

Classification des phénomènes de halos

Résultats analytiques et découvertes récentes⁽¹⁾

par **Luc DETTWILLER**

Docteur en Optique et traitement du signal

*Professeur de physique en PC**

Lycée Blaise Pascal - 63037 Clermont-Ferrand Cedex

dettwillerluc@voila.fr

RÉSUMÉ

On présente un résumé de la théorie des halos sous forme d'aide-mémoire. Pour classer les différents halos, on distingue ceux dus seulement à la réfraction de ceux où intervient la réflexion, et on ordonne les résultats fournis par l'optique géométrique selon les degrés de liberté d'orientation des divers prismes de glace. Ensuite, on indique quels sont les effets perturbateurs susceptibles de modifier légèrement l'apparence des halos, ou de les compliquer – notamment au niveau de leur polarisation. Pour finir, on donne quelques pistes montrant l'intérêt d'une observation active de ces phénomènes passionnants qui méritent encore d'être surveillés.

Dans les phénomènes de l'optique atmosphérique, les halos forment un vaste sous-ensemble par leur nombre et leur grande variété. Certaines formes sont banales et faciles à comprendre, ou fréquentes et bien expliquées ; d'autres sont très surprenantes (comme les faux soleils), ou complexes et difficiles à étudier ; enfin, certaines sont très rares et d'explication incertaine. Le mécanisme fondamental de ces phénomènes est l'interaction de la lumière avec les cristaux de glace présents dans l'atmosphère. Leurs principales formes sont des colonnes à base hexagonale régulière, ou des plaquettes (*i.e.* ces mêmes colonnes, de hauteur très faible par rapport au côté de l'hexagone). Leurs faces sont planes, mais leurs orientations ne sont pas figées : si la plus grande dimension d'un de ces cristaux est inférieure à 50 μm typiquement, il se trouve soumis au mouvement brownien et toutes les orientations sont pour lui quasiment équiprobables ; de 50 à 500 μm environ, le poids du cristal et le frottement de l'air l'emportent et il s'oriente dans sa chute, chaque plaquette et l'axe (*sénaire*) de chaque colonne étant alors sensiblement horizontaux (ce fait peut sembler surprenant pour les colonnes, mais a été confirmé par différentes études) ; pour plus de 500 μm , toute plaquette peut se mettre à tourner autour d'un axe horizontal pendant sa chute.

(1) **NDLR** : Cet article est publié simultanément dans le *Bulletin de l'Union des professeurs de spéciales*, n° 212, octobre 2005, p. 20-34.

Divers articles de vulgarisation résument fort bien la théorie des halos (*cf.* par exemple [17-18]) ; notre propos n'est pas de répéter ces beaux textes dont nous conseillons vivement la lecture. Nous nous fixons ici un but plus technique, consistant à livrer une classification des phénomènes de halos ; compte tenu de leur grande diversité, une telle présentation, basée sur les mécanismes physiques de leur formation, sera utile à quiconque souhaite approfondir la connaissance de ces beaux phénomènes naturels et les observer avec précision. Il faudrait de très nombreux schémas pour illustrer notre propos, mais leur quantité rend impossible leur reproduction dans le volume normal d'un article, qui veut seulement être un aide-mémoire de physique des halos.

L'étude actuelle des halos n'est pas figée, pour plusieurs raisons.

- ◆ D'abord, leur compréhension n'est pas que du ressort de l'optique : elle fait aussi intervenir la thermodynamique, la cristallographie, la météorologie. On peut donc appréhender ces phénomènes sous des angles différents, ce qui s'avère fécond. Ainsi, le rapprochement avec ces autres parties de la physique a permis de proposer en 1981 la première explication satisfaisante d'un halo très rare (dont les premières mentions datent de 1629, puis 1727, 1747 et 1906) : il serait dû à la présence exceptionnelle, dans la haute atmosphère, d'une variété de glace qui ailleurs sur Terre ne se forme jamais naturellement.
- ◆ Ensuite, on continue à observer de nouveaux halos ! Par exemple, ceux qui furent découverts fin 1997 confirment l'explication du halo rare mentionné ci-dessus ; et on en a encore découvert d'autres fins 1998...
- ◆ Enfin, l'analyse détaillée des halos ou de certaines de leurs caractéristiques donne toujours lieu à des publications dans les revues de recherche en optique. Les moyens modernes de calcul par ordinateur permettent de pousser plus loin certaines investigations théoriques, ce qui oblige parfois à réviser des explications précédemment admises comme classiques.

En écho aux conférences que nous avons données à Paris sur ce sujet dans le cadre de l'Année mondiale de la physique, nous avons rédigé l'aide-mémoire qui suit ; sa lecture sera forcément aride... Nous l'offrons aux lecteurs seulement parce que nous espérons qu'il puisse rendre service, en tant qu'outil de travail qui rassemble des données éparses ou très récentes et parfois difficiles à trouver. Nous les présentons selon deux grands axes : d'abord, une classification des halos, d'après leur modélisation standard au moyen de l'optique géométrique ; ensuite, l'impact de phénomènes complémentaires qui ne peuvent être omis dans une étude un peu complète. La conclusion de ce chapitre résumé d'optique atmosphérique peut être utilisée pour montrer l'aspect dynamique de la connaissance, sur l'exemple d'une théorie physique qu'on aurait pu croire déjà achevée.

1. MODÈLE GÉOMÉTRIQUE STANDARD

Principes

- ◆ La source S de lumière (blanche) est supposée ponctuelle et à l'infini ; dans la suite

de l'exposé nous l'appellerons conventionnellement aussi le Soleil, car pour les halos c'est la situation usuelle.

- ♦ Les cristaux de glace sont considérés comme des systèmes optiques formés d'une succession de dioptries et/ou de miroirs idéalement plans, donc rigoureusement stigmatiques pour tout objet à l'infini.
- ♦ On néglige les effets d'ombre portée par un cristal sur les autres.
- ♦ On suppose l'existence d'un très grand nombre de cristaux situés dans quasiment toutes les directions du ciel visibles depuis l'observateur.
- ♦ On se limite à l'étude des images suffisamment lumineuses données par ces cristaux, et donc formées avec assez peu de réflexions partielles, car sur la glace (d'indice voisin de 1,31) le facteur de réflexion en incidence normale n'est que de 1,8 %.
- ♦ On néglige dans un premier temps les phénomènes de diffraction, de polarisation, de diffusion multiple (ils seront pris en compte au paragraphe 2.).

