Halos atmosphériques

Auteur :
PUJOL Olivier, Maître de conférences à l'Université de Lille, LOA (Laboratoire d'optique atmosphérique)

27-09-2018

Dans l'atmosphère terrestre, la lumière offre souvent un spectacle que la simple observation du ciel à l'œil nu permet d'apprécier. De façon générique, les phénomènes lumineux atmosphériques sont appelés photométéores, du grec « photo » et « meteora » qui signifient respectivement « lumière » et « qui est en l'air » [1]. L'arc-en-ciel et la gloire (Lire les focus Spectaculaires arcs-en-ciel et L'étonnant spectre de Brocken), qui résultent de l'interaction de la lumière avec des gouttes d'eau, sont des exemples bien connus. Les cristaux de glace produisent eux aussi des photométéores appelés halos atmosphériques. Étymologiquement, le terme « halo » se rapporte à une auréole [2], c'est-à-dire, ici, à un cercle lumineux entourant le Soleil, la Lune ou, éventuellement, toute autre source lumineuse. Plus largement, un halo atmosphérique est une accumulation plus ou moins forte de lumière, vue dans le ciel sous la forme d'une tache, d'un cercle, ou d'un arc, causée essentiellement par la réfraction et/ou la réflexion de la lumière par des cristaux de glace. Il existe une grande variété de halos, certains étant fréquents, d'autres beaucoup plus rares et, d'autres encore, seulement prédits. Parfois colorés, leur observation nous informe sur les propriétés des cristaux de glace dans l'atmosphère.

Les premières observations de halos datent de l'Antiquité, mais ce n'est qu'à partir du XVII^{e} qu'une approche scientifique (synthétique, explicative et prédictive) se développe avec les travaux sur l'optique de Descartes [3] et de Huygens [4]. Un coup d'accélérateur est ensuite donné aux XVIII^{e} et XIX^{e} avec des observations plus nombreuses et plus précises et grâce aux études détaillées de physiciens comme Arago, Babinet, Bravais, Mariotte, Venturi et Young. Bravais est d'ailleurs l'auteur d'un mémoire

[5] complet sur les halos atmosphériques connus au XIX^{e}.

1. Quelques propriétés essentielles de la glace

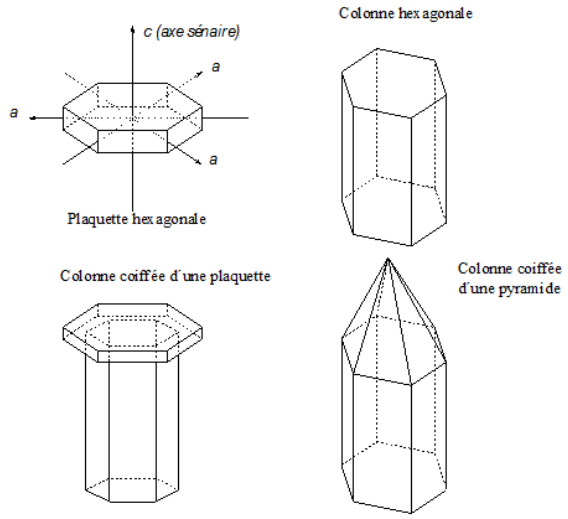


Figure 1. Les quatre formes de cristaux responsables de la majorité des halos atmosphériques. La structure de base est celle d'un hexagone régulier. S'y ajoutent parfois des polyèdres comme des pyramides.

Malgré la grande variété de leurs formes, **quatre types de cristaux** suffisent pour expliquer la majorité des halos atmosphériques (Figure 1) : la **colonne** et la **plaquette hexagonales**, la **colonne coiffée d'une plaquette** et la forme dite en balle de fusil (une **colonne chapeautée par une pyramide**). Ces cristaux présentent une géométrie hexagonale régulière, avec des faces plus ou moins lisses qui constituent des dioptres [20] pour la lumière et possèdent quatre axes de symétrie : trois axes (*a*) coplanaires passant par les sommets de l'hexagone et formant deux à deux un angle de 120^0, puis l'axe sénaire [6] (*c*), qui est perpendiculaire au plan hexagonal.

