



1. LES COULEURS DES ANNEAUX
d'une gloire se déclinent du bleu au rouge
en partant de l'intérieur, puis se répètent
une ou plusieurs fois. Les premières
descriptions du phénomène évoquaient
des arcs-en-ciel juxtaposés.

En 1965, j'ai entamé un programme de recherche visant à fournir, entre autres, une explication physique complète du phénomène des gloires. Grâce à diverses collaborations, cet objectif a été atteint en 2003. L'effet tunnel, une propriété physique que l'on décrira, joue un rôle prépondérant dans le mécanisme proposé. Nous verrons que ce dernier, en améliorant notre compréhension des interactions de la lumière du Soleil avec les particules en suspension, aide aussi à modéliser l'impact des aérosols atmosphériques (les nuages, la poussière, la suie...) sur le climat.

L'optique géométrique ne suffit pas

De nombreuses tentatives d'explication des gloires ont précédé la mienne. Toutes font appel à la diffraction de la lumière du Soleil par les gouttelettes des nuages : le terme de diffraction regroupe un ensemble de phénomènes portant sur la propagation de la lumière et résultant de sa nature ondulatoire ; on parle de diffraction dès que le comportement de la lumière viole les lois de l'optique géométrique, qui modélise sa propagation par des rayons rectilignes. Par exemple, dans certains cas, l'onde lumineuse pénètre dans des régions où devrait régner l'ombre d'un objet opaque, de la même façon qu'une vague contourne un pieu planté dans la mer. Dans d'autres cas où l'onde rencontre un objet, elle peut être éparpillée dans toutes les directions, concentrée dans certaines, divisée entre ses différentes composantes fréquentielles – donc en différentes couleurs, comme ce qui est observé lors des gloires –, etc.

L'optique géométrique ne pourrait-elle pas, elle aussi, expliquer les anneaux colorés des gloires ? Après tout, elle prévoit également un phénomène qui divise la lumière en ses différentes couleurs : la réfraction. Lorsque la lumière parvient à l'interface de deux milieux différents, tels que l'eau et l'air, une partie est réfléchiée et l'autre est réfractée. Dans la réfraction, la lumière traverse l'interface, mais sa trajectoire est déviée lorsqu'elle ne lui est pas perpendiculaire (la réfraction explique ainsi qu'un crayon à moitié plongé dans l'eau semble cassé) ; en outre, l'angle de déviation dépend de la longueur d'onde, de sorte que la lumière est séparée en ses différentes composantes fréquentielles.

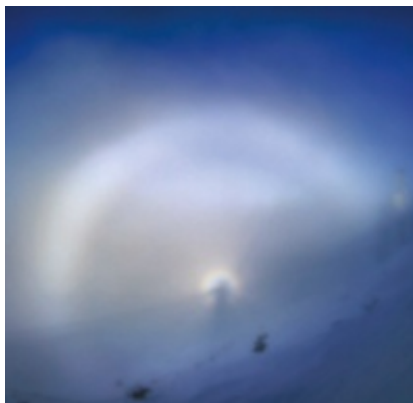
Toutefois, un indice suggérait que ce phénomène ne suffirait pas à expliquer

Steve Jurvetson

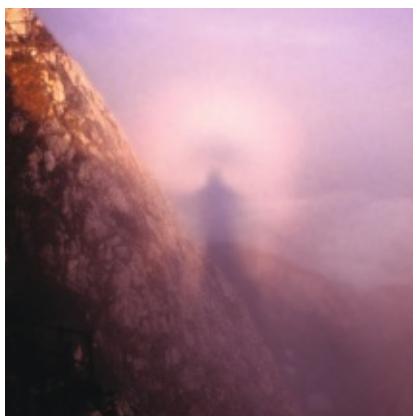
Barbara Laughon



Claudia Hinz



Claudia Hinz



2. DES GLOIRES apparaissent parfois autour des ombres des alpinistes projetées sur la brume ou sur des nuages proches.

les gloires : s'il s'agissait de réfraction, les longueurs d'onde les plus élevées seraient les moins déviées, de sorte que le rouge devrait être à l'intérieur de chacun des « arcs-en-ciel » qui composent la gloire ; or le rouge est à l'extérieur. À l'inverse, la diffraction entraîne une déviation des ondes selon un angle croissant avec la longueur d'onde, ce qui correspond aux observations. Il fallait donc aller au-delà de l'optique géométrique et prendre en compte plus précisément la nature ondulatoire de la lumière, notamment à travers la diffraction.