Avec toutes ces hypothèses, l'ensemble des halos est symétrique par rapport au vertical⁽²⁾ de S .

Déviation des rayons par un prisme ; formules de BRAVAIS

À cause de la planéité des faces des cristaux, les lois de base permettant de comprendre la formation des principaux halos sont celles de l'optique géométrique concernant la déviation des rayons lumineux par un prisme d'angle dièdre A et d'indice relatif (par rapport à son milieu extérieur qui sera l'air pour notre propos) $n > 1$. Nous les rappelons brièvement ici, en considérant que les deux faces utiles du prisme sont infinies. Pour les cristaux de glace décrits ci-dessus, les valeurs possibles pour A sont 120° , 90° , et 60° – entre deux faces non adjacentes.

Considérons d'abord un rayon dans un plan (π) de section principale (i.e. normal à l'arête du prisme). Il ne peut émerger que si A est inférieur à $A_i = 2i_i$ où $i_i \equiv \arcsin \frac{1}{n}$ désigne l'angle d'incidence limite sur la deuxième face ; pour $n \cong 1,31$, $A_i \cong 99,5^\circ$. La déviation du rayon est une fonction $D(i, A, n)$ telle que $\partial D / \partial A > A$ et $\partial D / \partial n > 0$. Lorsque $A \leq A_i$, le rayon peut émerger si, et seulement si, l'angle d'incidence i (compté positivement vers la base du prisme) est supérieur ou égal à $i_0(A, n) \equiv \arcsin[n \sin(A - i_i)]$. Pour n et A fixés, aux deux bornes de son domaine de définition la déviation atteint sa valeur maximale $D_m(A, n) \equiv D(i_0, A, n) = D(90^\circ, A, n)$; pour l'incidence $i_m(A, n) \equiv \arcsin\left(n \sin \frac{A}{2}\right)$ elle prend sa valeur minimale $D_m(A, n) = 2i_m - A$, qui croît avec n et A ainsi que i_m . Pour les composantes spectrales de la lumière allant, par exemple, de la raie de FRAUNHOFER C rouge à la raie F bleue, l'indice varie de $\delta_\lambda n$ (environ 0,03 pour la glace), donc la déviation minimale varie aussi de

(2) appelé aussi *sûmut* : c'est le « méridien » de S sur la sphère céleste, en prenant pour pôles le zénith et le nadir.

$\delta_\lambda D_m$. Le tableau ci-dessous rassemble des valeurs numériques⁽³⁾ qui seront utiles, pour $n \cong 1,31$.

A	i_0	i_m	D_m	$\delta_\lambda D_m$	D_M
60°	13°	41°	22°	0,5°	43°
90°	58°	68°	46°	1,4°	58°
$A_i \cong 99,5^\circ$	90°	90°	80,5°	impossible	80,5°

Tableau 1

Mais pour comprendre les halos, il faut aussi considérer les rayons ($\mathcal{R}$) faisant, avant le prisme, un angle θ avec (π). Leur étude a été menée par BRAVAIS, qui a dégagé les lois suivantes :

- ◆ la projection ($\mathcal{P}$) de ($\mathcal{R}$) sur (π) pourrait être un rayon dans (π) si l'on remplaçait pour celui-ci l'indice n du prisme par l'indice effectif $n_{\text{eff}} = \sqrt{1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 \theta}}$; la déviation D_θ de ($\mathcal{P}$) est donc donnée par $D_\theta(i, A, n) = D(i, A, n_{\text{eff}})$ où i désigne l'angle d'incidence de ($\mathcal{P}$) sur la face d'entrée ;
- ◆ après le prisme, l'angle que fait le rayon avec (π) est aussi égal à θ (**conservation de l'obliquité**) ;
- ◆ la déviation $\Delta_\theta(i, A, n)$ de ($\mathcal{R}$) est reliée à $D_\theta(i, A, n)$ par la formule $\sin \frac{\Delta_\theta}{2} = \sin \frac{D_\theta}{2} \cos \theta$.

On peut en tirer diverses conséquences importantes concernant les halos :

- ◆ pour n , A et θ fixés, mais i décrivant tout l'intervalle permettant au rayon d'émerger, D_θ et Δ_θ atteignent leurs minima respectifs $D_{\theta m}(A, n)$ et $\Delta_{\theta m}(A, n)$ pour le même i – de même pour leurs maxima $D_{\theta M}(A, n)$ et $\Delta_{\theta M}(A, n)$;
- ◆ des calculs (numériques) montrent que $\Delta_{\theta m}(A, n) > D_m(A, n)$ pour $\theta \neq 0$, mais que dans certains cas $\Delta_{\theta M}(A, n)$ est supérieur à $D_m(A, n)$;
- ◆ comme $D_{\theta m}(A, n) = D_m(A, n_{\text{eff}})$ croît avec n_{eff} qui lui-même croît avec $|\theta|$, on voit que $D_{\theta m}(A, n) \geq D_m(A, n)$ car $D_{\theta m}(A, n)$ est une fonction croissante du paramètre $|\theta|$, ayant comme valeur maximale $180^\circ - A$ lorsque $|\theta|$ atteint sa borne supérieure (notée H_i au § 1.1.2.1.).

1.1. Halos irisés dus à la déviation de la lumière par des cristaux jouant le rôle de prismes

La dispersion de la glace est normale dans le domaine visible : son indice de réfraction n croît, de $\delta_\lambda n$, de la raie rouge C de l'hydrogène (656,3 nm de longueur d'onde) à

(3) arrondies bien sûr, mais celles qui apparaissent égales le sont rigoureusement, tandis que celles qui apparaissent complémentaires ne le sont qu'approximativement.

sa raie bleue F (486,1 nm) ; le pouvoir dispersif est $(\delta_\lambda n)/n \cong 1/47$. C'est pourquoi les halos dus à la réfraction doivent *a priori* présenter des irisations⁽⁴⁾.

1.1.1. Avec des cristaux d'orientations quelconques, équiprobables

1.1.1.1. Halo de 22°

Ce halo est lié à l'accumulation de lumière au minimum de Δ_θ valant $D_m \cong 22^\circ$ environ pour un prisme de glace d'angle $A = 60^\circ$. Le minimum de déviation est le plus faible pour le rouge, qu'on voit donc sur le bord intérieur d'un cercle bien lumineux de 22° de rayon, centré sur S ; plus vers l'extérieur, on voit un cercle orange, puis jaunâtre peu visible, et verdâtre très rarement (les couleurs sont de plus en plus délavées à cause du mélange de plus en plus grand entre les différentes composantes spectrales formant des halos décalés).