Dans l'atmosphère, les plus **petits cristaux**, de taille inférieure à quelque 50 microns, ont un mouvement brownien (ou aléatoire) et n'ont donc **pas d'orientation préférentielle**. Entre 50 et 500 micromètres, la pesanteur et le frottement aérodynamique dominent et l'orientation qui offre le moins de résistance à l'air est généralement favorisée. Au-delà, les gros cristaux tournoient autour d'un axe horizontal. Ces comportements, combinés aux réflexions spéculaires [21] et aux réfractions[22] par les faces cristallines, expliquent la diversité des halos. Signalons que plusieurs types et tailles de cristaux coexistent dans l'air ; différents halos apparaissent alors souvent simultanément dans le ciel et forment ce qui est appelé un système de halos.

Par ailleurs, la **glace** présente **deux indices de réfraction**, l'un selon l'axe *a* et l'autre selon l'axe *c*, qui sont très proches et décroissent faiblement du violet au rouge ; leur valeur moyenne peut être prise à environ **1,31**. Cette variation explique pourquoi les halos formés par réfraction sont, en principe, irisés. Les couleurs rouge, orange et jaune sont cependant plus intenses que les couleurs vert et bleu, au moins pour la raison évidente que le fond du ciel est bleu.

Bien qu'ils soient nombreux et d'aspects variés, on peut classer les halos de plusieurs manières : fréquence d'observation, forme, nombre de réfractions et de réflexions (internes ou externes), degré d'orientation des cristaux ou, ce qui revient au même, leur taille. C'est cette dernière possibilité qui est adoptée ici.

2. Halos produits par des petits cristaux d'orientations aléatoires et équiprobables

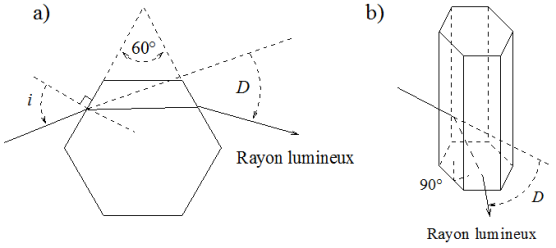


Figure 2. Prismes impliqués dans la formation du halo à 22^o(a) et du halo à 46^o(b). L'angle d'incidence est noté i et la déviation D.

Halo à 22° **–** C'est le plus commun (voir l'image de couverture de l'article). Il s'agit d'un **anneau,** centré sur le Soleil, de **rayon angulaire** très **proche de 22**° et de **largeur angulaire** [23]d'environ **1 à 2**°. Son bord intérieur est très net, parfois rougeâtre, alors que sa partie extérieure est moins franche et parfois teintée de bleu tirant vers le blanc (image de couverture). On explique toutes ces propriétés par la déviation de la lumière par les faces latérales alternées d'un cristal hexagonal qui constituent un prisme d'angle au sommet 60° [7] (Figure 2a). Cette déviation atteint un minimum absolu d'environ 22° où s'accumule la lumière (Lire le Focus sur la Déviation de la lumière). En raison du très grand nombre de prismes présentant de façon équiprobable toutes les orientations entre 0 et 360°, le halo apparaît circulaire dans le ciel [8].

Halo de 46° **–** Similaire au précédent, ce halo **plus large** est toutefois **moins fréquent** et **plus difficilement observable**, d'une part parce que la lumière est redistribuée sur une portion plus grande du ciel et, d'autre part, en raison de rapports hauteur/largeur des cristaux peu favorables. Ce halo implique des faces adjacentes orthogonales qui forment un prisme d'angle droit (Figure 2b) ; le minimum de déviation correspondant à un tel prisme vaut 46° (voir le Focus sur la Déviation de la lumière). Cette explication a été suggérée initialement par Cavendish [9].

