

TÉMOIGNAGE

Le halo de Boukhara

Devalance Jean-Pierre, jpdevalance@orange.fr

De nombreux phénomènes lumineux sont visibles dans le ciel. Le petit halo est l'un de ceux-là.

Lors d'un voyage à Boukhara en Ouzbékistan, j'ai pu observer le halo de la photo 1. Habituellement, tous les touristes (ou presque) s'esclaffent, à tort : "Oh le bel arc-en-ciel".



Fig.1. Halo sur un minaret à Boukhara.

Nature du Halo

Ce halo n'est pas un arc-en-ciel, qui, lui, est formé lorsque les rayons du Soleil frappent un ensemble de gouttes d'eau. On a alors le Soleil dans le dos, l'arc a un angle de 42° et la coloration rouge est à l'extérieur. Dans notre halo, les irisations sont bien moins franches et assez peu marquées, le rouge est vers l'intérieur, et la lumière vient de l'avant (du côté du Soleil) ; on peut le voir aussi avec la Lune. Le rayon du halo est de 22° , on parle du petit halo à 22° , il en existe un autre très peu visible à 46° .

Ce halo se produit lorsque la lumière traverse des cristaux de glace (et non des gouttes d'eau comme pour l'arc-en-ciel) à section hexagonale (hexagone régulier), comme des crayons à papier (figure 2). Ces minuscules cristaux se forment dans des nuages appelés cirrostratus à des températures de l'ordre de -10°C à -20°C . Ces nuages sont des nuages très

fins (d'épaisseur 500 m ou moins) visibles comme un voile d'aspect laiteux parfois si ténus qu'on ne les perçoit pas dans le ciel. Leur altitude se situe entre 4 500 m et 12 000 m et il n'y a aucune précipitation associée.

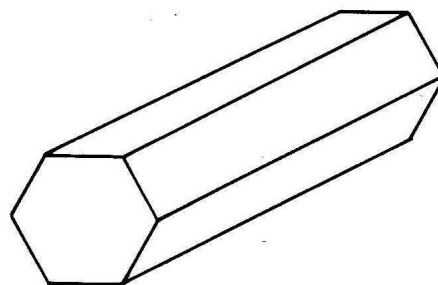


Fig.2. Cristal de glace à section hexagonale.

Étude d'un rayon lumineux

Intéressons-nous à un rayon lumineux et suivons son trajet à travers un cristal de glace. Nous considérons un rayon incident qui entre dans le cristal de glace par l'une des faces qui s'appuient sur l'hexagone ; par réfraction, il traverse le cristal et ressort vers notre œil.

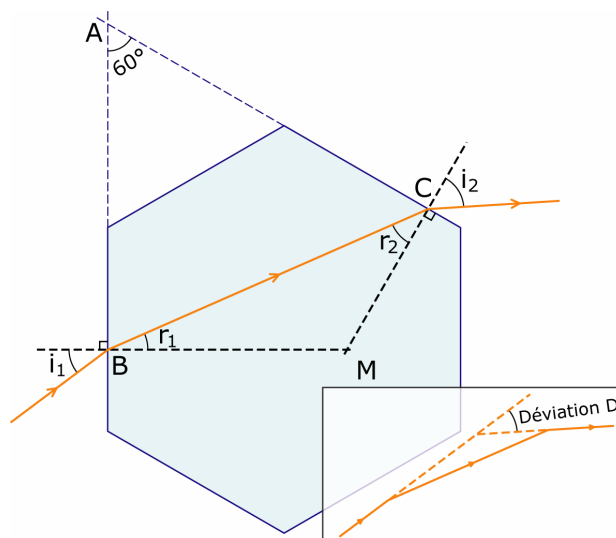


Fig.3. Marche d'un rayon à travers un cristal hexagonal. Le rayon incident est supposé ici contenu dans un plan perpendiculaire à l'axe du cristal.

Les calculs (encadré 1) montrent que la déviation entre le rayon lumineux entrant dans le cristal et le rayon sortant est égal à $i_1 + i_2 - 60^\circ$ avec $\sin i_1 = n \sin r_1$, $\sin i_2 = n \sin r_2$ et $r_1 + r_2 = 60^\circ$.

Encadré 1

Les calculs

Tous les angles sont en degrés ici

D'un point de vue géométrique :

Dans le triangle BCM : $r_1 + r_2 + M = 180^\circ$.

Dans le quadrilatère ABMC :

$$A + B + M + C = 360^\circ$$

Avec $B = C = 90^\circ$, on en déduit : $r_1 + r_2 = A = 60^\circ$

Lois de Descartes

$\sin i_1 = n \sin r_1$ et $\sin i_2 = n \sin r_2$ où n est l'indice de réfraction de la glace ($n \approx 1,31$).

