

Optique atmosphérique *

par Michel HENRY,
Université Pierre-et-Marie Curie, Paris.

I. INTRODUCTION.

Dans l'acception usuelle du terme, les Sciences de la nature sont le domaine du biologiste, pour les êtres vivants, ou du géologue pour le monde inanimé, domaine dont le physicien leur concède volontiers l'exclusivité, sous le fallacieux prétexte qu'il est difficile, voire impossible, de les traduire par des équations simples. C'est du moins l'échappatoire que j'ai invoquée pendant de nombreuses années.

Pourtant, la quasi-totalité de ces phénomènes naturels est régie par les lois de la Physique, et nous ne pouvons manquer de y trouver une multitude d'exemples et une source inépuisable de problèmes.

Pour ne prendre qu'un exemple, lequel de nous, passant la nuit sous un réverbère n'a vu s'éloigner l'ombre de sa tête ? Voilà un bon exercice de cinématique, et une application bien simple de la notion de vitesse relative. Pourtant, je n'ai pas souvenir de l'avoir vu figurer dans un recueil d'exercices.

Dans un autre domaine, les phénomènes lumineux dont l'atmosphère est le siège et qui sont, pour certains, quotidiens, illustrent de façon remarquable les lois de l'optique, des plus simples aux plus complexes, des plus anciennement connues aux plus récemment découvertes. Mon but aujourd'hui est de vous le montrer sur quelques exemples et si possible de vous inciter à en chercher d'autres.

Par la force des choses, je devrai me limiter à des indications ponctuelles. Sachez cependant qu'elles ne représentent que la partie émergée de l'iceberg. Pour la même raison, je me limite strictement à ce qu'il est convenu d'appeler optique atmosphérique, ou optique météorologique, c'est-à-dire pour l'essentiel l'interaction de la lumière du Soleil et de l'atmosphère. J'exclus en

(*) *N.D.L.R.* : Article paru dans le bulletin de l'association belge des professeurs de Physique et Chimie de septembre 1984, reproduit avec l'aimable autorisation de son responsable.

particulier les phénomènes lumineux naissant au voisinage de la Terre, comme les éclairs ou les aurores boréales.

Pour faire simple, je choisirai toujours comme source de lumière le Soleil, mais il doit être bien entendu que d'autres, tels la Lune ou les lampadaires de l'éclairage public donnent lieu aux mêmes effets.

Encore un mot : je n'oublie pas que vous êtes en vacances (1), même si elles tirent à leur fin, et plutôt qu'à un cours de physique, je vous convie à une promenade au grand air pour admirer quelques-uns des merveilleux spectacles que nous offre la Nature.

II. OPTIQUE GEOMETRIQUE.

Assez schématiquement, les lois de l'optique peuvent être rattachées à deux grands modèles de comportement de la lumière, le rayon lumineux et l'onde lumineuse. Au premier correspond l'optique géométrique, à la seconde, l'optique physique. Je suivrai cette distinction, qui est aussi celle habituellement observée dans les cours de Physique, et commencerai par les phénomènes que nous pouvons directement rattacher à la notion de rayon lumineux.

En deux mots, nous admettons qu'une source de lumière, le Soleil dans le cas présent, émet quelque chose qui se propage le long de courbes géométriques, les rayons lumineux. Dans la plupart des cas, ces courbes sont des droites, mais il existe des exceptions.

II.1. Rais de lumière.

Le Soleil filtrant à travers les nuages ou à travers un feuillage pas trop dense nous permet souvent d'observer de tels rayons, et il est logique d'imaginer qu'un tel spectacle est à l'origine de la notion de propagation rectiligne.

Il s'agit d'un spectacle banal mais qui soulève quelques problèmes :

Compte tenu de l'éloignement du Soleil, ces rayons devraient être parallèles. Pourquoi paraissent-ils converger ?

Pourquoi les observons-nous surtout en fin d'après-midi et, au fait, pourquoi les voyons-nous ?

Nous pouvons répondre tout de suite à la première question : il s'agit d'une illusion d'optique, celle-là même qui nous

(1) Conférence présentée le 28 août 1984 (NdA).

fait paraître convergents les rails d'une voie ferrée, ou des rangées d'arbres.

