

A propos du phénomène de l'arc-en-ciel

par R. CHALOT
06140 Vence

Le Bulletin de l'Union des Physiciens a déjà eu l'occasion de publier une petite étude de synthèse sur la théorie de l'arc-en-ciel, sous la plume de M. F. Pretre, Professeur honoraire, dans ses numéros de décembre 1973, (pages 359 à 368) et de février 1976, (pages 549 à 553). Le bref complément que nous publions aujourd'hui a été rédigé dans le but d'apporter quelques informations complémentaires, notamment sur l'aspect photométrique du phénomène, qui semble avoir été jusqu'ici totalement délaissé. Remarquons toutefois que l'auteur de cette étude originale n'est pas un enseignant mais un ingénieur. Vu le manque de place, il ne nous est malheureusement pas possible de la publier in extenso. Les lecteurs qui désireraient en prendre connaissance pourront s'adresser à la Rédaction du Bulletin qui en possède un exemplaire, lequel peut être éventuellement consulté sur place, avec possibilité de se mettre en rapport avec l'auteur.

LE PHÉNOMÈNE DE L'ARC-EN-CIEL – ASPECT PHOTOMÉTRIQUE

L'explication très claire donnée, il y a déjà trois siècles, par René Descartes, pour la formation du phénomène principal de l'arc-en-ciel, (arcs-en-ciel primaire et secondaire), se contente de prédire l'ouverture et la largeur angulaire de ces derniers, quand ils veulent bien apparaître, sans se soucier de chercher à déterminer leur luminosité propre, qui joue cependant un rôle non négligeable lors de la recherche des conditions de leur apparition ou de leur non-apparition.

De l'étude à laquelle nous nous sommes livrés, il résulte que le problème de la détermination de la luminosité propre des arcs primaire et secondaire, de même d'ailleurs que celle des arcs d'ordre supérieur, (on a poussé la détermination jusqu'à l'ordre six, six réflexions internes dans la goutte d'eau), est beaucoup plus simple que l'on serait tenté de le croire à priori. En fait, il ne dépasse pas le niveau de Physique et de Mathématique des Élèves de «Spéciales». Malgré cela, son exposé complet requiert une certaine étendue parce qu'il nécessite un certain

nombre d'étapes successives, conduisant à une démonstration pas à pas. Aussi, cette étude ne saurait mieux illustrer le célèbre précepte de René Descartes : «Diviser les difficultés pour les mieux résoudre».

Pour être bref, on pourrait caractériser cette étude par les principaux traits suivants :

1) A la différence de toutes les études antérieures, tant sur les arcs principaux que sur les arcs surnuméraires où le Soleil est toujours considéré comme ponctuel, (on ne tient compte de son diamètre apparent réel que pour accroître la largeur théorique de la valeur de ce dernier) dans le cas présent, le Soleil est pris pour ce qu'il est, à savoir une source de lumière répartie à la luminance pratiquement uniforme.

2) Autre trait fondamental, le diamètre de la pupille de l'œil de l'observateur intervient ici au premier chef, alors que cela n'a jamais été fait auparavant, et avec lui, la distance de la goutte à l'observateur, ces deux grandeurs étant liées par leur rapport.

3) Troisième trait caractéristique, la prise en considération d'un principe physiologique de fonctionnement du système œil-cerveau, superbement ignoré dans ce domaine jusqu'à maintenant, que nous avons baptisé, faute de mieux, «Principe d'exclusion des images superposées», et qui joue un rôle de premier plan pour l'analyse des conditions d'apparition ou de non-apparition des phénomènes lorsque les conditions géométriques requises sont satisfaites, une fois connue la valeur de la luminosité propre de chaque bande colorée, rapportée à celle du disque solaire.

Ceci dit, énumérons les différentes étapes à franchir :

- a) Soleil ponctuel, goutte d'eau unique,
- b) Atténuation de la quantité de lumière transmise par le jeu de la formule de partage de la lumière, de Fresnel,
- c) Passage de la goutte unique au front de condensation,
- d) Passage de la source ponctuelle à la source répartie,
- e) Dispersion chromatique, fonction $n = f(\lambda)$ linéaire,
- f) Fonction $n = f(\lambda)$ non linéaire,
- g) Effet de la composition du spectre solaire.

