

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 Kurniawan

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 Guimaraes, 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.

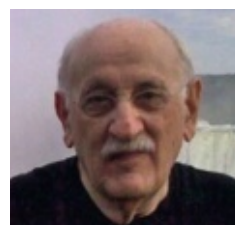
davantage la lumière du Soleil et en la renvoyant dans l'espace ? On l'ignore encore.

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.