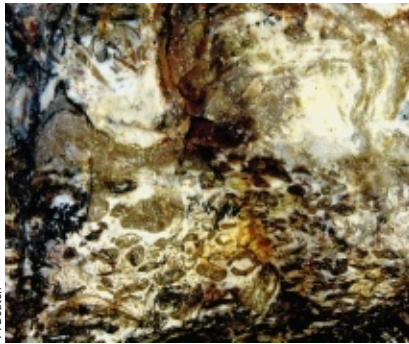


reste à démontrer. L'apport de silice n'est pas systématiquement associé à des débris de roches volcaniques ; de plus, aucun indice géochimique d'un accroissement du volcanisme explosif n'a encore été décelé dans ces roches.

Une autre hypothèse pourrait expliquer la silicification des sédiments. Le Francevillien C correspond en effet à un arrêt de la subsidence des bassins d'effondrement de Franceville et d'Okondja. Par la suite, des milieux très peu profonds, hébergeant les stromatolithes, et des environnements sursalés, similaires aux sebkhas du golfe Persique, se sont généralisés. Dans ces environnements, la forte alcalinité de l'eau (pH supérieur à 9) rend possible la dissolution de la silice ; cette dernière est alors susceptible de précipiter lors d'arrivées d'eaux douces dans le milieu, qui font baisser le pH .

Un tel mécanisme aboutit aux accumulations siliceuses, tel le silex, dans les dépôts lacustres des zones intertropicales soumises à une forte évaporation. Reste à connaître l'origine des apports de silice, dissoute ou sous forme de débris, néces-



6. CONSTRUCTIONS STROMATOLITHIQUES trouvées au Gabon. Leur grande variété morphologique reflète la diversité des milieux où elles se sont formées.

saire à la formation des jaspes francevilliens : elle a peut-être été introduite dans le milieu lors des inondations temporaires, voire saisonnières, d'eau douce.

Enfin, à y regarder de plus près, l'horizon de jaspes ne signe pas véritablement la fin de l'histoire biologique de cette région du Gabon. La matière organique reste en effet abondante dans les sédiments plus récents, même si sa production ne semble plus assurée par les milieux à stromatolithes dont on ne trouve pas la trace.

La grande diversité des formes de vie hébergées par les différents environnements marins de la région de Franceville semble s'étioler à la fin du Francevillien. Il est cependant possible que les biotopes décrits se soient développés de nouveau ailleurs. On peut ainsi penser que les possibles organismes pluricellulaires découverts par l'équipe de A. El Albani aient eu une descendance qui a colonisé d'autres régions présentant les mêmes conditions favorables à la vie, mais peut-être pas les conditions de conservation qui nous auraient permis d'en retrouver la trace dans les sédiments, plus de deux milliards d'années plus tard.

universcience présente

le **cit** **Palais de la découverte**

les conférences entrée libre

à la Cité des sciences et de l'industrie

Paroles de Gaulois [les mardis à 18h30]

6 mars L'imaginaire gaulois : rites, religion et croyances

13 mars L'art gaulois : esthétique et symbolique

20 mars Les Gaulois, façonneurs de paysages

Le cosmos vu par les mathématiques [les mercredis à 18h30]

21 mars Le Système solaire est-il chaotique ?

28 mars La galaxie, agitée et en quête de relaxation

4 avril L'Univers est-il courbe ?

Alan Turing, père de l'ordinateur [jeudi 8 mars à 19h]

Lecture de textes par un acteur, commentée par un scientifique.

En partenariat avec **Inrap** **t&v**

Avec le soutien de **SCIENCE** **encyclo** **FUTURA - SCIENCES** **SCIENTES AVENIR** **toute L'HISTOIRE** **culture**

programme complet sur www.universcience.fr

Les GLOIRES, des auréoles autour des ombres

Les gloires sont des anneaux colorés qui entourent parfois les ombres projetées sur les nuages.

