire : } \cos^2 i_2 = \frac{n^2 - 1}{8} \quad \text{soit } i_2 = 71,9^\circ \quad D'_2 = 130^\circ \quad \text{soit } \alpha_2 = 50^\circ$$

A l'aide des courbes $D = f(i)$ on vérifie par exemple qu'une variation de la déviation de 2° au voisinage du minimum de déviation correspond à une variation de l'angle d'incidence de 25° environ, ce qui explique la concentration de lumière au voisinage de ce minimum.

2. Arc rouge, arc blanc et spectre de BROCKEN

Lorsque le soleil est juste à l'horizon, l'arc a la forme d'une demi-circonférence et c'est l'arc bleu qui disparaît le premier. Avant de disparaître complètement avec le soleil, l'arc est rouge (cette situation peut se prolonger pendant quelques minutes).

A noter que le phénomène est dû au fait que le soleil couchant est appauvri en radiations de courte longueur d'onde par suite des phénomènes de diffusion de l'atmosphère.

Lorsque les gouttelettes de pluie deviennent très petites, la théorie de DESCARTES ne permet plus d'expliquer les phénomènes. Il faut faire appel à la diffraction : la dimension des gouttes intervient. De plus, on ne peut plus négliger l'angle sous lequel on voit le soleil. Les différents aspects de l'arc varient comme il est indiqué dans le tableau suivant (d'après M.G.J. MINNAERT [5]). En particulier, lorsque les gouttes ont un diamètre de l'ordre de 0,06 mm, on observe un arc blanc (ce phénomène est rare).

Diamètre des gouttes	Aspect de l'arc-en-ciel
1 à 2 mm	Le rouge est pur, le violet et le vert vifs, peu de bleu. Plusieurs arcs surnuméraires (4 ou 5) (pourpre - vert).
0,5 mm	Le rouge est très affaibli. Quelques arcs surnuméraires.
0,2 à 0,3 mm	Le rouge disparaît. L'arc est large et bien développé. Les arcs surnuméraires deviennent de plus en plus jaunes.
0,08 à 0,1 mm	L'arc est plus large et plus pâle ; seul le violet est vif. Le premier arc surnuméraire est bien séparé de l'arc primaire.
0,06 mm	L'arc primaire fait apparaître une bande blanche séparée.
< 0,05 mm	On observe «l'arc de brouillard».

En fait, avant la disparition de l'arc, on observe une bande blanche deux fois plus large que l'arc ordinaire, orangé à l'extérieur et bleuâtre à l'intérieur.

L'angle sous lequel on voit l'arc est inférieur à 42°. Ce phénomène s'observe parfois dans le brouillard. Peut-être aurez-vous la chance de le voir quand les phares de votre véhicule pénétreront dans une nappe de brouillard.

Les phénomènes atmosphériques liés à la présence des gouttes d'eau ne se limitent pas aux diverses manifestations de l'arc-en-ciel. Signalons seulement ici pour terminer le spectre de BROCKEN qui apparaît en présence de brouillard : la lumière qui pénètre

dans la goutte est retrodiffusée comme dans l'arc-en-ciel. Il se produit des phénomènes d'interférence entre cette lumière et celle qui est réfléchiée par la face d'entrée des gouttes. L'ombre de l'obstacle, appelée «spectre de BROCKEN» (l'observateur tournant le dos au soleil) est entourée d'anneaux colorés, la gloire, qui se projettent sur la brume située en contrebas (le spectateur doit se trouver sur un site élevé).

Le spectre n'est visible que si les gouttes ont des dimensions très voisines.

Un dernier conseil : ayez toujours à portée de main un appareil photographique prêt à intervenir rapidement car les phénomènes intéressants sont souvent très éphémères...