Halos inhabituels – D'autres halos, plus rares, mettent en jeu des prismes d'angles différents. Théoriquement, toutes les valeurs comprises entre 0 et 99,5° sont possibles, d'où des halos de rayon angulaire entre 0 et 80° (Lire le Focus sur la Déviation de la lumière). En pratique, des halos entre 4 et 50° ont été observés : les halos de Van Buijsen (8°), Heiden (14°), Hall (17°), Dutheil (24°), Scheiner (28°), Feuillée (32°) et Burney (45°). Ces halos inhabituels sont issus de prismes formés par des **cristaux de forme plus complexes** : la pyramide (Figure 1) peut expliquer certains des angles cités ci-dessus ; pour le halo de Scheiner, il s'agirait d'un cristal très rare de géométrie octaédrique [10]. Signalons enfin **le halo à 90**°, dit **de Hévélius** (1661), très peu observé, inexplicable par les prismes.

Signalons une astuce pour distinguer un halo d'une couronne qui, à l'instar des halos précédents, est aussi un photométéore circulaire : en s'éloignant du centre, l'irisation va du rouge au violet pour un halo ; c'est l'inverse pour une couronne, car elle se forme par diffraction de la lumière.

3. Halos produits par des cristaux de taille intermédiaire

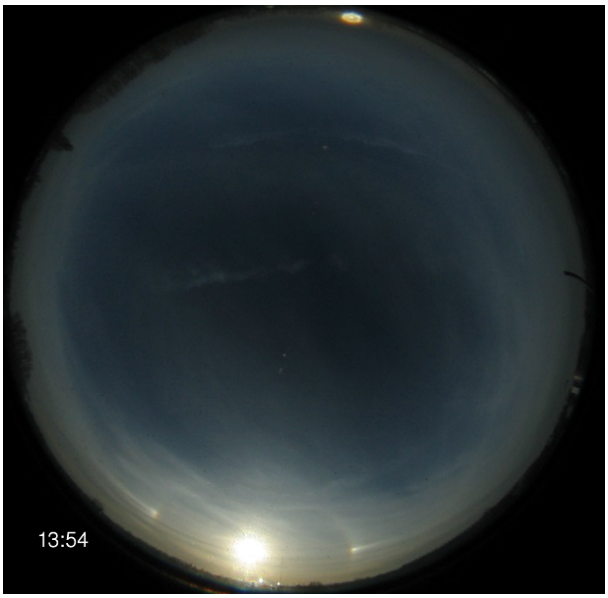


Figure 3. Parhélies étendus autour de 22^0 photographiés par un imageur de ciel (LOA) le 06/12/2012 à 13h54 à Villeneuve d'Ascq (59).

Parhélies– Un parhélie [11], ou faux soleil, est une **tache lumineuse** située à la **même hauteur que le Soleil** et à une certaine distance angulaire de celui-ci. Ils apparaissent parfois par paire, de part et d'autre du Soleil, symétriquement [12], [13].

Le plus commun est voisin du halo **à 22**°. On peut le voir qui accompagne ce dernier sur l'image de couverture, où deux taches lumineuses brillantes sont disposées symétriquement de chaque côté du Soleil. Sa formation implique le prisme à 60° mais dont l'arête est, cette fois, orientée verticalement, comme l'axe sénaire. Cette orientation est déterminante car les rayons lumineux incidents sont alors obliques par rapport à la section principale horizontale du cristal, ce qui, après traversée de celui-ci, concentre la lumière à une distance azimutale supérieure à 22° (lois de Bravais) [14]. Voila pourquoi **le parhélie s'étale horizontalement** en fuyant le Soleil (Figure 3) ; ce n'est que lorsque ce dernier est bas sur l'horizon que les parhélies sont collés au halo à 22°. En outre, ils sont colorés, le **rouge** étant **plus proche** du halo **que le bleu** (Figure 4).

Figure 4. Parhélie coloré (rouge, jaune, vert, bleu). La queue du parhélie est si étendue qu'on devine le cercle parhélique. Photo prise par l'auteur le 11/09/2015, à 7h30 (focale 78 mm, pose 1/500) à Villeneuve d'Ascq (59).