Ce phénomène s'explique par un jeu subtil entre la lumière du Soleil et les gouttelettes d'eau en suspension.

Moysés Nussenzveig

L'ESSENTIEL

✓ Les gloires sont des anneaux colorés entourant les ombres d'alpinistes ou d'aéronefs projetées sur les nuages.

✓ Comme dans un arc-en-ciel, les couleurs sont produites par les gouttelettes d'eau microscopiques dont sont formés les nuages.

✓ Mais les gloires ont une origine différente : elles sont une manifestation macroscopique d'un effet dit tunnel, grâce auquel la lumière frôlant une gouttelette passe à l'intérieur, avant d'être renvoyée dans la direction incidente.

Lors d'un vol de jour, asseyez-vous près d'un hublot, du côté opposé au Soleil. Avec un peu de chance, vous observerez l'un des plus beaux phénomènes météorologiques qui soient : un halo multicolore entourant l'ombre de l'avion (*voir la figure 1*). Ses anneaux irisés ne sont pas ceux d'un arc-en-ciel, mais ceux d'un phénomène plus compliqué, nommé gloire. Plus les nuages sont proches, plus il est spectaculaire, finissant par dominer tout l'horizon.

Les gloires n'auréolent pas seulement les avions. Si vous pratiquez l'alpinisme, vous en avez peut-être déjà admiré une, juste après le lever du soleil, autour de votre propre tête – ou plutôt autour de son ombre projetée sur des nuages proches ou sur la brume (*voir la figure 2*). Nombre de scientifiques pensent que de telles gloires ont inspiré le nimbe qui entoure la tête des divinités et des empereurs dans l'iconographie orientale et occidentale.

La première publication concernant ce phénomène date de 1748. Elle relate les observations d'une expédition scientifique française, qui avait gravi dix ans plus tôt le volcan Pambamarca, situé sur l'actuel territoire de l'Équateur. Cette expédition s'inscrivait dans le cadre d'une série de voyages, organisés au XVIII^e siècle par

l'Académie royale des sciences pour répondre à des questions portant notamment sur la forme exacte de la Terre. Antonio Ulloa, l'un de ses membres, décrit les gloires comme « trois arcs-en-ciel nuancés de diverses couleurs et entourés à une certaine distance par un quatrième arc d'une seule couleur ». En pratique, on ne voit souvent qu'un ou deux de ces « arcs-en-ciel » circulaires. Il précise que chacun des voyageurs « ne voyait le phénomène que relativement à lui, et était disposé à nier qu'il fût répété pour les autres ».

L'ombre du spectateur ou de l'avion ne joue aucun rôle dans la création d'une gloire, mais elle indique que le Soleil, l'observateur et le nuage sont alignés. Lors de ce phénomène, la lumière solaire « rebondirait » donc sur les nuages et serait renvoyée quasiment dans la direction incidente. Reste à comprendre comment.

On pourrait penser que les gloires, connues depuis des siècles et relevant d'une science « ancienne », l'optique, ont été expliquées depuis longtemps. Pourtant, elles ont défié les scientifiques jusqu'au début des années 2000. En effet, elles sont bien plus compliquées que les arcs-en-ciel – qui ne sont eux-mêmes pas aussi simples que ne le laissent entendre les manuels d'introduction à la physique.



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 réfléchie 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

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.

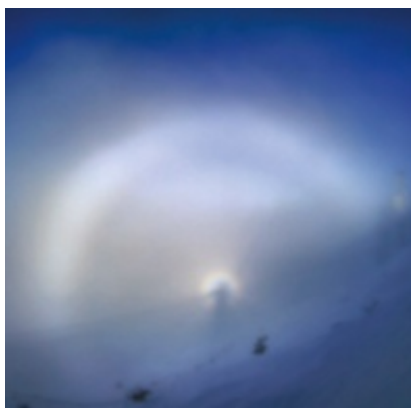
Ray tenta alors d'expliquer le retour de la lumière dans la direction incidente à l'aide d'interactions avec une seule gouttelette. Selon lui, la gloire était créée par un mince faisceau lumineux qui passait par le centre de la gouttelette et se réfléchissait sur la face arrière – il pensait que les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

