

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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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.

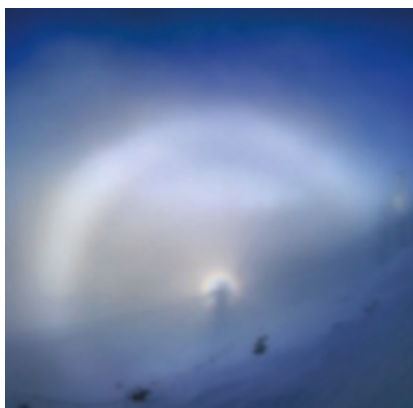
Ray tenta alors d'expliquer le retour de la lumière dans la direction incidente à l'aide d'interactions avec une seule gouttelette. Selon lui, la gloire était créée par un mince faisceau lumineux qui passait par le centre de la gouttelette et se réfléchissait sur la face arrière – il pensait que les 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<sup>e</sup> 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.

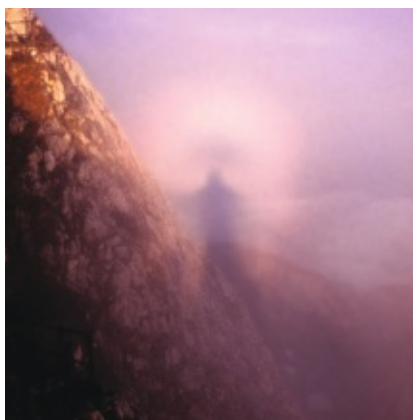
L'explication semblait plausible, mais posait un problème. Un rayon qui pénètre dans un nouveau milieu, ici une gouttelette d'eau, et qui en ressort est plus ou moins dévié selon l'indice de réfraction de ce milieu. Or l'indice de réfraction de l'eau



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.

ne permet pas de renvoyer un rayon dans la même direction après une seule réflexion interne. Au mieux, l'eau peut renvoyer la lumière dans une direction s'écartant de 14 degrés de celle du rayon incident.

Pour annuler cet écart angulaire, van de Hulst proposa en 1957 l'idée que la lumière incidente se transforme temporairement en une onde de surface (de telles ondes circulent à l'interface de deux milieux différents et apparaissent dans un grand nombre de situations), avant de pénétrer dans la gouttelette et d'en ressortir. Elle suivrait alors la paroi convexe de la gouttelette sur de courtes distances, et la trajectoire globale résultante aboutirait à un renvoi du rayon dans la direction incidente (voir l'encadré ci-contre).

La difficulté est que les ondes de surface perdent de l'énergie en se propageant. Mais pour van de Hulst, cette atténuation lumineuse était largement compensée par la focalisation axiale. À l'époque où il émit cette hypothèse, aucun procédé quantitatif ne permettait de le vérifier, de même qu'on ne pouvait pas évaluer la contribution des rayons décrits par Ray. Toute l'information nécessaire devait être implicitement contenue dans la série d'harmoniques sphériques de Mie; mais en 1957, personne ne savait l'extraire.

## Une contribution inattendue

En 1987, avec Warren Wiscombe, du Centre de vols spatiaux de la NASA, à Greenbelt, aux États-Unis, j'ai proposé une nouvelle piste pour expliquer le phénomène des gloires. Nous avons suggéré que les rayons lumineux passant à l'extérieur de la goutte sphérique jouent un rôle important. À première vue, cela semble absurde : comment un rayon pourrait-il être influencé par une gouttelette s'il ne l'effleure même pas ? Mais les ondes – et les ondes lumineuses en particulier – ont l'étrange capacité d'enjamber une barrière *a priori* infranchissable : c'est « l'effet tunnel », une autre manifestation de la diffraction subie par une onde.

Ainsi, dans certaines circonstances, l'énergie lumineuse peut s'échapper d'un milieu où elle devrait rester confinée. Examinons de quelle façon. En règle générale, la lumière se propageant dans un milieu tel que le verre ou l'eau est totalement réfléchie si elle heurte, avec un angle assez petit, la surface qui la sépare d'un autre milieu

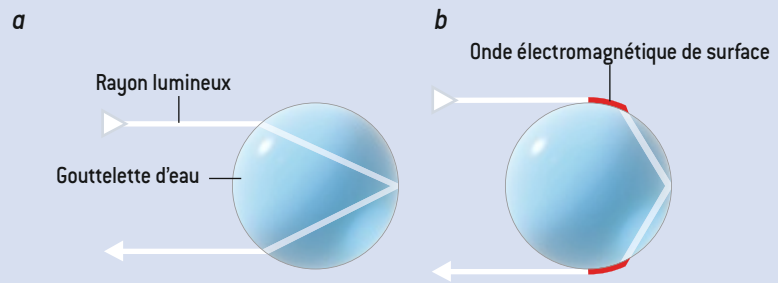
## LA LUMIÈRE AU BOUT DU TUNNEL

Le phénomène des gloires est connu depuis des siècles, mais les physiciens ne l'ont compris que récemment, et après quelques errements, grâce notamment à ce que l'on nomme l'effet tunnel.

### De fausses pistes...

Les chercheurs ont d'abord attribué ce phénomène à la réflexion de la lumière à l'intérieur des minuscules gouttelettes d'eau qui composent les nuages. Les rayons auraient été déviés en pénétrant dans la gouttelette (c'est la réfraction), se seraient réfléchis à l'intérieur, puis auraient été de nouveau déviés en ressortant, de façon à revenir à la direction initiale, dans le sens opposé (a). Mais l'eau n'a pas le pouvoir de dévier suffisamment les rayons lumineux pour qu'ils repartent exactement dans la même direction.

Une deuxième théorie a alors postulé que les rayons lumineux effleurant une gouttelette se transforment temporairement en ondes électromagnétiques de surface. En suivant la surface convexe sur une petite distance (exagérée sur la figure b) avant de pénétrer dans la gouttelette et d'en ressortir, le rayon peut tourner de façon à être renvoyé dans la direction initiale. Cet effet existe, mais il ne contribue que pour une petite part à l'énergie globale perçue dans une gloire.



### ... et finalement la solution !

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, on a décrit le phénomène des gloires à l'aide d'une expression mathématique compliquée, qui n'en autorisait pas une réelle compréhension physique. C'est à une telle compréhension qu'est parvenu l'auteur : il a montré que la principale partie de la lumière perçue dans une gloire résulte du passage par effet tunnel, à l'intérieur des gouttelettes d'eau, d'une partie de l'énergie des ondes lumineuses associées à des rayons qui frôlent les gouttelettes (c). L'effet tunnel se produit avec les ondes de toutes sortes, qu'elles relèvent de la physique quantique ou classique.