Souvent le cercle de 22° de rayon a une luminosité non uniforme : cela peut venir d'une densité de cristaux non uniformes, ou d'orientations non équiprobables, privilégiant par exemple les directions verticale et horizontales pour les arêtes (cas des cristaux en forme de colonnes à capuchon et de balles de revolver respectivement, cf. § 1.1.1.3.) - alors il y aura quatre parties plus brillantes. Quand on voit le cercle de 22° en entier, on le croit souvent ovale, de grand axe vertical ; ce n'est qu'une illusion perceptive (cérébrale) classique.

1.1.1.2. Halo de 46°

Ce halo, similaire au précédent, est lié au minimum de $\Delta_\theta(i, 90^\circ, (1, 31))$ valant $D_m(90^\circ, (1, 31)) \cong 46^\circ$. La pureté et l'ordre des couleurs sont inchangés, même si celles-ci sont plus étalées. Ce halo est plus rare, car si les cristaux sont en forme de balle de revolver majoritairement, il y a moins d'arêtes avec $A = 90^\circ$. Ce halo est aussi moins lumineux car :

- ♦ il est plus large ;
- ♦ l'incidence des rayons utiles est plus grande, donc il y a plus de lumière perdue par réflexion partielle à l'entrée ;
- ♦ pour les faisceaux utiles, si on compare à la situation donnant naissance au halo de 22° avec des cristaux de mêmes dimensions, on voit que les aires utiles des faces sont plus petites : les faisceaux subissant la déviation minimale 22° par un prisme d'angle $A = 60^\circ$ peuvent émerger d'une colonne en s'appuyant sur toute la surface de la face d'entrée ainsi que toute celle de sortie ; ce n'est plus vrai pour les faisceaux subissant la déviation minimale 46° par un prisme d'angle $A = 90^\circ$.

(4) Les couleurs de l'arc-en-ciel s'expliquent aussi par la dispersion de l'eau liquide ; mais alors que l'indice de celle-ci (1,33) est légèrement supérieur à celui de la glace, dans le visible, son pouvoir dispersif est inférieur (1/56) ! Ce n'est qu'une des nombreuses anomalies remarquables affectant l'eau, le liquide pourtant le plus courant sur Terre...

1.1.1.3. Arcs rares

En plus des colonnes et des plaquettes, il y a bien d'autres formes possibles pour les cristaux de glace présents dans l'atmosphère : par exemple, une colonne coiffée d'une plaquette (nous l'appellerons « colonne à capuchon »), une colonne se terminant par une pyramide (« balle de revolver »), une bipyramide tronquée, etc.

Contrairement aux angles A entre faces considérées jusqu'à présent, ceux entre les faces triangulaires des pyramides, trapézoïdales des pyramides tronquées, et rectangulaires ou hexagonales des colonnes, sont variés. Ainsi s'expliquent les halos circulaires de rayons angulaires inhabituels, allant de 4° à plus de 40° : citons les halos de VAN BUIJSEN ($8,3^\circ$), HEIDEN ($14,2^\circ$), RANKIN ou HALL ($17,4^\circ$), BURNEY (19°), DUTHEIL (24°), FEUILLÉE ($32,3^\circ$)... ; et le 20 novembre 1998 on a découvert des halos de $5,4^\circ$ et $11,8^\circ$!

Remarques

- ◆ Les cristaux hexagonaux de glace donnent aussi des prismes d'angle $A = 120^\circ$; mais comme sa valeur dépasse $A_g \cong 99,5^\circ$, un tel prisme ne peut laisser passer la lumière sans réflexion totale.
- ◆ Comme les prismes ont trois degrés de liberté d'orientation, mais que la sphère céleste n'a que deux dimensions, sur elle le halo est à deux dimensions ; notons bien qu'ici et dans la suite de cet article nous appelons « halo » toute la distribution de lumière vue sur le ciel à cause de la présence des cristaux, et pas seulement sa partie où la lumière s'accumule (appelée « domaine d'accumulation ») - qui est donc la plus lumineuse mais qui n'en forme qu'une portion.
- ◆ Le mécanisme d'accumulation de lumière est différent de celui de l'arc-en-ciel. Chaque goutte sphérique éclairée par S produit une caustique où la lumière s'accumule, contribuant ainsi à l'arc-en-ciel. Un cristal, ayant des faces planes dans une position donnée, ne produit qu'un ensemble discret de faisceaux parallèles et donc pas de caustique ; mais au voisinage du domaine d'accumulation sur la sphère céleste, la densité angulaire de cristaux donnant des images de la source S vues par l'observateur est beaucoup plus grande.

1.1.2. Avec des cristaux ayant une libre rotation autour de la verticale

Ici on considère un cas où les cristaux ont moins de degrés de liberté, parce qu'ils sont plus gros et que leur chute les oriente ; par exemple, les colonnes à capuchon descendent avec la plaquette qui les coiffe en haut, les balles de revolver avec la pointe de la pyramide en bas ; dans ces deux cas, l'axe sénaire de la colonne est vertical (contrairement à ce qui se passe pour une colonne simple !). Notre classification utilisera dorénavant l'orientation des arêtes des prismes formant les *halos* considérés.

1.1.2.1. Arêtes verticales

Certaines arêtes des cristaux que nous venons de citer sont verticales ; les prismes

correspondants donnent naissance aux parhélies (ou faux soleils, ou « chiens »).

Les prismes n'ont plus qu'un degré de liberté d'orientation, donc le halo est de dimension 1 sur la sphère céleste : c'est un segment d'almicantarar⁽⁵⁾ passant par S , à cause de la conservation de l'obliquité des rayons solaires (c'est donc un arc parallèle à l'horizon) ; son domaine d'accumulation est de dimension 0, constitué de deux points, et ce sont eux qui forment les *parhélies* proprement dits - le reste du halo formant les *queues* des parhélies.

Les points les plus proches du Soleil sont rouges, puis viennent de l'orange, du jaune et du vert de plus en plus délavés (mais moins que dans le halo de 22°). Les queues des parhélies sont blanches : quoique le halo soit de dimension 1, ses différentes composantes spectrales se chevauchent largement...