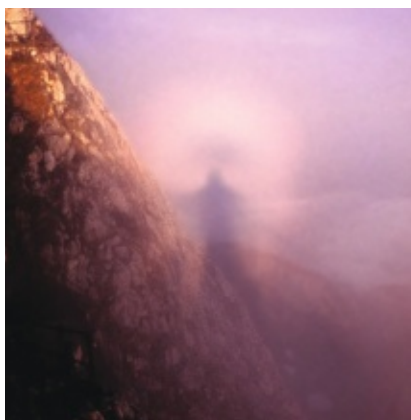
L'explication semblait plausible, mais posait un problème. Un rayon qui pénètre dans un nouveau milieu, ici une gouttelette d'eau, et qui en ressort est plus ou moins dévié selon l'indice de réfraction de ce milieu. Or l'indice de réfraction de l'eau



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.

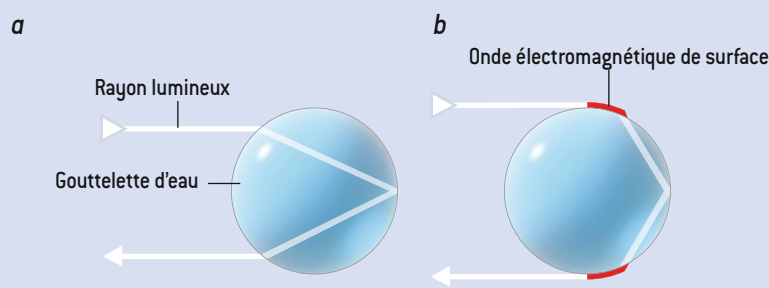
Ainsi, dans certaines circonstances, l'énergie lumineuse peut s'échapper d'un milieu où elle devrait rester confinée. Examinons de quelle façon. En règle générale, la lumière se propageant dans un milieu tel que le verre ou l'eau est totalement réfléchie si elle heurte, avec un angle assez petit, la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

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...

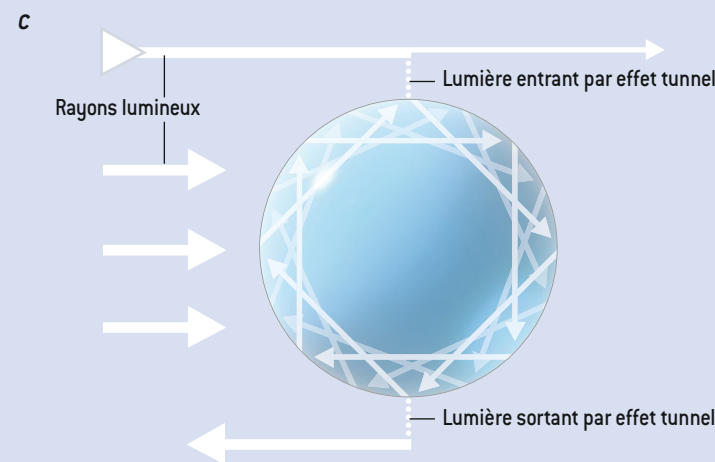
Les chercheurs ont d'abord attribué ce phénomène à la réflexion de la lumière à l'intérieur des minuscules gouttelettes d'eau qui composent les nuages. Les rayons auraient été déviés en pénétrant dans la gouttelette (c'est la réfraction), se seraient réfléchis à l'intérieur, puis auraient été de nouveau 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^e 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.



Alfred Kamalian

dont l'indice de réfraction est inférieur – c'est notamment ce qui permet de maintenir un signal dans une fibre optique, le rayon lumineux se réfléchissant sur les parois. Néanmoins, même si toute l'énergie lumineuse est réfléchie, les champs électriques et magnétiques qui composent les ondes ne s'annulent pas complètement à l'interface. Ils pénètrent dans le deuxième milieu sur une infime distance, formant des ondes dites évanescences qui ne se propagent pas en dehors de la proximité immédiate de l'interface et ne transportent aucune énergie à travers cette frontière.