A noter que la première étape est on ne peut plus simple. Une fois introduits le diamètre de la pupille de l'œil d et sa distance à la goutte

L, il suffit de ne pas s'arrêter à la dérivée première de la fonction $\Omega = f(i)$, Ω étant l'angle de déviation du rayon lumineux, et i étant l'angle d'incidence, mais de passer à la dérivée seconde de cette même fonction. Les autres étapes sont davantage de nature géométrique.

Pour éviter tout malentendu, il nous faut préciser ici que l'expression «luminosité propre ou intrinsèque» est prise ici dans un sens énergétique, bande spectrale par bande spectrale, sans égard pour la sensibilité éventuellement variable de l'œil humain aux différentes couleurs, mais à la condition expresse de considérer le diamètre de la pupille de l'œil comme invariable au cours de l'analyse, faute de quoi la notion de luminosité perdrait toute valeur objective.

Dans ces conditions, les résultats essentiels de l'étude, au point de vue photométrique, peuvent être formulés de la façon suivante :

a) La couleur rouge est dominante, son intensité énergétique vaut à peu près trois fois la valeur moyenne et six fois celle de la bande violette, toujours la moins visible. Le fait est dû à la non-linéarité accentuée de la fonction $n = f(\lambda)$, n = indice de réfraction de l'eau liquide, λ = longueur d'onde de la lumière.

b) Il existe un rapport bien déterminé entre la luminosité de chaque bande colorée et celle du disque solaire. Ce rapport n'est fonction que du rapport (L/d) , L étant la distance séparant l'observateur du front de condensation (là où sont réunies les gouttes) et d le diamètre de la pupille de l'œil, supposé constant pour pouvoir parler d'un rapport de luminosité. Ce rapport varie comme $(L/d)^{1/2}$ il augmente donc avec la distance.

c) A titre d'exemple, la théorie photométrique de l'arc-en-ciel conduit aux valeurs suivantes du rapport en question pour $d = 2$ mm et $L = 2$ km, $(L/d = 10^6)$:

| | Rouge | Violet |
|--------------------------|---------------------|---------------------|
| Longueur d'onde (nm) | 750 | 410 |
| Rapport (Arc primaire) | $9,5 \cdot 10^{-4}$ | $1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| Rapport (Arc secondaire) | $9,1 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |

Ainsi, l'arc secondaire apparaît comme à peu près dix fois moins lumineux que l'arc primaire. Pour une distance de 20 mètres au lieu de 2 kilomètres, ces nombres seraient à diviser par 10, en vertu de la loi énoncée ci-dessus. Ces résultats sont valables pour un front de

condensation non transparent et d'épaisseur relativement faible vis-à-vis de la distance L . S'il n'en est pas ainsi, des coefficients correctifs sont à appliquer aux valeurs numériques ci-dessus, calculables par la théorie.

Ce qu'il convient avant tout de retenir est que le phénomène de l'arc-en-ciel, surtout le primaire, est bien plus lumineux qu'on ne le croit généralement. Pour ce dernier, se détachant sur un front de condensation nuageux distant de 2 kilomètres, la luminosité de la bande rouge, la plus lumineuse, atteint environ 600 fois celle de la Pleine Lune, égale, comme on sait, à $1,58 \cdot 10^{-6}$ fois celle du disque solaire.

Comment expliquer ce fait a priori déroutant ? Comment expliquer aussi le fait que la variation importante de la luminosité des arcs-en-ciel avec la distance soit passée jusqu'ici totalement inaperçue ?

Pour comprendre cela, il est nécessaire de faire appel à plusieurs autres propriétés de la Nature, sur lesquelles il semble bien que l'attention n'a pas été suffisamment attirée :

a) L'existence de la lumière parasite, en provenance du rayonnement du ciel, soit clair, soit plus ou moins nuageux, et qui, renvoyée vers l'œil de l'observateur par la même goutte d'eau et l'atteignant par conséquent au même point de la rétine, tend à occulter le phénomène principal, par le jeu de ce qui a été désigné plus haut par «Principe d'exclusion des images superposées».

b) Le taux de variation de cette lumière parasite entre un ciel nuageux et un ciel très clair, qui est pratiquement de l'ordre de 1 à 10 et quelquefois davantage.

c) L'énorme faculté d'adaptation de l'œil humain à une variation de la luminosité ambiante, qui présente un rapport de l'ordre de 1 à 1 000 entre le jour à l'extérieur et le soir à l'intérieur chez soi, dont on a à peine conscience.