La hauteur céleste H de la source S étant théoriquement égale à θ ici puisque les arêtes sont verticales, les azimuts des parhélies sont égaux à celui de S plus ou moins $D_{\theta m}(A, n)$. Si H n'est pas nul, $D_{\theta m}(A, n) > D_m(A, n)$, donc les parhélies sont à l'extérieur du halo circulaire correspondant, et ils s'en écartent de plus en plus si $|H|$ augmente puisque $D_{\theta m}(A, n)$ est une fonction croissante du paramètre $|\theta|$.

Les parhélies existent seulement si $A \leq 2 \arcsin \frac{1}{n_{\text{eff}}}$, i.e. si

$$|H| \leq H_l(A, n) \equiv \arccos\left(\sqrt{n^2 - 1} \tan \frac{A}{2}\right).$$

Pour les parhélies du halo de 22° (resp. 46°), on trouve $H_l(60^\circ, (1, 31)) \cong 61^\circ$ (resp. $H_l(90^\circ, (1, 31)) = 90^\circ - i_0(90^\circ, (1, 31)) \cong 32^\circ$). Il n'est pas certain que les parhélies des halos de 46° aient été réellement vus ; on a longtemps cru les avoir observés à Saskatoon en 1970, mais on pense maintenant qu'il s'agissait plutôt d'un phénomène d'apparence voisine (cf. § 2.3.1.).

1.1.2.2. Arêtes horizontales

Il n'y a pas de domaine d'accumulation dans ce cas.

Arc circumzénithal (arc « tangent » supérieur)

Il est formé par transmission dans les prismes d'angle $A = 90^\circ$, de face d'entrée horizontale (par exemple, une face hexagonale d'une plaquette ou d'une colonne à capuchon en chute) ; les azimuts des orientations de leurs arêtes sont équiprobables de 0° à 360° . Le halo est un segment d'almicantarar, assez proche du zénith et centré sur le vertical du Soleil (ce qui se prouve très facilement en utilisant la formulation vectorielle des lois de DESCARTES).

(5) i.e. un « parallèle » de la sphère céleste, dont les pôles sont le zénith et le nadir.

Il n'existe que si la distance zénithale Z de la source S est supérieure à $i_0(90^\circ, (1,31)) = \arcsin \sqrt{n^2 - 1} \cong 58^\circ$ (noter que $90^\circ - i_0(90^\circ, n) \leq H_t(A, n)$ lorsque $A \leq 90^\circ$). Sa distance zénithale est $Z' = Z - D(Z, 90^\circ, n) = \arccos \sqrt{n^2 - \sin^2 Z} < Z$; sa demi-ouverture (i.e. la différence d'azimut entre son milieu et ses extrémités) est $\omega' = \arcsin \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{\sin Z}$.

Si $H \equiv 90^\circ - Z \rightarrow 0^+$, $H' \equiv 90^\circ - Z' \rightarrow i_0^+$ et $\omega' \rightarrow i_0^+$, alors que si $Z \rightarrow i_0^+$, $Z' \rightarrow 0^+$ et $\omega' \rightarrow 90^\circ^-$: dans ce dernier cas, l'arc circumzénithal tend vers un demi-cercle qui converge vers le zénith (cet aspect approximativement semi-circulaire est assez perceptible car, pour Z au voisinage de i_0 , Z' est équivalent à une constante multipliée par $\sqrt{Z - i_0}$).

Cet arc de largeur modérée (voisine de 2°) est souvent bien lumineux ; on profite alors pleinement de sa netteté, ainsi que de la vivacité de ses couleurs clairement distinctes jusqu'au bleu (du côté du zénith), car il fait partie des arcs parroïdes qui sont les seuls halos de dimension 1 dont les composantes monochromatiques ne se chevauchent pas. Il se montre souvent sans le halo de 46° , rarement sans les parhélies du halo de 22° (mais ceux-ci peuvent se montrer sans l'arc circumzénithal lorsque $H \in [32^\circ, 61^\circ]$).

Notons que l'arc circumzénithal est tangent supérieurement au domaine d'accumulation du halo de 46° si $Z = i_m(90^\circ, (1,31)) \cong 68^\circ$. Celui-là est en tout point plus près du zénith que celui-ci pour $Z \neq i_m(90^\circ, (1,31))$ (les expressions des distances zénithales permettent de le vérifier immédiatement), mais leurs largeurs font qu'ils semblent souvent être tangents – d'où l'appellation d'« arc tangent supérieur » donnée aussi à l'arc circumzénithal.

Arc circumhorizontal (arc « tangent » inférieur)

Il est formé par transmission dans les prismes d'angle $A = 90^\circ$, de face d'entrée verticale (par exemple, une face rectangulaire d'une plaquette ou d'une colonne à capuchon en chute) ; les azimuts des orientations de leurs arêtes sont équiprobables de 0° à 360° . Le halo est un segment d'almicantarate, assez voisin de l'horizon et centré sur le vertical du Soleil ; son côté bleu est le plus proche de l'horizon.

Il n'existe que si $H \geq i_0(90^\circ, (1,31)) \cong 58^\circ$; sa hauteur est

$$H'' = 90^\circ - Z - D(Z, 90^\circ, n) = \arccos \sqrt{n^2 - \sin^2 H} < H,$$

et sa demi-ouverture $\omega'' = \arcsin \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 H}}$. Il est moins lumineux que l'arc circumzénithal, et plus rare à cause de la condition $H \geq 58^\circ$.

Si $H \rightarrow 90^\circ$, $H'' \rightarrow 90^\circ - i_0$ et $\omega'' \rightarrow 90^\circ$, alors que si $H \rightarrow i_0^+$, $H'' \rightarrow 0^+$ et $\omega'' \rightarrow i_0^+$.

Notons que l'arc circumhorizontal est tangent inférieurement au domaine d'accumulation du halo de 46° si $H = i_m(90^\circ, (1, 31)) \cong 68^\circ$; celui-là est en tout point plus près de l'horizon que celui-ci pour $H \neq i_m(90^\circ, (1, 31))$.

Arcs de PARRY (découverts en 1819-1820)

Ils présentent de multiples formes ; dans la nomenclature de GREENLER, on distingue quatre formes normales (*upper suncave*, *upper sunvex*, *lower suncave*, *lower sunvex*) et cinq formes alternatives... La plus courante est la première forme normale.