Dans ce dernier cas, l'effet tunnel n'intervient pas. En revanche, quand un troisième milieu matériel se trouve à très courte distance de la frontière, de sorte qu'il empiète sur le terrain des ondes évanescences, la lumière peut reprendre sa propagation externe dans ce troisième milieu ; son énergie est alors « siphonnée » à travers la brèche ouverte par les ondes évanescences. En conséquence, l'onde d'origine

s'affaiblit. L'effet tunnel permet ainsi de traverser un milieu qui formait auparavant une barrière. Notons qu'un effet tunnel notable ne peut se produire que si l'espacement entre les milieux de départ et d'arrivée n'est pas beaucoup plus grand qu'une longueur d'onde – environ un demi-micromètre dans le cas de la lumière visible.

Newton avait observé ce phénomène dès 1675. Il étudiait alors des figures d'interférences, connues aujourd'hui sous le nom d'anneaux de Newton : lorsqu'une lentille convexe est posée sur une lame de verre plane, une série d'anneaux concentriques, alternativement clairs et sombres, apparaît autour du point de contact ; on observe cette figure aussi bien en regardant la lame de dessous – par transparence – que de dessus. Lorsque la lentille et la lame sont séparées par une infime barrière d'air, la figure d'interférences vue du dessous est perturbée ; Newton a montré que les perturbations venaient d'une petite quantité de lumière qui arrive de

façon rasante sur la face convexe de la lentille et franchit la barrière d'air au lieu d'être réfléchie.

L'effet tunnel n'a rien d'intuitif. Le physicien d'origine russe George Gamow fut le premier à l'utiliser en mécanique quantique en 1928 pour expliquer comment certains isotopes radioactifs émettent des particules alpha (assemblages de deux protons et deux neutrons). Gamow remarqua que ces particules n'avaient pas assez d'énergie pour échapper à l'attraction du noyau, un peu comme un boulet de canon ne peut se détacher du champ gravitationnel de la Terre. Mais il a démontré que leur nature ondulatoire (en physique quantique, la dualité onde-particule implique que toute particule a aussi des propriétés ondulatoires) entraînait un effet tunnel grâce auquel elles se libéraient.

Contrairement aux idées reçues, l'effet tunnel n'est pas exclusivement un phénomène quantique. Il se produit aussi avec des ondes classiques. Ainsi, dans un nuage, une partie de la lumière du Soleil qui devrait passer à proximité immédiate d'une gouttelette d'eau peut y pénétrer par effet tunnel et, de cette façon, contribuer à la production d'une gloire.

Lors de nos premiers travaux en 1987, W. Wiscombe et moi avons étudié la diffraction par une sphère totalement réfléchissante, telle une boule argentée. Nous avons découvert que des rayons qui devraient passer à côté de la sphère peuvent, s'ils en sont assez proches, traverser par effet tunnel la couche d'air qui les en sépare et contribuer notablement à la diffraction.

Dans le cas d'une bille transparente telle qu'une gouttelette d'eau, l'onde peut se propager à l'intérieur après avoir effectué cette traversée. Une fois entrée dans la gouttelette, l'onde heurte sa surface interne sous un angle assez faible pour être réfléchie totalement et y rester piégée. Le même phénomène se produit parfois avec des ondes sonores. Par exemple, à Londres, la coupole de la cathédrale Saint-Paul abrite une galerie circulaire aux propriétés acoustiques étonnantes : une personne qui chuchote près de la paroi peut être entendue distinctement depuis le côté opposé, à plus de 34 mètres de distance, grâce aux multiples réflexions du son sur les murs concaves.

Revenons aux ondes lumineuses piégées dans la gouttelette. Des interférences constructives renforcent certaines

POURQUOI DES GLOIRES AUTOUR DES OMBRES ?