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. DESCARTES : «*Discours huitième*» - (Voir par exemple l'édition Garnier - Flammarion).
- [2] A. BOUASSE : «*Optique géométrique et ondulatoire*» - Delagrave - Paris (1925).
- [3] Luc DETTWILLER : «*Qu'est-ce que l'optique géométrique ?*» - Dunod Université - Paris (1990).
- [4] M. NUSSENZVEIG : «*La théorie de l'arc-en-ciel*» in les phénomènes naturels - Bibl. pour la Science – Belin - Paris (1978).
- [5] M.G.J. MINNAERT : «*Light and Colour in the Outdoors*» Éditions Springer – Verlag - New York (1993).

ARTICLES DIVERS

- [6] F. PRÊTRE : «*L'arc-en-ciel*» BUP n° 560 (décembre 1973) complété par BUP n° 581 (Février 1976).
- [7] Jearl WALKER : «*How to create and observe a dozen rainbows...*» - Scientific American (Juillet 1977).
- [8] R.G.M. CHALOT : «*La luminosité de l'arc-en-ciel*» - BUP n° 778 (Novembre 1995).
- [9] Michel HENRY : «*Optique atmosphérique*» Auvergne Sciences n° 33 - Clermont-Ferrand (mars 1995)



Photo I



Photo II



Photo III

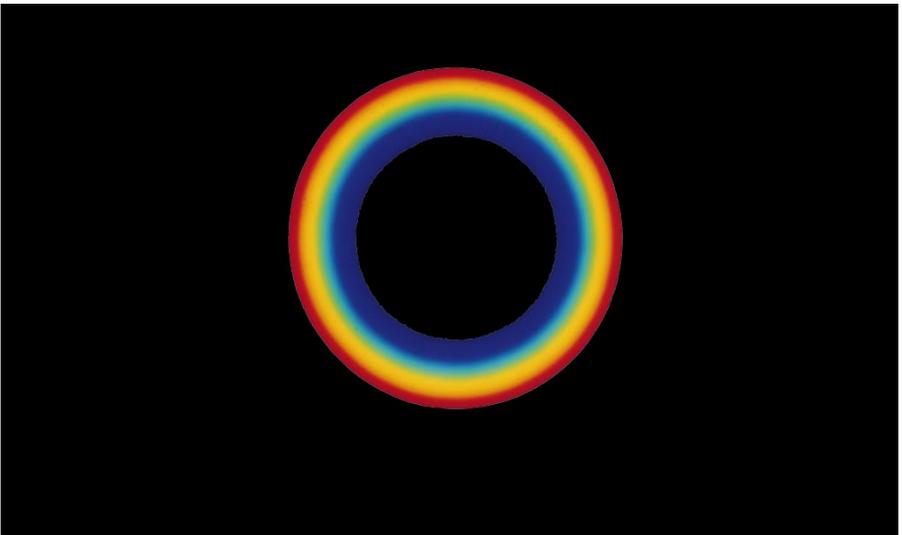


Photo IV



Photo V

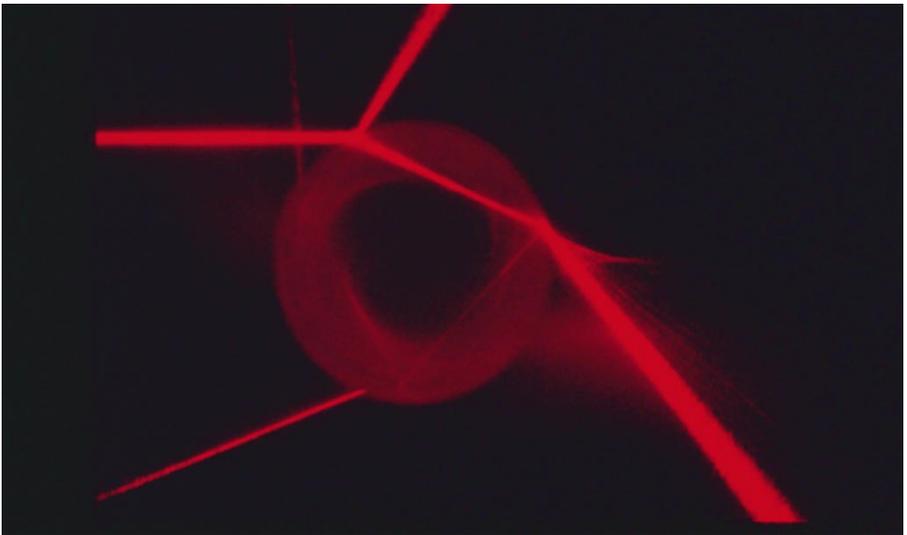


Photo VI

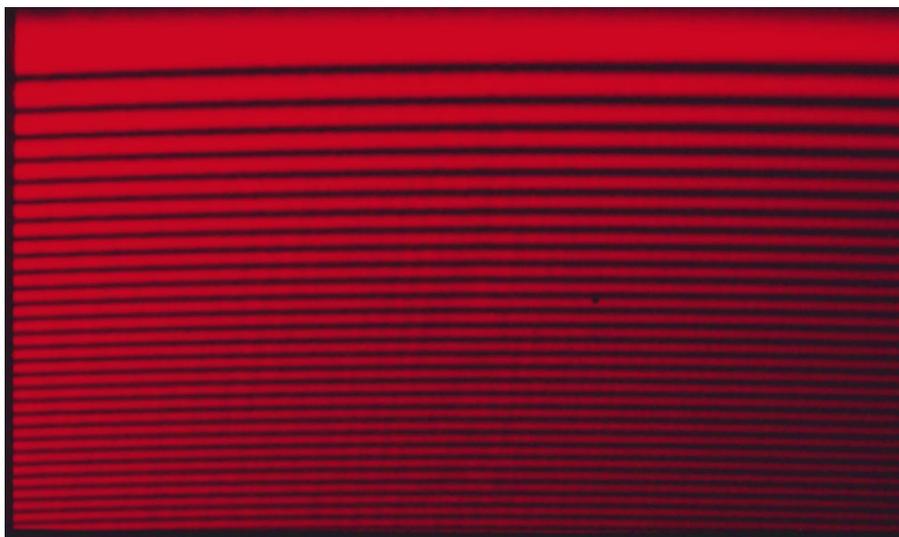


Photo VII

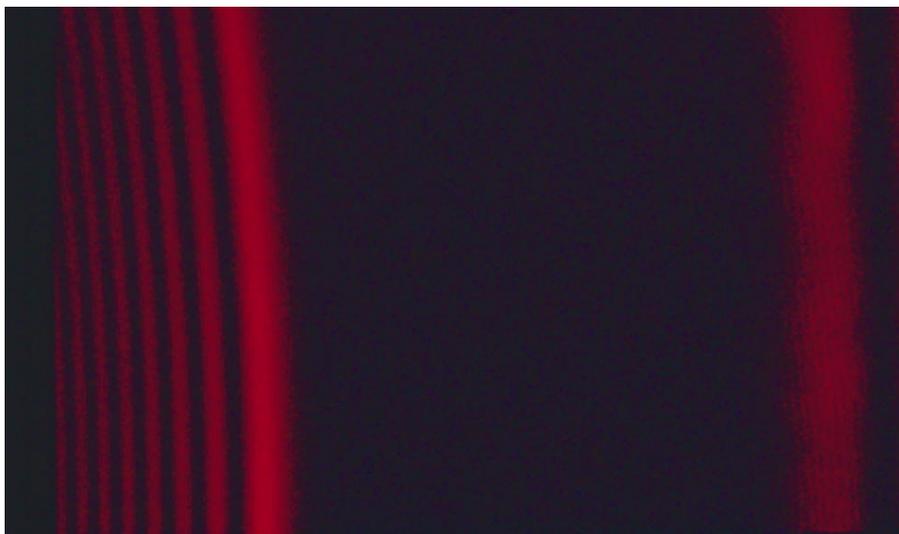


Photo VIII