La loi énoncée plus haut en $(L/d)^{1/2}$ permet de comprendre l'origine du fait bien connu selon lequel un arc-en-ciel primaire, et a fortiori un arc secondaire, ne peut apparaître dans un jet d'eau ou une cascade proche que si le ciel est très clair, et encore mieux si des obstacles naturels viennent atténuer la quantité de lumière parasite sans pour autant s'opposer au passage des rayons solaires directs.

Par ailleurs, il est apparu possible d'aller au-delà de la détermina-

tion de la luminosité intrinsèque des arcs primaire et secondaire, en calculant également la luminosité de la zone claire, quelquefois observable à l'intérieur de l'arc primaire, ainsi que celle des franges rosées, appelées «arcs surnuméraires» qui bordent parfois l'arc primaire à son intérieur.

Le processus de calcul est semblable à celui utilisé pour les arcs principaux, c'est-à-dire que l'on prend en compte le diamètre d de la pupille de l'œil et la distance L de la goutte à l'observateur. Mais ici, la dérivée première de la fonction $\Omega = f(i)$ n'est plus nulle et reprend par conséquent sa place. On montre que, dans ces conditions, le rapport (L/d) se trouve éliminé et n'intervient plus. On en déduit que l'on n'a plus affaire à une luminosité, mais à une véritable luminance, que l'on est amené à comparer, lors de l'observation, à celle du ciel environnant.

Le calcul montre que cette luminance intrinsèque est relativement uniforme à l'intérieur de la zone claire jusqu'à une valeur notable de l'écart angulaire à compter de l'arc primaire, et que son niveau est de l'ordre de grandeur de celle de la Pleine Lune et de celle du ciel environnant.

Pour l'observateur, là encore le Principe d'exclusion des images superposées entre en jeu. La zone claire intérieure, et par contraste, la zone sombre extérieure, appelée la «zone sombre d'Alexandre», sont ou non perceptibles selon le niveau relatif de la lumière parasite. La même chose pour les arcs surnuméraires, dont le calcul montre qu'ils ont une luminance intrinsèque égale à six fois celle de la zone claire, mais qui exigent pour leur visibilité une condition supplémentaire : celle d'une homogénéité suffisante des gouttes d'eau constituant le front de condensation.

Cette dernière condition a pour origine le fait que les écarts angulaires entre les franges successives dépendent du diamètre des gouttes, en augmentant à peu près comme l'inverse du diamètre. A titre d'exemple, un diamètre de un millimètre conduit à un écart angulaire d'environ 0,4 degré, comme le montre le calcul de la différence de marche optique entre les rayons lumineux émergents parallèles atteignant la pupille de l'œil de l'observateur et donnant lieu à interférence, selon l'explication donnée qualitativement par le grand Physicien Thomas Young vers l'année 1800.

Chose curieuse, cette explication ne semble pas avoir été digne

d'être retenue par la Communauté Scientifique, et actuellement on se trouve en présence de trois autres explications pour un même phénomène !, à savoir celle d'Airy, datant de 1838, celle de Mie datant de 1908, enfin, celle de Khare et de Nussenzveig en 1975 et 1977.

A notre avis, il n'y a aucune raison pour ne pas accepter l'explication de Young, de beaucoup la plus simple tant que l'on n'aura pas montré que l'une des trois explications mentionnées ci-dessus conduit à une luminance plus forte pour les arcs surnuméraires que celle déduite de son explication qualitative.

Il est évident que si le diamètre des gouttes d'eau ne présente pas une homogénéité suffisante, les différentes franges d'interférence, en se superposant, se trouvent totalement brouillées et cessent d'être perceptibles, en donnant lieu à la luminance moyenne de la couleur neutre. Dans le cas contraire, la couleur rosée des arcs surnuméraires s'explique tout naturellement par la prééminence marquée de la couleur rouge dans l'arc principal.