Répondre à la seconde question est facile dès que nous avons la solution de la troisième. Nous voyons les rayons lumineux parce que les gouttelettes d'eau et les poussières en suspension dans l'atmosphère diffusent la lumière, c'est-à-dire la réémettent dans toutes les directions et en particulier vers notre œil. L'activité du Soleil, jointe à celle des hommes, fait que la concentration de particules diffusantes est plus élevée en fin de journée, aussi est-il plus courant de voir les rais de lumière à ce moment. Toutefois, il arrive de les observer à d'autres heures de la journée, quand l'état de l'air s'y prête.

Vous pouvez simuler ces rais de lumière en faisant passer le faisceau émis par une lanterne de laboratoire ou un projecteur de diapositives dans un aquarium plein de fumée ou d'eau troublée par très peu de lait ou de savon, sans oublier la classique fluorescéine (2).

Dans le ciel, les rayons paraissent isolés en raison de la présence de nuages qui interceptent une partie de la lumière du Soleil, même s'ils ne sont pas visibles car situés sous l'horizon.

Quant à la diffusion elle-même, c'est un problème important, sur lequel nous reviendrons plus en détail par la suite.

11.2. Spectre du Brocken. Taches de lumière.

La propagation rectiligne de la lumière permet d'expliquer simplement la formation des ombres, comme vous le savez tous. Toujours par le biais de la diffusion, un nuage ou une nappe de brouillard peut servir d'écran et révéler l'ombre d'un obstacle situé entre le Soleil et lui. Historiquement, l'obstacle était constitué par le corps d'un alpiniste, et l'ombre prise pour un fantôme, d'où le nom de spectre du Brocken. Le Brocken est un sommet de la région du Harz, en Allemagne, réputé comme rendez-vous de sorciers, et c'est là où la tradition situe la célèbre Nuit de Walpurgis. Au niveau du sol, il est assez rare de voir le spectre du Brocken, mais les aérostiers et les aviateurs le connaissent bien.

Le montage utilisé dans l'expérience précédente permet aussi de figurer le spectre du Brocken. Il suffit d'interposer dans le faisceau de lumière une silhouette découpée dans du carton ou encore un petit personnage.

(2) Les paragraphes en italiques décrivent des expériences aussi simples que possible de simulation des phénomènes naturels indiqués dans le corps de l'exposé.

Même quand le temps est clair, les jeux d'ombre et de lumière révèlent de bien curieux phénomènes. Vous avez tous passé un moment à l'ombre d'un arbre par une belle journée de printemps ou d'été. Avez-vous remarqué la forme des taches de lumière formées sur le sol ? La plupart sont arrondies, elliptiques pour être précis. En fait, ce sont de véritables images du Soleil.

Pour en comprendre l'origine, imaginons un interstice entre les feuilles, de forme *a priori* quelconque, et un écran perpendiculaire aux rayons du Soleil. Un point de celui-ci donne sur l'écran une tache de lumière de même forme et de mêmes dimensions que l'ouverture. Un second point du Soleil donne une autre tache, identique à la précédente, mais légèrement décalée. La superposition de toutes ces taches efface leur forme particulière au profit de celle du Soleil (fig. 1). Ce nivellement est d'autant mieux réalisé que l'écart entre les taches « élémentaires » est plus important, donc que l'arbre est plus élevé et son feuillage plus dense. En fait, quelques mètres suffisent amplement dans la majorité des cas.

Notons bien que la source de lumière doit avoir un diamètre apparent non nul, faute de quoi la tache de lumière garde la forme de l'ouverture, ainsi qu'il est facile de s'en assurer.

A défaut d'arbre, vous pouvez interposer un morceau de carton léger dans lequel vous avez découpé des ouvertures de petite taille, environ un centimètre, et de formes diverses. Une variante curieuse consiste à interposer cet écran dans le faisceau d'un projecteur de diapositives. Il se forme alors autant d'images du filament de l'ampoule, qui constitue la source de lumière effective.