Arcs parroïdes

Ce sont des arcs qui se forment par deux réfractions sur les faces d'un prisme d'arête horizontale, mais tourbillonnant autour d'un axe vertical. Cet ensemble d'arcs englobe ceux de PARRY, mais aussi les arcs circumzénithal et circumhorizontal.

1.1.3. Avec des cristaux ayant une libre rotation autour de deux axes

L'un de ces axes est toujours vertical. Les cristaux ont donc deux degrés de liberté d'orientation ; comme il y a deux conditions à remplir pour obtenir le minimum de déviation ($\theta = 0$ et $i = i_m$), il est *a priori* possible de trouver un nombre fini d'orientations des cristaux réalisant ce minimum, donc il existe généralement un nombre fini de points de contact entre le halo considéré ici et le domaine d'accumulation du halo de 22° si $A = 60^\circ$ (ou de 46° si $A = 90^\circ$).

1.1.3.1. Arêtes verticales à certains instants (tourbillonnement)

Cela donne les arcs de LOWITZ, qui sont rares ; ils joignent le halo de 22° à ses parhélies, s'ils en sont assez éloignés (quelques degrés au moins), donc si $H > 25^\circ$.

1.1.3.2. Arêtes horizontales

Angle $A = 60^\circ$: arcs tangents supérieur et inférieur au halo de 22° , halo circonscrit (ou « parhélies » inférieur, supérieur et vertical)

Cet ensemble de halos est formé par transmission dans les colonnes d'axe horizontal, l'axe de libre rotation non vertical étant l'axe sénnaire (horizontal pour la colonne en chute) ; comme les prismes ont deux degrés de liberté d'orientation, l'ensemble est à deux dimensions. Son domaine d'accumulation est à une dimension, et touche celui du halo de 22° en haut et en bas, dont il porte les parhélies si $H \cong 43^\circ$; c'est une courbe complètement au-dessus de l'horizon si (et seulement si) $H > 31,8^\circ$, fermée lorsque

$$H \geq 90^\circ - H_i(60^\circ, (1, 31)) \cong 29^\circ$$

(le halo circonscrit proprement dit) ; sinon elle a deux branches ouvertes (les arcs supérieur et inférieur qui touchent le domaine d'accumulation du halo de 22° mais n'y sont

plus tangents !), l'arc inférieur présentant un nœud lorsque $H \in \left[\frac{D_m(60^\circ, (1,31))}{2}, 25^\circ \right]$, ce nœud dégénérant en un point de rebroussement en bas du domaine d'accumulation du halo de 22° lorsque $H = \frac{D_m(60^\circ, (1,31))}{2} \cong 11^\circ$.

Quelquefois le halo circonscrit peut se montrer sans celui de 22° ; ses parties supérieure et inférieure sont toujours les plus brillantes et les mieux colorées.

Angle $A = 90^\circ$: arcs supralatéraux et infralatéraux (tangents au halo de 46°)

Il sont formés par transmission dans les colonnes orientées comme ci-dessus ; pour l'arc supralatéral (resp. infralatéral) la face de sortie (resp. d'entrée) de la lumière est une des faces hexagonales, forcément verticale. Ces halos sont toujours à deux dimensions, leurs domaines d'accumulation sont à une dimension.

L'arc supralatéral (resp. infralatéral) est une courbe à deux branches si $H < 12^\circ$ (resp. 60°) selon BRAVAIS (1847). Si H est inférieur à $90^\circ - i_m(90^\circ, (1,31)) \cong 22^\circ$ (resp. $i_m(90^\circ, (1,31))$) l'arc supralatéral (resp. infralatéral) est tangent au domaine d'accumulation du halo de 46° en deux points t , mais à la limite, ces deux points se rejoignent en haut (resp. en bas) ; sur la sphère céleste de nadir n , la position de ces deux points pour

l'arc infralatéral est donnée par l'angle $nSt = \pm \left[90^\circ - \arcsin \frac{\tan H}{\tan i_m(90^\circ, (1,31))} \right]$. Pour des valeurs de H encore plus élevées (respectivement), ces arcs ne touchent plus le domaine d'accumulation du halo de 46° ; la condition d'existence de l'arc supralatéral est la même que celle de l'arc circumzénithal ($H \leq i_0(90^\circ, (1,31)) \cong 32^\circ$), alors que l'arc infralatéral existe pour toute valeur de H (contrairement à l'arc circumhorizontal).

Les arcs supralatéraux sont très rarement observés et seulement de façon ambiguë, car ils sont assez voisins du halo de 46° et leur luminosité est plus faible.

1.2. Halos non irisés dus à une réflexion externe aux cristaux

Le phénomène de réflexion n'est pas dispersif, et c'est pour cela que les halos qu'il provoque ne sont pas irisés.

1.2.1. Sur des faces verticales

Cela donne naissance au cercle parhélifique ; c'est un halo à une dimension sans accumulation occupant l'almicantarat du Soleil. Ce halo est obtenu le plus souvent avec des cristaux dont l'axe sénnaire est vertical. Comme le facteur de réflexion augmente avec l'inci-

dence en lumière naturelle, la luminosité sur ce cercle devrait varier avec la distance angulaire à la source (voir paragraphe 1.2.2.1.) ; mais une variation vient aussi des réflexions internes (plus probables en incidence quasi-normale) – voir leur effet au paragraphe 2.2.2.2.

1.2.2. Sur des faces obliques

1.2.2.1. Colonnes

Ce sont des halos à deux dimensions, mais de largeur horizontale très faible si la source est proche de l'horizon. La libre rotation autour de la verticale, et les balancements de part et d'autre de l'horizontale, font que les images de la source formées par les réflexions sur des faces inclinées donnent sur la sphère céleste un ensemble de points qui prend l'aspect d'une colonne dont la largeur reste constante, ou augmente même d'abord en fonction de la distance au Soleil lorsque celui-ci n'est pas sur l'horizon.

Sur une face donnée d'un cristal, si le faisceau incident est rasant, le flux lumineux reçu par cette face est nul. Pour qu'il ne soit pas nul, il faut augmenter l'angle entre le faisceau et la face, mais alors le facteur de réflexion diminue ; le flux réfléchi par cette face est maximal pour un angle de 7° , donnant une image à 14° de S .