Certains parhélies, plus rares, se situent à une **distance azimutale** du Soleil **supérieure à 90**° en valeur absolue. Les exemples les plus connus sont à ± 120° ; ces derniers parhélies ne sont pas colorés. Ils sont produits par un nombre pair de réflexions internes sur les faces verticales des cristaux et par réfraction sur des faces parallèles (Figure 5). Un parhélie entre 150 et 160° a été découvert en 1951 par le météorologue suédois Liljequist [15] en Antarctique. On les appelle parfois des **paranthélies** car ils flanquent le point qui fait face au Soleil (angle azimutal 180°) appelé **l'anthélie** (« anti » veut dire « opposé »). En ce point peut alors apparaître un halo très rare, non coloré, dont le processus de formation n'est pas certain.

La ligne horizontale sur laquelle sont disposés les parhélies et la source lumineuse est appelée **almicantarat** ; ce dernier est matérialisé, totalement ou partiellement, par un **cercle lumineux blanc** dit cercle **parhélique** [16] si la lumière se réfléchit sur des faces verticales sans orientation azimutale privilégiée. Les parhélies sont parfois étalés verticalement et forment alors des arcs dits parhéliques ; on les attribue aux éventuels petits balancements autour de l'orientation verticale.

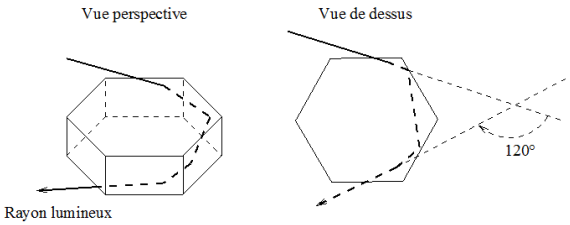


Figure 5. Exemple de formation d'un parhélie à 120^0.

Colonnes lumineuses ou piliers – Ces bandes verticales étroites apparaissent quand le **Soleil** est **juste au-dessus de l'horizon**. De couleur identique à la source, elles se forment par des réflexions à incidence rasante sur la face inférieure des cristaux d'axe sénaire légèrement incliné par rapport à la verticale. Avec des cristaux parfaitement orientés, le pilier est fin et brillant ; tout écart à l'alignement vertical élargit le pilier et réduit sa luminosité. Depuis un avion, on peut voir des piliers sous le Soleil.

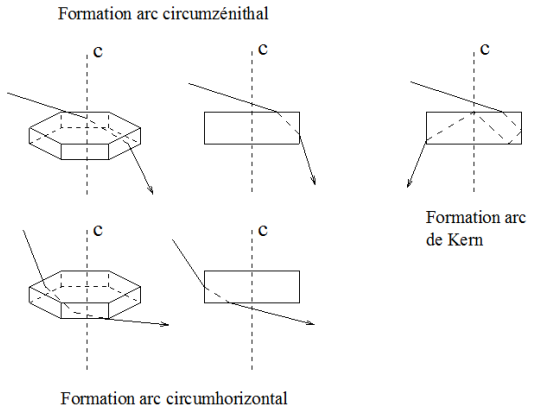


Figure 6. Formation des arcs.

Arcs circumzénithal et circumhorizontal – Ces **arcs complémentaires** sont éclatants et **irisés** du rouge au bleu en progressant vers le zénith ou l'horizon, respectivement. Ils sont formés par des cristaux dont l'axe *c* est vertical et l'arête du prisme d'angle au sommet 90^0 horizontale. Ils peuvent accompagner le halo à 46°. Si la lumière pénètre dans le cristal par la face supérieure et émerge par une face verticale, l'arc est circumzénithal (ou arc de Bravais, Figure 6) ; si elle pénètre par une face verticale et émerge par la face inférieure, l'arc est circumhorizontal (Figure 6). Le premier (Figure 7) entoure en partie le zénith et n'existe que si le Soleil est à une hauteur inférieure à 32°. Au-delà, il y a réflexion totale sur la face latérale verticale interne du cristal. À 32°, le rayon émerge de façon rasante, donc verticalement, et l'arc circumzénithal apparaît alors sous forme d'un point brillant au zénith. L'arc est le plus brillant si le Soleil est à 22° de hauteur ; il effleure le halo à 46° si celui-ci est présent. L'arc circumhorizontal, qui entoure en partie l'horizon et peut donc être masqué par le paysage, se comporte de façon similaire : il n'existe que si le Soleil est plus haut que 58° et brille le plus pour une hauteur solaire de 68° [17].