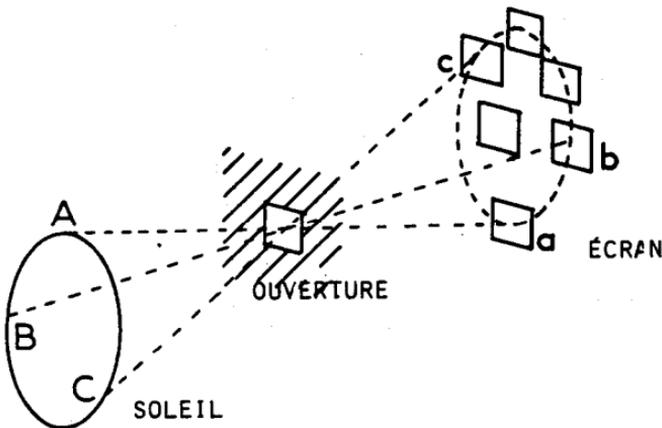


Fig. 1. — Comment une petite ouverture donne une image du Soleil. Les points A, B, C, forment les taches de lumière *a*, *b*, *c*, dont la superposition recrée l'image du Soleil.

11.3. Halos. Parhélies.

Après la propagation rectiligne de la lumière et la formation des ombres, abordons les lois de la réflexion et de la réfraction. Nous devons disposer de miroirs et de prismes d'une taille suffisante, au moins égale à une fraction de millimètre.

Il est remarquable que de tels miroirs et prismes existent dans l'atmosphère : les cristaux de glace.

Je ne parle pas ici des flocons de neige dont les formes sont en général trop complexes, mais des petits cristaux formés dans les nuages glacés et qui tombent lentement sous l'effet combiné de leur poids et de la résistance de l'air.

La glace cristallisant dans le système hexagonal, ces cristaux dérivent du prisme droit à base hexagonale, terminé par une face plate ou une pyramide. Leur étude *in situ* montre que la grande majorité d'entre eux peut être répartie entre deux grandes catégories : les plaquettes, de hauteur petite devant les dimensions latérales, et les baguettes pour lesquelles la situation est inversée (fig. 2).

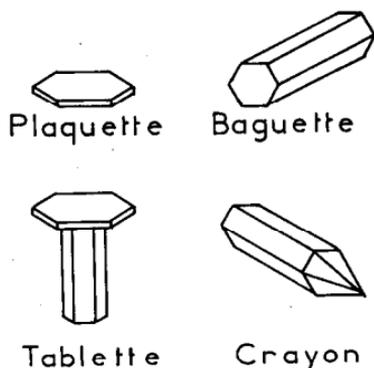


Fig. 2. — Diverses formes de cristaux de glace.

De tels cristaux peuvent réfléchir la lumière sur l'une quelconque de leurs faces. Ils peuvent aussi la réfracter et se comportent alors soit comme des prismes d'angle au sommet 60° soit comme des prismes d'angle au sommet 90° , ce que permet la valeur de l'indice de réfraction de la glace, voisin de 1,3 (fig. 3).

Voyons d'abord les effets de la réflexion. Chaque cristal joue le rôle d'un petit miroir plan et donne une image du Soleil. S'il existe des orientations privilégiées, nous pouvons nous attendre à une répartition particulière de lumière.

Ainsi, imaginons que ces miroirs soient tous parallèles à un même plan ; toutes les images du Soleil sont confondues et l'en-

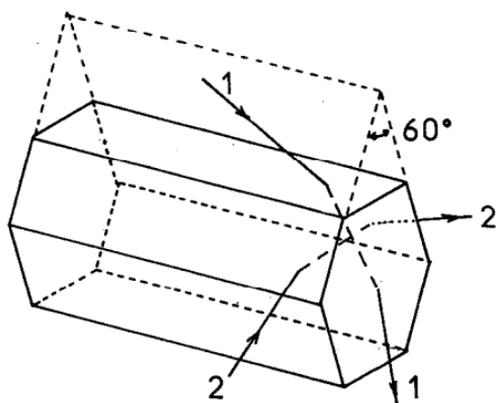


Fig. 3. — Trajets de rayons lumineux formant des halos. Le rayon (1) dévié par un prisme d'angle au sommet 90° donne naissance au halo de 46° , le rayon (2) dévié par un prisme d'angle au sommet 60° crée le halo de 22° .

semble des cristaux se comporte comme un miroir unique. L'observateur voit alors deux soleils, le vrai et son image par réflexion, appelé faux-soleil, ou sous-soleil. Ce spectacle est assez fréquent pour les « volants », plus rare pour les « rampants ».