Une gloire étant constituée de lumière renvoyée quasiment dans la direction d'où elle vient, le phénomène requiert l'alignement du Soleil, de l'observateur et du nuage. C'est pourquoi elle est toujours perçue comme un halo entourant l'ombre de l'observateur projetée sur le nuage. Comme pour un arc-en-ciel, les diverses couleurs du spectre subissent des déviations d'angles légèrement différents, ce qui engendre une figure irisée.



Alfred Kurnajan

composantes fréquentielles de l'onde lors des multiples réflexions internes. Elles produisent ce qu'on nomme une «résonance de Mie» – on parle aussi de résonances en mode de chuchotement en galerie, par analogie avec l'acoustique. De même, quand on synchronise les poussées communiquées à une balançoire sur le rythme précis de son mouvement pendulaire naturel, la balançoire s'élève de plus en plus haut. Les résonances de Mie sont très localisées en longueur d'onde et augmentent l'intensité lumineuse de façon importante.

Si les ondes piégées dans la gouttelette contribuent au phénomène de la gloire, cela signifie qu'elles finissent par en ressortir, mais comment ? De la même façon qu'elles y sont entrées : par effet tunnel.

En résumé, trois contributeurs potentiels pouvaient expliquer les gloires : les rayons qui heurtent « frontalement » la gouttelette et sont renvoyés dans la direction incidente ; les rayons rasants qui y pénètrent *via* les ondes de surface de van de Hulst ; et les rayons qui entrent et ressortent par effet tunnel, dopés au passage par des résonances de Mie.

Grâce à divers traitements mathématiques de l'expression établie par Mie, j'ai évalué ces trois contributions : la première en 1969, la deuxième en 1977 avec Vijay Khare, alors chercheur à l'Université de Rochester, aux États-Unis, et la troisième en 1994, avec Luiz Gallisa Guimarães, de l'Université fédérale de Rio de Janeiro, au Brésil. En 2002, j'ai entrepris des analyses précises pour déterminer laquelle prédomine. J'en ai conclu que la contribution essentielle provient des rayons introduits par effet tunnel et ayant subi des résonances de Mie. Les gloires sont donc une manifestation macroscopique d'un effet tunnel subi par la lumière.

Des gloires au climat

Outre la satisfaction intellectuelle d'avoir enfin compris le principe des gloires, nos recherches pourraient avoir d'importantes applications. Désormais, nous connaissons mieux les résonances de Mie, notamment exploitées par certains lasers utilisant des microgouttelettes d'eau et des microsphères solides. De plus, la compréhension de la diffraction par des gouttelettes est capitale pour évaluer le rôle que les nuages auront dans le changement climatique.

En effet, l'eau est transparente dans le domaine visible, mais, à l'instar du gaz carbonique et d'autres gaz à effet de serre, elle absorbe certaines longueurs d'onde dans l'infrarouge. Et comme les résonances de Mie impliquent généralement d'innombrables réflexions internes, et donc de longues trajectoires à l'intérieur des gouttelettes, il est possible qu'une minuscule gouttelette absorbe une quantité importante de rayonnement, surtout si l'eau contient des polluants qui l'assombrissent. L'évolution de la couche nuageuse moyenne – qui reste à préciser – contribuera-t-elle alors au réchauffement de la Terre en piégeant les rayons infrarouges ? Ou préservera-t-elle au contraire la fraîcheur de la planète en réfléchissant

LA CONTRIBUTION ESSENTIELLE PROVIENT des rayons introduits dans la gouttelette par effet tunnel et ayant subi des résonances de Mie.

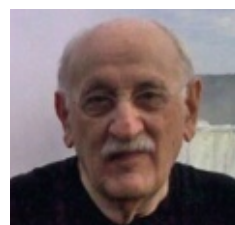
davantage la lumière du Soleil et en la renvoyant dans l'espace ? On l'ignore encore.