Au coucher du Soleil et peu après, la colonne peut atteindre une hauteur de 30° à 40° , sa largeur n'étant que de 2° environ. BRAVAIS nota qu'il était difficile de rendre compte de la forme exacte et du grand rapport hauteur/largeur de certaines colonnes très grandes observées. BRAVAIS pensait que ce dernier ne peut s'expliquer que par des réflexions multiples ; en fait il n'en est rien, la solution réside dans un calcul correct de photométrie qui n'a été bien posé qu'en 1979...

1.2.2.2. Cercles « parhéliques obliques »

Ce sont des halos à une dimension sans accumulation, formés par réflexion sur une (ou des) face(s) oblique(s) ayant une libre rotation autour de la verticale. Leur forme dépend de la hauteur céleste de la source ; si elle est inférieure à l'angle entre la face réfléchissante et le plan horizontal, cette courbe passe par S .

1.2.3. Sur des faces horizontales

La réflexion sur de telles faces donne naissance au *sous-soleil* ; il arrive que cette image soit bien nette, lorsque l'air est particulièrement calme !

1.3. Halos dus à la réflexion interne et la réfraction

1.3.1. Avec des cristaux ayant une libre rotation autour de la verticale

1.3.1.1. Paranthélies de 120° et anthélie

Les cristaux ont un degré de liberté d'orientation, mais - cas particulier - ce halo est

de dimension 0, réduit à son domaine d'accumulation !

Ces paranthélies sont des taches brillantes situées sur l'almicantarat de S , et leur azimut par rapport à S reste $\pm 120^\circ$ indépendamment de H . Elles sont blanches, à cause d'un phénomène semblable à l'achromatisme apparent de certains oculaires, faisant qu'il n'apparaît pas d'irisations malgré la dispersion due à la réfraction.

Il en est de même pour l'anthélie, son azimut différant de 180° par rapport à celui de S ; comme l'anthélie se trouve sur le même almicantarat que S et les paranthélies, il ne faut pas le confondre avec le point antisolaire...

1.3.1.2. Tache bleue

C'est une petite zone bleue ou bleu verdâtre de typiquement 3° de longueur sur le cercle parhélisque, qui a été décrite en 1951 et photographiée en 1994 pour la première fois ! Elle est située d'un côté ou de l'autre des paranthélies, en fonction de la hauteur céleste de la source. Ce phénomène est dû à un des mécanismes de formation du cercle parhélisque : la réflexion de la lumière à l'intérieur d'un cristal sur une face verticale, précédée et suivie d'une transmission par les faces horizontales ; dans ce cas il apparaît un chromatisme de luminance, et non plus de position, dû à la variation brutale du facteur de réflexion au voisinage de l'angle de réfraction limite qui dépend de la longueur d'onde.

1.3.2. Avec des colonnes ayant une libre rotation autour de deux axes

L'un de ces axes est vertical ; l'autre (l'axe sénair) est horizontal.

1.3.2.1. Halos à deux dimensions avec accumulation

Quand la lumière rentre dans un cristal de glace en forme de colonne hexagonale par une face rectangulaire, subit une réflexion sur une face hexagonale, puis ressort par une face faisant un angle de 60° avec la première, cela donne les arcs de WEGENER qui se croisent en faisant entre eux un angle voisin de 90° .

Quand la lumière subit trois réflexions particulières à l'intérieur d'un cristal de glace en forme de colonne hexagonale, cela donne les arcs de TRICKER qui se croisent selon un angle nettement inférieur à 90° .

1.3.2.2. Halos à deux dimensions sans accumulation

Quand la lumière subit quatre (resp. deux) réflexions particulières à l'intérieur d'un cristal de glace en forme de colonne hexagonale, cela donne l'arc anthélique diffus A (resp. B).

Ces arcs sont assez lumineux, et peuvent simuler une colonne anthélique ; ils ne sont pas colorés (contrairement aux arcs de WEGENER) car il y a achromatisme apparent, par le même mécanisme que dans les paranthélies de 120° .

2. PHÉNOMÈNES COMPLÉMENTAIRES

2.1. Effets géométriques

2.1.1. Largeur angulaire de la source

Le plus souvent la source de lumière avec laquelle on observe les halos est le Soleil, mais parfois aussi la Lune. Dans les deux cas, son diamètre angulaire est 32' environ. Il en résulte une superposition des halos dus à chaque point source, donc les pics d'intensité sont élargis, les couleurs se mélangent plus et ainsi se délavent.

2.1.2. Balancement des axes orientés des cristaux

Cet effet élargit aussi les arcs et peut simuler un contact de deux arcs proches (c'est le cas avec le halo de 46° et les arcs circumzénithal ou circumhorizontal, appelés aussi pour cela arcs tangents supérieur ou inférieur au halo de 46°). Il influe nettement sur la largeur des parhélies.

2.2. Effets d'optique physique

2.2.1. Interférences et diffraction

La diffraction élargit aussi les pics d'intensité et rend moins nets les bords des halos.

Exemple du petit halo (22°)

La première mesure du profil d'intensité de ce halo date de 1984, et a donné pour cette observation une largeur à mi-hauteur de 5°. Or celle due à la dispersion est voisine de 0,5°, de même que celle due au diamètre apparent du Soleil ; on en déduit que la dimension moyenne des cristaux, expliquant par diffraction l'élargissement supplémentaire de 4°, était de l'ordre de 10 µm - ce qui est cohérent avec les données météorologiques.

2.2.2. Polarisation

2.2.2.1. Cas des halos dus à la réfraction seulement

La réfraction de la lumière polarise assez peu ; le degré de polarisation p du cercle du petit halo (22°) et ses arcs tangents est $p \cong 4 \%$, et pour celui du grand halo (46°) et ses arcs tangents $p \cong 16 \%$.

On a découvert en 1977 que la biréfringence de la glace ($+1,4 \cdot 10^{-3}$ environ sur tout le visible), d'axe optique parallèle à l'axe sésaire, est sensible dans les parhélies de 22° ; dans ce cas l'axe optique est vertical, puisque l'axe sésaire est vertical. Lorsque la source S est sur l'horizon, la distance angulaire entre S et le parhélie formé par les rayons extraordinaires, polarisés verticalement, excède de 0,11° celle obtenue avec les rayons ordinaires, polarisés horizontalement. Mais, à cause de la largeur des parhélies, l'écart entre les maxima de $|p|$ est voisin de 0,5°.