Divers prélèvements effectués d'un avion, ou au niveau du sol dans les régions polaires, ont mis en évidence dans certains cas une orientation privilégiée des cristaux de glace : les faces terminales des plaquettes et les faces latérales des baguettes se placent horizontalement, de façon à maximaliser la résistance de l'air. Par ailleurs, l'orientation autour d'un axe vertical est *a priori* quelconque.

Vous pouvez vous faire une idée de cette situation en jetant en l'air une feuille et un brin d'herbe. La feuille retombe sensiblement « à plat » et le brin d'herbe horizontalement.

Voyons sur deux exemples les conséquences d'une telle orientation. Les faces terminales des baguettes et les faces latérales des plaquettes forment autant de miroirs verticaux. Un peu de géométrie montre que toutes les images du Soleil ont même hauteur apparente, égale à celle de ce dernier, quelle que soit l'orientation des miroirs (fig. 4). L'ensemble de ces images est réparti sur un cercle parallèle à l'horizon, le cercle parhélique. Il est à noter en outre que la réflexion n'introduit pas de dispersion, aussi le cercle parhélique n'est-il pas irisé.

En fait, l'horizontalité des cristaux n'est pas rigoureuse, leur axe pouvant s'écarter aléatoirement de quelques degrés par rap-

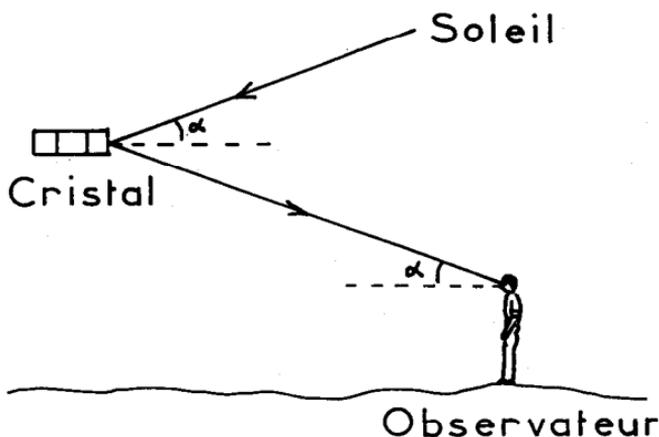


Fig. 4. — Formation du cercle parhélique par réflexion de la lumière du Soleil sur des cristaux de glace.

port à la verticale, ce qui déplace les images du Soleil. Or le calcul et l'expérience montrent que ce déplacement n'est pas symétrique, mais se trouve plus prononcé dans le plan vertical contenant le Soleil que dans le plan perpendiculaire.

Le calcul complet de cet effet remarquable est trop long pour être exposé ici, bien qu'il ne soit pas très compliqué. Toutefois, nous pouvons nous faire une idée de la question à l'aide du raisonnement suivant. Quand la normale au plan du miroir tourne d'un angle α dans le plan vertical contenant le Soleil et l'observateur, le rayon réfléchi tourne d'un angle 2α . La dimension apparente verticale de la tache lumineuse formée par l'ensemble des images du Soleil est 4α . Par contre, quand la normale tourne du même angle α dans le plan perpendiculaire au précédent, le rayon réfléchi tourne d'un angle qui est de l'ordre de α puisqu'il reste dans le plan d'incidence.

Les images du Soleil sont donc réparties sur une surface allongée de grand axe vertical, un pilier ou une colonne de lumière. Un effet analogue donne naissance aux traînées de lumière à la surface de la mer ou d'une rivière moyennement agitée.

La figure 5 donne le principe d'une simulation de cet effet. Un petit miroir M dont le plan est incliné d'un angle de quelques degrés sur l'horizontale grâce à une cale est déplacé de façon que la lumière issue de la source S soit toujours réfléchi vers le point O du support vertical. Le lieu du miroir est une courbe d'autant plus allongée que le point O est plus bas. Une variante « de luxe » consiste à matérialiser la courbe à l'aide d'un nombre

suffisant de miroirs, par exemple ceux que l'on trouve en plaques chez la plupart des décorateurs.