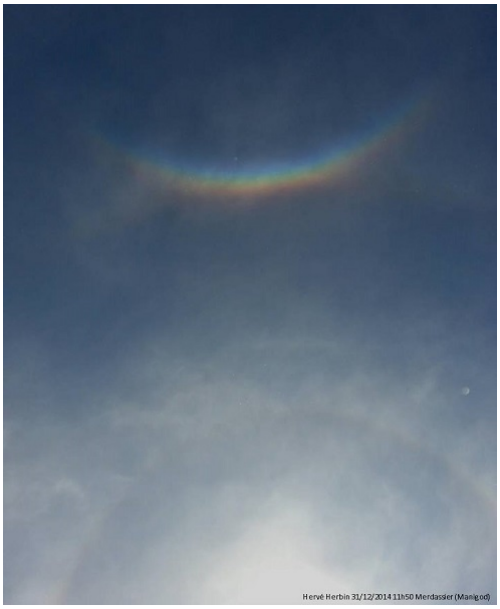


Figure 7. Arc circumzénithal. [Source : H. Herbin (LOA, Lille)].

En regard de l'arc circumzénithal, on voit parfois un arc qui complète le cercle centré sur le zénith : l'arc de Kern. Il est dû à des réflexions internes de la lumière avant de ressortir par une face verticale opposée (Figure 7).

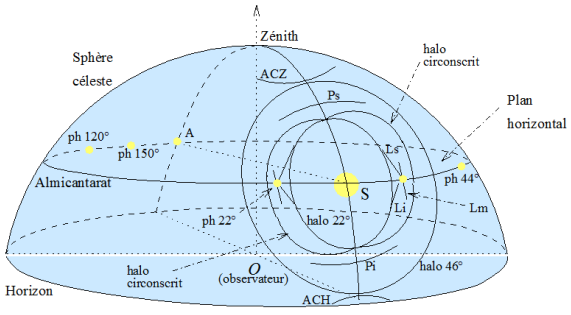
Arcs de Parry – Ces arcs sont formés par des **cristaux d'axe *c* horizontal** avec des **paires de faces opposées,** elles aussi **horizontales**. Ils sont placés **au-dessus** et **au dessous du halo à 22^0**, leur concavité tournée vers le halo ; ils vont par paires, mais apparaissent confondus. Ils tirent leur nom de l'amiral britannique Sir William Edward Parry [18] qui explora l'Arctique au début du XIX^e ; il décrivit de nombreux halos dans ses notes de voyages.

Sous-soleil – Depuis un avion, on voit parfois **sous l'horizon,** symétrique au Soleil, une **tache lumineuse** elliptique ; c'est un sous-soleil. Il **résulte de la réflexion** de la lumière solaire **par des faces horizontales de cristaux**. Le sous-soleil est circulaire si les cristaux sont parfaitement alignés. Ce halo est occasionnellement auréolé d'un anneau dit de Bottlinger.

2. Halos produits par de gros cristaux

En tournoyant, les gros cristaux forment des halos rares et complexes dont l'apparence dépend fortement de l'altitude du Soleil. Il s'agit d'arcs, latéraux et tangents au halo à 22° pour certains et à celui à 46° pour d'autres. Ils sont irisés en principe puisqu'ils se forment par réfraction.

Halo circonscrit au halo de 22°– Il se manifeste, quand le Soleil est proche de l'horizon, sous la forme de **deux arcs tangents** au halo à 22° en ses points supérieur et inférieur. Ces deux arcs s'allongent en se rapprochant l'un de l'autre lorsque le Soleil monte dans le ciel ; ils circonscrivent le halo à 22° quand le Soleil atteint 30° de hauteur. Le Soleil poursuivant son ascension, ce halo se rapetisse, devient symétrique, et finit par se confondre avec le halo à 22° (Soleil à 70° de hauteur) ; il est formé par les prismes de 60° de colonnes d'axe *c* horizontal et en rotation autour de celui-ci.