2.2.2.2. Cas des halos avec réflexion

La réflexion partielle polarise plus, surtout au voisinage de l'incidence brewsterienne ; les colonnes solaires sont donc assez nettement polarisées horizontalement.

Dans le cercle parhélisque, sa polarisation due à une réflexion interne (sur une face verticale) est souvent négligeable (par exemple au voisinage de l'anthélie si H est assez faible). Mais comme la glace est biréfringente, cette réflexion est *a priori* double pour chaque rayon (ordinaire ou extraordinaire) incident sur cette face. Cet effet apporte au cercle parhélisque trois composantes circulaires séparées sur la sphère céleste, mais toutes centrées sur le zénith, et différemment polarisées : le cercle supérieur (resp. inférieur) est parfaitement polarisé horizontalement (resp. verticalement), le cercle médian est en fait double (*i.e.* formé de deux cercles confondus par symétrie) et donc très peu polarisé - mais superposé à celui qui est dû seulement à la réflexion externe sur une face verticale, et qui est partiellement polarisé verticalement (le degré de polarisation pouvant atteindre 100 % en fonction de l'azimut et de la hauteur de la source). Comme la biréfringence de la glace est faible, l'écart entre ces trois cercles est bien plus petit que leur largeur (due à celle du Soleil et au balancement des cristaux). On ne voit donc qu'un seul cercle parhélisque, mais la polarisation de son bord supérieur est partielle horizontale, de degré variable avec l'azimut et la hauteur de la source (si celle-ci est inférieure à 40° , l'effet est visible à l'œil nu avec un polariseur sur un cercle parhélisque bien net entre 90° et 120° d'azimut par rapport au Soleil) ; il en est de même pour le paranthélie de 120° , en plus des effets de polarisation analogues à ceux des parhélies (*cf.* § 2.2.2.1.).

2.3. Diffusion multiple

La diffusion considérée ici est restreinte à celle qu'explique l'optique géométrique, avec les réflexions et réfractions.

2.3.1. Entre les cristaux

La diffusion multiple rajoute un voile sur la sphère céleste. Elle fait apparaître des structures secondaires, quand la structure primaire est un spot assez lumineux : ce sont surtout les parhélies des parhélies de 22° , situés donc à $\pm 22^\circ \mp 22^\circ = 0^\circ$ et à $\pm 2 \times 22^\circ$ du Soleil (observation de Saskatoon mentionnée au § 1.1.2.1.). Elle explique aussi l'arc de KERN de première espèce, qui est un cercle blanc situé à la hauteur de l'arc circum-zénithal.

La diffusion multiple est enfin la cause de l'anthélie, contrairement à ce que l'on pensait jusqu'en 1989 ; on a compris alors que c'est la seule explication rendant compte du fait que ce halo n'apparaît pas si $H > 45^\circ$: il serait dû au sous-soleil du point antiso-laire, avec des colonnes orientées en position de PARRY.

2.3.2. À l'intérieur d'un cristal composite

Certains cristaux sont formés de deux plaquettes fixées aux extrémités d'une

colonne. La lumière diffusée par l'une d'elles peut ensuite être diffusée par l'autre. Cela explique l'arc de KERN de deuxième espèce, qui est une portion de cercle situé à la hauteur de l'arc circumzénithal mais du côté opposé à la source.

CONCLUSION

Nous espérons que cet aide-mémoire, en soulignant la richesse des phénomènes de halos, donnera l'envie de mieux les observer ! Bien des phénomènes qui se déroulent sous nos yeux nous échappent, par manque d'attention ou de sagacité dans l'observation...

Les halos les plus usuels sont, par ordre de fréquence décroissante :

- ◆ le petit halo (22°) ;
- ◆ les parhélies ;
- ◆ les arcs tangents ;
- ◆ les colonnes ;
- ◆ le cercle parhélifique.

La traque des phénomènes de halos, par des amateurs avertis (*cf. infra* l'adresse d'un réseau d'observateurs), peut faire progresser leur connaissance, qui n'est pas complète !

On continue actuellement à découvrir de nouveaux halos : par exemple, à l'extrémité nord de l'altiplano chilien, au dessus du volcan Lascar qui a éjecté un gros nuage de vapeur d'eau vers la haute atmosphère, les 27 et 28 novembre 1997, on a couvert photographiquement le développement d'un magnifique système de halos, qui en contenait plusieurs inédits ; puis le 10 novembre 1998 à la station du pôle Sud, on a encore découvert d'autres halos.

Entre 1997 et 2000, diverses questions inexploitées ont été résolues : l'origine du halo de SCHEINER (28° de rayon, dû à des cristaux de glace cubique Ic), de l'arc de KERN de deuxième espèce (diffusion multiple intracristalline - *cf.* § 2.3.2.), des halos elliptiques et des anneaux de BOTTLINGER (dus à des cristaux pyramidaux). De plus, l'observation fine des halos suscite, quand on veut en rendre compte, des améliorations des techniques de calcul de la lumière diffusée et de sa polarisation. Mais quelques mystères persistent encore actuellement : celui de l'arc héliaque et de l'arc mésolatéral, prédits théoriquement mais apparemment encore jamais observés ; celui du halo circulaire de HEVEL, de 90° de rayon, alors que la plus grande valeur (du minimum) de la déviation dans un prisme de glace (*cf.* l'introduction du § 1. et le tableau) est $80,5^\circ$...

L'observation des halos est intéressante à d'autres niveaux que la théorie de l'optique : elle permet d'obtenir à distance des informations sur l'état de l'eau dans l'atmosphère, ou la dimension des cristaux de glace. Ainsi se posèrent en 1999-2000 de nouvelles questions sur la surveillance de l'atmosphère, dont voici quelques exemples. Sachant que la diffraction n'occulte pas le phénomène de halo dès que la dimension des cristaux atteint un ordre de grandeur de $10\ \mu\text{m}$ ou plus, on devrait observer plus de halos qu'on

n'en voit réellement. D'où vient ce déficit ? Ces cristaux ont-ils souvent leurs faces rugueuses, ou présentent-ils des défauts de symétrie ? La formation des arcs de PARRY exige une stabilité surprenante de l'horizontalité de certaines faces des cristaux, qui a bien été confirmée par l'analyse LIDAR des nuées formant ces arcs. Quel phénomène subtil d'aérodynamique permettrait d'expliquer une telle stabilité ? Cela dépend-il de la morphologie du cristal, et peut-elle se trouver influencée par les noyaux de condensation atmosphérique ?