Plus précisément, des simulations sur ordinateur montrent que les plaquettes donnent naissance aux piliers de lumière observés au crépuscule, le Soleil étant au niveau de — voire sous — l'horizon, ce qui interdit de voir en même temps le cercle parhélique. Des colonnes lumineuses de forme voisine peuvent apparaître de part et d'autre du Soleil lorsque celui-ci est plus haut dans le ciel. Elles paraissent dues à des réflexions sur les faces latérales des baguettes. De telles colonnes, combinées à une portion de cercle parhélique peuvent très bien donner l'apparence d'une croix, phénomène souvent rapporté par les traditions et les légendes.

Vous pouvez simuler le cercle parhélique ou une colonne de lumière à l'aide d'un crayon à bille transparent à section hexagonale et d'un projecteur de diapositives. Placez dans le porte-diapositives un carton percé d'un trou de quelques millimètres de diamètre et formez-en l'image sur un écran. Interposez dans le faisceau le crayon à bille et faites-le tourner autour de son axe. Quand l'axe est vertical, il apparaît une traînée horizontale, semblable au cercle parhélique, et quand l'axe est horizontal, une traînée verticale analogue à la colonne de lumière.

Plus simplement, passez un doigt gras sur une lame porte-objet de microscope et placez-la devant l'objectif du projecteur, ce qui fait apparaître une traînée blanche de même origine que le cercle parhélique ou la colonne de lumière.

Passons à la réfraction. Nous avons déjà dit que les cristaux de glace se comportaient comme des prismes d'angle au sommet égal à 60° et 90° (fig. 3). La lumière qui traverse un prisme est déviée d'un angle au moins égal à l'angle de déviation minimum D_m . Par suite, les pseudo-images du Soleil produites par réfraction sont toutes distantes de celui-ci d'un angle au moins

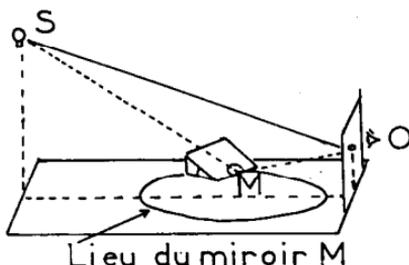


Fig. 5. — Simulation d'un pilier de lumière. Explications dans le texte.

égal à D_m . Qui plus est, l'angle de déviation varie peu au voisinage de D_m , ce qui se traduit par une accumulation de lumière, selon le processus qui donne naissance à l'arc-en-ciel (3). Quand les prismes ont toutes les orientations possibles, cette accumulation se traduit par l'apparition d'un cercle centré sur le Soleil et de rayon angulaire égal à D_m . Il est aisé de calculer ce rayon qui vaut environ 22° pour les prismes de 60° et à peu près 46° pour les prismes de 90° , l'indice de réfraction de la glace étant voisin de 1,3.

En outre, la lumière est dispersée, aussi les cercles sont-ils irisés, le rouge moins dévié étant à l'intérieur, et le bleu à l'extérieur (fig. 6). Toutefois, cette irisation n'est pas toujours très marquée, en raison du diamètre apparent du Soleil et aussi parce que l'indice de la glace varie assez peu avec la longueur d'onde. Il est assez fréquent d'observer de tels cercles, les halos de 22° et de 46° , qu'il ne faut pas confondre avec les couronnes dues à la diffraction et que nous étudierons plus loin. Comme pour l'arc-en-ciel, chaque partie du halo est due à un cristal différent. Il en résulte entre autre que si le nuage glacé n'est pas assez grand, les halos sont incomplets.

