

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.

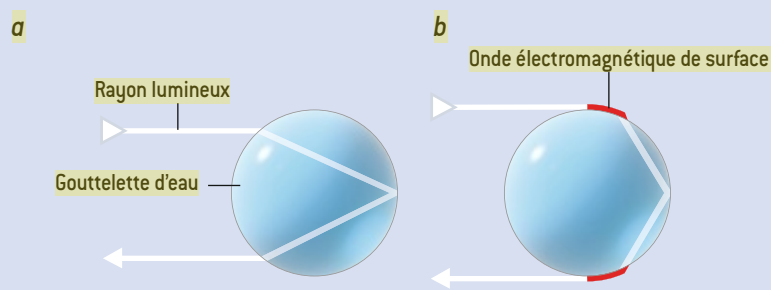
Ainsi, dans certaines circonstances, l'énergie lumineuse peut s'échapper d'un milieu où elle devrait rester confinée. Examinons de quelle façon. En règle générale, la lumière se propageant dans un milieu tel que le verre ou l'eau est totalement réfléchie si elle heurte, avec un angle assez petit, la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

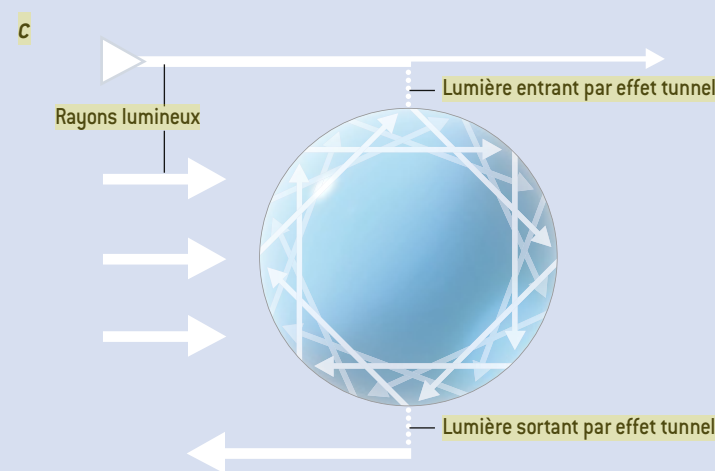
Les chercheurs ont d'abord attribué ce phénomène à la réflexion de la lumière à l'intérieur des minuscules gouttelettes d'eau qui composent les nuages. Les rayons auraient été déviés en pénétrant dans la gouttelette (c'est la réfraction), se seraient réfléchis à l'intérieur, puis auraient été de nouveau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



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 évanescentes 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 évanescentes, la lumière peut reprendre sa propagation externe dans ce troisième milieu ; son énergie est alors « siphonnée » à travers la brèche ouverte par les ondes évanescentes. 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.