A = anthélie ; ACZ = arc circumzénithal ;ACH = arc circumhorizontal ; Li, Lm et Ls = arcs de Lowitz infralatéral,mesolatéral et supralatéral ; ph = parhélie ; Ps et Pi = arcs de Parry supérieur et inférieur ; S = Soleil

Figure 8. Halos sur la sphère céleste. Ils sont schématisés ici à titre illustratif, sans souci quelconque de leurs conditions d'apparition.

Arcs latéraux de Lowitz– Ils sont trois et **passent par le parhélie à 22°** : l'arc supralatéral et l'arc infralatéral sont respectivement au-dessus et en dessous du Soleil ; l'arc mésolatéral est vertical traversant le parhélie. C'est le chimiste germano-russe Tobias Lowitz [19] qui les observa le premier à Saint-Pétersbourg en 1790. Ces arcs sont formés par les prismes d'angle 60° constitués par des plaquettes en rotation autour d'un axe *a*.

Arcs tangents et latéraux du halo à 46°– Cette fois ce sont les **prismes de 90° qui sont impliqués**. Les arcs tangents ont été prédits par des simulations numériques ; les arc latéraux (supra et infra) ont, eux, été peu photographiés et sont rares.

5. Influence de quelques paramètres

Jusqu'à présent, nous avons considéré des cristaux de géométrie régulière avec des faces supposées assez lisses, éclairées par une source ponctuelle, et nous avons utilisé les lois bien connues de l'optique géométrique. Si la réalité était aussi simple, on observerait davantage de halos. En fait, un cirrus n'est pas toujours un milieu homogène de cristaux, car ces derniers ont souvent des surfaces rugueuses qui diffusent la lumière, des géométries irrégulières, des défauts de symétries et des impuretés (aérosols, bulles d'air) internes qui perturbent, voire détruisent, la formation des halos.

La densité des cristaux est aussi importante : le trajet de la lumière peut être modifié par plusieurs cristaux successivement ; c'est **la diffusion multiple,** qui est responsable, par exemple, des parhélies à +/- 44° (un rayon lumineux dévié deux fois à ± 22° par deux cristaux). Par ailleurs, la source lumineuse (Soleil, Lune) est large ; chacun de ses points donne son propre système de halos. Ces derniers se superposent et le halo résultant apparaît alors plus large, moins net et aux couleurs délavées. Enfin, la diffraction, importante pour les petits cristaux, tend aussi à élargir les halos et à ternir leur irisation. L'observation d'un halo révèle donc beaucoup d'informations sur le degré d'homogénéité d'un nuage et les caractéristiques de ses cristaux constitutifs.

Les halos constituent un vaste sujet d'optique atmosphérique, couplé à la météorologie et à la cristallographie de la glace. La variété des halos et leurs propriétés dépendent de la géométrie des cristaux et de leur degré d'orientation dans l'espace. Certains demeurent d'explication incertaine, voire inconnue ; c'est le cas, par exemple, des halos elliptiques et de l'arc en forme de « V » de Moilanen qui se trouve à mi-chemin entre le Soleil et la partie supérieure du halo à 22°. Quelles informations sur les cristaux ces halos nous apportent-ils ? Inversement, choisissant une géométrie, quels halos peut-on former ? Enfin, qu'en est-il sur d'autres planètes ? La **simulation numérique** et l'**observation** sont **indispensables** pour répondre à ces questions. Espérons que cet article sur quelques aspects des halos terrestres aura attisé la curiosité du lecteur sur ces beaux photométéores et l'incitera à lever les yeux au ciel. Puisse chacun être un observateur attentif et aiguiser son esprit physique. Car nous sommes tous des potentiels découvreurs de halos !

Références et notes

Photo de couverture: Halo à 22° irisé (bord intérieur net, rouge, et bord extérieur plus diffus, bleuâtre). [Source : Hervé Herbin (LOA, Lille)].

[1] A. Rey : Dictionnaire historique de la langue française. Ed. Le Robert (2012), 4200 p. (Toutes les notes étymologiques de cet article proviennent de ce dictionnaire.)