Voici comment simuler un halo, toujours à l'aide du projecteur de diapositives et du carton troué dont vous formez l'image

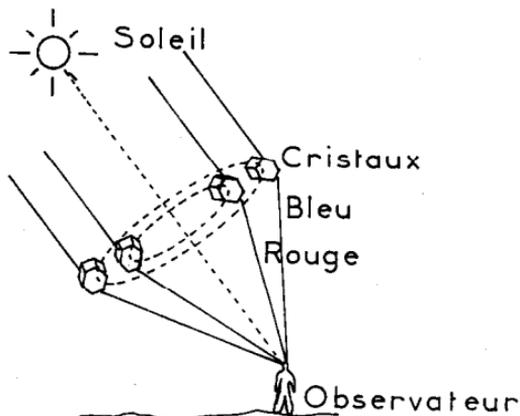


Fig. 6. — Formation du halo de 22° . Chaque partie du halo est due à un cristal particulier. Les rayons bleus, plus déviés que les rouges, forment le bord extérieur du halo.

(3) Pour la théorie de l'arc-en-ciel, je renvoie le lecteur à la remarquable conférence de MM. ROGGHE et DEDEKEN donnée au Congrès de l'A.B.P.P.C. de 1983 à Namur.

Voir aussi les articles de F. PRÊTRE :

- B.U.P. n° 560, décembre 1973, p. 359,
- B.U.P. n° 581, février 1976, p. 549.

sur un écran. Préparez une solution saturée à chaud, environ 200 g/l, d'alun et laissez-la refroidir. Versez-en à peu près 60 cm³ dans une cuve plate (10 × 10 × 1 cm) puis ajoutez 5 cm³ d'alcool à 90° ou 10 cm³ d'alcool à 40° (eau-de-vie à fruits). Interposez la cuve dans le faisceau de lumière et agitez le mélange avec un agitateur. Après quelques instants, vous verrez se former sur l'écran un halo dû aux petits cristaux d'alun se déposant lentement. Il arrive que le halo soit précédé d'un brouillard dû aux plus gros cristaux qui tombent plus rapidement. Avec un peu de chance, vous pourrez voir un second halo, formé par les mêmes cristaux différemment orientés. Cornu, à qui j'ai emprunté cette expérience, donne pour le petit halo un rayon angulaire de 10° et pour le grand de 20°, ce qui correspond à mes mesures. Il ne s'agit que d'ordres de grandeur, la composition du liquide et donc son indice de réfraction variant du début à la fin de l'expérience.

Quand les conditions atmosphériques sont telles que les plaquettes de glace aient leurs axes verticaux, elles donnent naissance selon le processus précédent à deux taches de lumière irisées, situées de part et d'autre du Soleil, les parhélies de 22°. Cette fois, les prismes ayant tous leur arête verticale, il n'est pas possible d'observer un cercle complet. De la même façon, les baguettes orientées donnent naissance à deux parhélies de 46°. Notons que si le Soleil est assez haut, ces parhélies sont écartées d'un peu plus de 22° (ou 46°) car les rayons qui les forment traversent obliquement les prismes pour pénétrer ensuite dans l'œil de l'observateur. Le calcul classique de la déviation doit alors être modifié, avec le résultat que nous venons d'indiquer.

Pour simuler une parhélie, reprenons notre projecteur de diapositives et remplaçons la cuve plate de l'expérience précédente par une cuve prismatique à section triangulaire ou hexagonale. Une telle cuve est assez facile à construire. Vous pouvez aussi trouver dans le commerce des emballages en plastique transparent de forme convenable, par exemple au rayon épicerie ou confiserie d'un super-marché. Il est commode de disposer en outre d'un support tournant d'axe vertical, pas trop rapide, disons de quelques tours-seconde pour fixer les idées. Remplissez votre cuve d'eau et placez-la sur le support de façon que son axe soit vertical et qu'elle intercepte le faisceau de lumière. Vous verrez se former les parhélies à 22°, de part et d'autre de l'image du trou. De façon analogue, une cuve à section rectangulaire permet de mettre en évidence les parhélies à 46°. A défaut de cuve, remplissez d'eau le corps du crayon à bille utilisé pour la formation du cercle parhélique. L'expérience marche encore, quoique un peu moins bien.

Je me suis limité à ces quelques exemples, mais il existe un grand nombre d'arcs et de halos, attribués à des réflexions

ou des réfractions plus complexes dans les cristaux de glace (fig. 7).