Au début du XX^e siècle, le physicien allemand Gustav Mie a obtenu une expression exacte caractérisant la diffraction de la lumière par des gouttelettes sphériques ; il s'agit d'une solution particulière des équations de Maxwell, qui régissent la propagation des ondes électromagnétiques. Le problème est que son expression comporte une somme infinie de termes nommés harmoniques sphériques. Chacun d'entre eux est une fonction compliquée, qui dépend notamment de la taille de la gouttelette, de l'indice de réfraction de l'eau (qui détermine la déviation des rayons lumineux par l'eau, comparative-ment au vide ou à l'air) et de la distance d'un rayon lumineux vis-à-vis du centre de la gouttelette (on parle de paramètre d'impact du rayon). Et bien que seul un nombre fini de ces termes importe en pratique, la méthode de Mie nécessite d'évaluer des centaines, voire des milliers, d'expressions mathématiques compliquées. Intégrez ces formules dans un calcul numérique fait par un puissant ordinateur et vous obtiendrez le bon résultat, mais vous n'aurez aucun élément sur l'explication physique du phénomène.

Une boîte noire mathématique

La solution de Mie n'est qu'une « boîte noire » mathématique qui, en fonction de certaines données d'entrée, produit un résultat. On attribue à Eugene Wigner, lauréat du prix Nobel de physique en 1963, cette remarque pertinente à propos des simulations et calculs numériques : « Bon, d'accord, l'ordinateur a compris, mais moi j'aimerais bien comprendre aussi ! » En outre, dans le cas des gloires, la multiplicité des tailles des gouttelettes dans les nuages rend les calculs particulièrement ardu, et ce n'est que dans les années 1990 que les supercalculateurs ont fourni les premiers résultats fiables.

Une explication plus précise de la physique en jeu et du comportement des ondes lumineuses à l'origine des gloires, déjà nécessaire avant Mie, l'est donc restée après lui. Au début du XIX^e siècle, le physicien allemand Joseph von Fraunhofer a suggéré que les gloires résultent d'une double déviation de la lumière : après avoir pénétré dans les couches internes du nuage, elle y serait réfléchi, puis serait diffractée par les gouttelettes des couches traversées lors de son trajet retour. Fraunhofer s'inspirait d'un phénomène relatif à la Lune : lorsque des nuages la voilent, les couches successives de gouttelettes diffractent sa lumière et l'astre apparaît entouré d'une couronne de plusieurs couleurs.

En 1923, le physicien indien B. B. Ray réfuta cette proposition. Grâce à des expériences avec des nuages artificiels, il montra que les anneaux de la gloire sont directement issus de la couche externe du nuage.

Ray tenta alors d'expliquer le retour de la lumière dans la direction incidente à l'aide d'interactions avec une seule gouttelette. Selon lui, la gloire était créée par un mince faisceau lumineux qui passait par le centre de la gouttelette et se réfléchissait sur la face arrière – il pensait que les autres rayons étaient dispersés dans des directions différentes de l'incidente –, puis subissait une diffraction lors de son trajet retour à l'intérieur de la gouttelette.

Au milieu du XX^e siècle, le Hollandais Hendrick van de Hulst proposa une explication alternative. Il remarqua qu'un rayon de lumière qui pénètre dans une gouttelette selon une direction quasi rasante, c'est-à-dire proche de la tangente à la surface, pouvait repartir pratiquement dans la direction incidente ; le rayon est réfléchi à l'arrière de la gouttelette, avant de ressortir (voir l'encadré page ci-contre). En raison de la symétrie des gouttelettes sphériques, tous les rayons parallèles et ayant le même paramètre d'impact (ils forment un cylindre) subissent cette réflexion. Un effet de focalisation en résulte : les rayons réfléchis ne se dispersent pas dans toutes les directions, mais sont focalisés dans la direction d'incidence, ce qui renforce l'intensité lumineuse renvoyée dans cette direction.

L'explication semblait plausible, mais posait un problème. Un rayon qui pénètre dans un nouveau milieu, ici une gouttelette d'eau, et qui en ressort est plus ou moins dévié selon l'indice de réfraction de ce milieu. Or l'indice de réfraction de l'eau