[2] Le mot « halo » provient du grec « *halôs* » qui désigne l'aire (disque) où l'on bat le blé pour séparer le grain de la balle, d'où par extension une surface circulaire puis une auréole.

[3] R. Descartes : La dioptrique. Les météores. Dans « Discours de la méthode, pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les Sciences », 1637, Ed. de Ch. Angot, Paris, 1668

[4] Œuvres complètes de Christiaan Huygens : Traité des couronnes et des parhélies (De coronis et parheliis). 1662 ou 1663. Société Hollandaise des sciences, Tome 17

[5] Bravais A., 1847 : *Mémoire sur les halos et les phénomènes optiques qui les accompagnent.* Journal de l'École Royale Polytechnique, Cahier 39, XVIII, Paris. Ce mémoire, qui n'a pas vraiment vieilli, offre une description très détaillée, en termes d'observation et d'explication théorique, et contient un grand nombre de références historiques.

[6] Cet axe est dit sénaire car le cristal se retrouve six fois dans la même configuration par une rotation de 360° autour de cet

axe.

[7] L'explication par ce prisme est due à Mariotte : Œuvres de Mariotte, Traité des couleurs, 1686

[8] On a là une illustration du principe de Curie selon lequel les conséquences (géométrie du halo) ont au moins les symétries des causes (équiprobabilités des orientations cristallines).

[9] D'après T. Young, A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts. 1807. Vol. II, p. 308 (« *Mr. Cavendish suggested, with great probability, that...* »).

[10] Whalley E. 1981, *S*cheiner's Halo: Evidence for IceIc in the Atmosphere. Science, **211**, 389-390

[11] Les mots grecs « *para* » et « *helio* » signifient « près de » et « Soleil ».

[12] Voir aussi le texte historique : Bravais A., 1845 : Notice sur les parhélies situés à la même altitude que le soleil. Journal de l'École Royale Polytechnique, Cahier 30, XVIII, Paris

[13] Si la source lumineuse est la Lune, on parle de parasélènes (Séléné est la déesse de la pleine lune dans la mythologie grecque).

[14] Les lois de Bravais portent sur la réfraction d'un rayon lumineux dont l'incidence est oblique, c'est-à-dire forme un angle θ non nul, par rapport au plan de la section principale d'un cristal. Il y a deux lois : (1) Le rayon incident et le rayon émergent sont également inclinés (conservation de l'obliquité θ) ; (2) Le rayon incident projeté sur le plan de la section principale est dévié selon la loi de Snell-Descartes comme s'il rencontrait un prisme d'indice de réfraction $[1 + (n^2 - 1) / \cos^2 \theta\ ]^{1/2}$

[15] Liljequist, G. H., Halo-Phenomena and Ice-Crystals, in Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949-52, Scientific Results, Volume 2, Part 2A, Oslo, 1956

[16] Cette appellation est due à Babinet (Babinet 1837 : Mémoire d'optique météorologique. Académie des Sciences, 638-648).

[17] Les angles 58° et 68° sont complémentaires aux angles 32° et 22° : 90°- 32° = 58° et 90°- 22° = 68°.

[18] Parry W.E., Journal of a Voyage for the Discovery of a North-West Passage from the Atlantic to the Pacific; Performed in the years 1819-'20, in His Majesty's Ships Hecla and Griper ... with an Appendix Containing the Scientific and Other Observations... London (1821)

[19] Lowitz T., 1794, Description d'un météore remarquable observé à St. Pétersbourg le 18 Juin 1790. Nova Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae, 8, 384-388

[20] Surface de séparation entre deux milieux de propriétés optiques différentes

[21] La réflexion du rayon incident se fait dans une seule et unique direction, conformément aux lois de Descartes. Si le rayon est réfléchi dans plusieurs directions, la réflexion est dite diffuse

[22] Déviation de la lumière lorsqu'elle traverse un dioptre

[23] Une distance (rayon, largeur, taille, etc.) angulaire est l'angle entre deux points d'un cercle dont le centre (ou sommet de l'angle) est occupé par l'observateur. On parle aussi de distance apparente

---

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** PUJOL Olivier (2018), Halos atmosphériques, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=1799

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.