Pendant les siècles précédents, les explorateurs des régions polaires se sont souvent émerveillés du spectacle des halos ; dans notre cas, il nous permettra de redire que pour apprendre beaucoup de physique (au moins au début) et pour la faire aimer, il n'est pas indispensable de recourir à des appareils et des expériences complexes : il suffit d'observer la Nature avec des yeux ouverts, de la questionner avec un esprit ouvert.

BIBLIOGRAPHIE

Quelques livres solides et récents

- [1] MINNAERT M. *The Nature of Light & Color in the Open Air*. New York : Dover, 1954 : une étude simple mais complète des phénomènes optiques dans la nature, avec de nombreuses idées d'observations faciles et efficaces (mais quelques erreurs, en particulier sur le rayon vert).
- [2] MINNAERT M. *Light and Color in the Outdoors*. Berlin : Springer Verlag, 1993 : réédition de l'ouvrage précédent.
- [3] TRICKER R. A. R. *Introduction to Meteorological Optics*. New York : American Elsevier, 1970 ou Londres : Mills and Boon, 1970 : aborde les aspects théoriques de façon substantielle.
- [4] TRICKER R. A. R. *Ice Crystal Haloes*. Washington : Atmospheric Optics Technical Group of the Optical Society of America, 1979.
- [5] GREENLER R. *Rainbows, Halos and Glories*. Cambridge : Cambridge University Press, 1980 : un livre plus restreint que ceux de MINNAERT, mais illustré de remarquables photographies en couleur, et enrichi de simulations sur ordinateur.
- [6] CORLISS W. R. *Rare Halos, Mirages, Anomalous Rainbows and Related Electromagnetic Phenomena*. (Glen Arm, Md.), Sourcebook Project, 1984.
- [7] KÖNNEN G. P. et TINBERGEN J. *Polarized Light in Nature*. Cambridge : Cambridge University Press, 1985.
- [8] DETTWILLER L. *Qu'est ce que l'optique géométrique ? - fondements et applications*. Paris : Dunod, 1990.
- [9] TAPE W. *Atmospheric Halos*. vol. 64 des Antarctic Research Series, (Washington, D.C.), American Geophysical Union, 1994.
- [10] LYNCH D. K. et LIVINGSTON W. *Color and Light in Nature*. Cambridge : Cambridge

University Press, 1995 : un livre détaillé et précis illustré par une riche collection de photographies d'un grand intérêt.

- [11] BIÉMONT E. *Météores et effets lumineux dans l'atmosphère terrestre*. coll. Que sais-je ? n° 3146, Paris : P.U.F., 1997.
- [12] ERESMAA R., JOKINEN A., MÄKELÄ V., PEKKOLA M., RUOSKANEN J. et SILLANPÄÄ M. *European Halo Project : Report of May 1996*, Helsinki, 1996 ; *European Halo Project : Report of April 1997*, Helsinki, 1997.
- [13] LYNCH D. et LIVINGSTON W. *Aurores, mirages, éclipses... - Comprendre les phénomènes optiques de la nature*. Paris : Dunod, 2002 : traduction de leur livre de 1995.

Articles de revues de vulgarisation

- [14] LYNCH D. « Les halos atmosphériques », in *Les phénomènes naturels*. Bibliothèque Pour la Science, Paris : Belin, 1978.
- [15] WALKER J. « Les motifs de givre et le cadran solaire », in *23 expériences d'amateur*. Bibliothèque Pour la Science, Paris : Belin, 1982.
- [16] CHAPELET M. « Déviation des rayons lumineux lors de la traversée d'un prisme. Application : les halos solaires ». *Bull. Un. Phys.*, mars 1989, vol. 83, n° 712, p. 399-404.
- [17] HENRY M. « Phénomènes naturels - Optique atmosphérique ». *Auvergne Sciences - Bulletin de l'ADASTA*, mars 1995, n° 33, p. 11-21.
- [18] HENRY M. « Les halos ». *Revue du palais de la découverte*, octobre 2001, vol. 30, n° 291, p. 26-36.

ICONOGRAPHIE

- [19] SUAGHER F. et PARISOT J.-P. *Jeux de lumière - Les phénomènes lumineux du ciel*. Besançon : Cêtre, 1995 : un recueil de belles photographies en couleur de phénomènes optiques atmosphériques, avec des commentaires intéressants, mais moins précis que ceux du livre de LYNCH et LIVINGSTON.
- [20] Diapositives du CLEA, série D1 « Les phénomènes lumineux » (26, rue Bérengère - 92210 Saint-Cloud) : on y retrouve des photographies présentées dans le livre précédent.

Pour d'autres diapositives, voir aussi DIAPOFILM, JEULIN ou PIERRON - Phénomènes en optique de l'atmosphère.

Bien d'autres livres ou articles contiennent aussi des photographies remarquables : voir par exemple les ouvrages de D. J. K. O'CONNELL, R. GREENLER, D. K. LYNCH et W. LIVINGSTON déjà mentionnés (années 1958, 1980, 1995). Une recherche sur internet par Google en fournit une belle moisson ; voir par exemple :

<http://www.sundog.clara.co.uk>

ainsi que :

<http://www.polarimage.fi/>

EXPÉRIENCES ET LOGICIELS

Pour simuler physiquement un halo il y a l'expérience de CORNU (faisant précipiter un alun de sodium et potassium), dont le résultat est assez fugace ; une variante au laser est décrite dans les pages 54-57 de M. HENRY et R. JOUANISSON, *La lumière du laser - guide d'expériences*, Paris : Masson, 1993.

Pour des simulations numériques, on pourra télécharger gratuitement le logiciel *Halosim* (entre autres) sur :

<http://www.sundog.clara.co.uk/halo/download.htm>

RÉSEAU D'OBSERVATEURS

L'association finlandaise URSA a mis sur pied divers réseaux d'observateurs : *Finnish Amateur Astronomer's Network*

MOILANEN J., PEKKOLA M. et RIIKONEN M. *Finnish Halo Observers Network*, URSA, Raatimiehenkatu 3 A 2 - 00140 Helsinki - Finlande.



LUC DETTWILLER
*Professeur en PC**
 Lycée Blaise Pascal
 Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)