Nous avons tout de même progressé. Plusieurs simulations de la diffusion de la lumière par les nuages ont été réalisées depuis une dizaine d'années. L'expression mathématique établie par Mie a ainsi été calculée pour un petit nombre de diamètres de gouttelettes, que l'on pensait représentatifs.

Cette restriction a réduit le temps de calcul, mais reste problématique. Comme je l'ai montré en 2003, elle peut entraîner des erreurs allant jusqu'à 30 pour cent sur la quantité de lumière absorbée par les nuages dans des bandes étroites du spectre. En outre, elle risque de masquer des phénomènes importants tels que des résonances : par exemple, si on effectue les calculs pour des gouttelettes de un, deux, trois, etc., micromètres, on peut manquer une résonance à 2,4 micromètres. Le peu de précisions de ces simulations a été confirmé en 2006 par une étude qui a pris en compte la répartition des tailles de gouttelettes dans l'atmosphère. Ces dernières années, les modèles ont été actualisés pour inclure des incréments de taille de gouttelettes plus petits.

Wigner l'avait noté : des résultats, même issus de supercalculateurs de dernière génération, sont inutiles sans une compréhension physique du phénomène. À méditer, peut-être, la prochaine fois que vous prendrez place près d'un hublot. ■

L'AUTEUR



Moyses NUSSENZVEIG est professeur émérite de physique de l'Université fédérale de Rio de Janeiro, au Brésil. Il a reçu le prix Max Born de la Société américaine d'optique en 1986.

✓ BIBLIOGRAPHIE

H. M. Nussenzveig, *Light tunneling*, *Progress in Optics*, vol. 50 (éd. E. Wolf), Elsevier, 2007.

C. S. Zender et J. Talamantes, *Solar absorption by Mie resonances in cloud droplets*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 98(1), pp. 122-129, 2006.

H. M. Nussenzveig, *Light tunneling in clouds*, *Applied Optics*, vol. 42(9), pp. 1588-1593, 2003.

H. M. Nussenzveig, *Diffraction Effects in Semiclassical Scattering*, Cambridge University Press, 1992.

MUCOVISCIDOSE

À la recherche des mutations génétiques en cause

Steven Rowe, John Clancy et Eric Sorscher

Une meilleure compréhension des mécanismes biologiques responsables de la mucoviscidose devrait aboutir à la mise au point de nouveaux médicaments.

L'ESSENTIEL

✓ La mucoviscidose est une maladie héréditaire grave, la sécrétion d'un mucus épais entraînant des difficultés respiratoires et digestives.

✓ Le gène codant la protéine CFTR, impliquée dans la régulation des ions chlore, est muté.

✓ Plusieurs mutations ont été identifiées, ce qui explique que la maladie est plus ou moins grave.

✓ De nouveaux traitements visant à compenser les anomalies de la protéine CFTR sont en cours d'essais cliniques.

En 1989, les scientifiques ont découvert le gène responsable de la mucoviscidose, une maladie souvent grave, qui touche plus de 70 000 personnes dans le monde dont 5 000 à 6 000 en France. Avec l'identification du gène, il semblait qu'un traitement, attendu depuis longtemps, allait bientôt être disponible. La version normale du gène, introduite dans l'organisme du malade, devait produire des protéines fonctionnelles. L'espoir était grand pour les malades souffrant de mucoviscidose, qui décédaient en général avant d'avoir 30 ans. Aujourd'hui, ce seuil fatal a été repoussé d'une dizaine d'années pour la moitié des malades. Restait une question cruciale : les généticiens seraient-ils capables d'insérer de façon fiable le gène normal dans l'organisme des malades ?

La tâche se révéla plus compliquée que prévu. Bien que les généticiens aient réussi à construire des virus pour transporter des copies du gène « thérapeutique » dans les cellules des malades, les virus étaient peu efficaces et rapidement détruits par le système immunitaire du malade. À la fin des années 1990, on dut se rendre à l'évi-