Conditions d'émergence en C

$i_2 < 90^\circ$ donc $r_2 < 49,8^\circ$ (avec $\sin i_2 = n \sin r_2$)

Comme $r_1 = A - r_2$ et $A = 60^\circ$, on obtient $r_1 > 10,2^\circ$ puis $i_1 > 13,4^\circ$ (avec $\sin i_1 = n \sin r_1$)

Déviations du rayon lumineux (somme des déviations)

$$D = i_1 - r_1 + i_2 - r_2 \text{ soit } D = i_1 + i_2 - A$$

La déviation n'est pas constante, elle dépend de i_1 . On montre qu'il existe un minimum de déviation à 22° , lorsque $r_1 = r_2 = 30^\circ$, i_1 valant alors 41° . Vous trouverez les calculs en compléments sur notre site (productions récentes, Cahiers Clairaut).

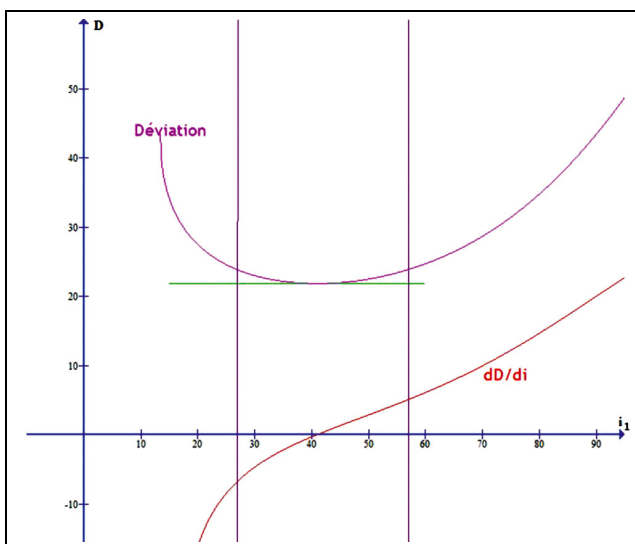


Fig.4. Déviation en fonction de i_1 . On trouve un minimum à 22° . On a représenté aussi la dérivée de la déviation qui s'annule pour i_1 proche de 41° .

De plus on remarque que 3° de déviation entre 22° et 25° sont produits par 40 % des rayons solaires incidents (de 25° à 60°) ce qui rend la zone proche de 22° plus lumineuse que le fond du ciel. En réalité le halo a une largeur plus faible, de l'ordre de $1,5^\circ$ (c'est à peu près la vision que l'on a d'une pièce d'un centime tenue à bout de bras).

Si les rayons frappent les cristaux sur les faces hexagonales pour ressortir par une face rectangulaire, les calculs précédents restent valables en remplaçant 60° par 90° pour A. On obtient alors une déviation minimale à 46° et le halo supplémentaire à 46° .

Dépendance de D avec λ

Les irisations sont dues au fait que n varie avec la longueur d'onde λ suivant la loi de Cauchy :

$n = A + B/\lambda^2$. Pour la glace les coefficients A et B valent respectivement 1,301244755 et 3179,38302 (pour λ exprimé en nm)

	λ (nm)	n
bleu	480	1,315
vert	540	1,312
jaune	580	1,311
rouge	680	1,308

Pour le halo, les milliards de cristaux de glace ont toutes les orientations possibles, donc les rayons émergents, déviés de 22° par rapport à la direction du Soleil, dessinent un cercle autour de l'axe observateur-Soleil (figure 5).

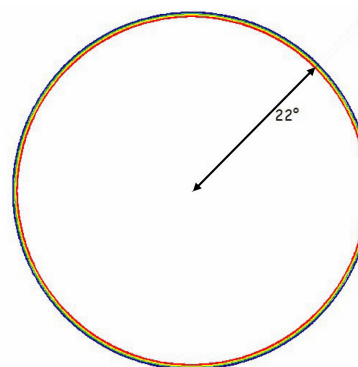


Fig.5.

Le cercle de plus petit rayon est rouge, les autres forment le dégradé observé. Le halo est formé de cercles colorés concentriques aux couleurs délavées, souvent seul le rouge à l'intérieur est assez bien visible, mais l'intensité lumineuse du fond du ciel écrase les autres couleurs.

Dans la photo prise à Boukhara, le minaret ne sert qu'à occulter le Soleil pour donner une image plus lisible. ■