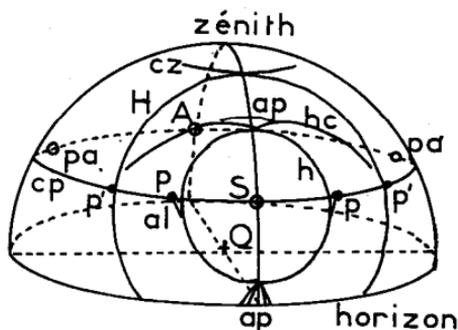


Fig. 7. — Ensemble de halos et d'arcs formés par réflexion et réfraction de la lumière du Soleil sur des cristaux de glace.

O : observateur ; S : Soleil ; h : halo de 22° ; H : halo de 46° ;

cp : cercle parhélique ; cz : cercle circumzénithal ;

ap : arcs de Parry ; al : arcs de Lowitz ; hc : halo circonscrit ;

P, P' : parhélies ; A : anthélie ; pa : paranthélies.

II.4. Mirages. Rayon vert.

La loi fondamentale de l'optique géométrique, le principe de la propagation rectiligne de la lumière n'est utilisable que dans un milieu homogène. Si l'indice de réfraction varie d'un point à l'autre, les lois de Descartes montrent que les rayons lumineux se courbent, s'infléchissant vers les régions de fort indice.

Or, l'indice de l'air est proportionnel à sa densité, aussi pouvons-nous prévoir que les variations des propriétés de l'atmosphère se traduiront par des phénomènes optiques particuliers.

L'un des plus communs est sans conteste la scintillation des étoiles. Pour de multiples raisons, la température de l'air varie rapidement et aléatoirement, ce qui entraîne des modifications non moins rapides et non moins aléatoires de la direction des rayons lumineux. L'image d'une source lumineuse paraît fluctuer en direction et en intensité, ce qui constitue la scintillation. Toutefois, ces variations sont de peu d'amplitude et n'ont d'effet apparent que sur des sources de très petit diamètre apparent, en pratique les étoiles et, dans certains cas, les planètes.

Pour simuler ce phénomène, vous pouvez faire passer un faisceau laser au-dessus d'une plaque métallique chauffée. La trace formée par le faisceau sur un écran se déplace rapidement et au hasard.

Outre ces fluctuations, il peut exister localement des gradients d'indice de faible étendue verticale, quelques mètres ou

quelques dizaines de mètres. Ils ont pour origine soit une inversion de température en altitude, soit un réchauffement ou un refroidissement de l'air au niveau du sol. Un sol ou une nappe d'eau chauds créent un gradient de température dirigé vers le haut, donc un gradient d'indice dirigé vers le bas, ce qui courbe les rayons lumineux vers le haut. Inversement, un sol froid courbe les rayons lumineux vers le bas (fig. 9).

Dans un tel milieu, les divers rayons lumineux issus d'un même point suivent souvent des trajets différents avant d'atteindre l'œil de l'observateur, ce qui donne naissance à plusieurs images de l'objet, tantôt droites, tantôt inversées, selon la façon précise dont l'indice de l'air varie avec l'altitude (fig. 8 et 9).

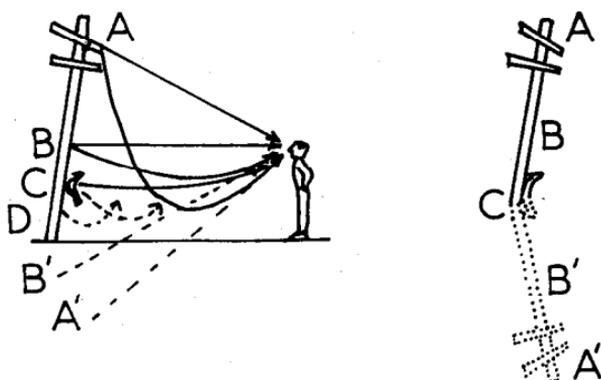


Fig. 8. — Formation d'un mirage inférieur. Les points A et B envoient deux rayons vers l'observateur ; le point C un seul et le point D aucun. La partie ABC de l'objet donne une image inversée, la partie CD n'est pas vue.

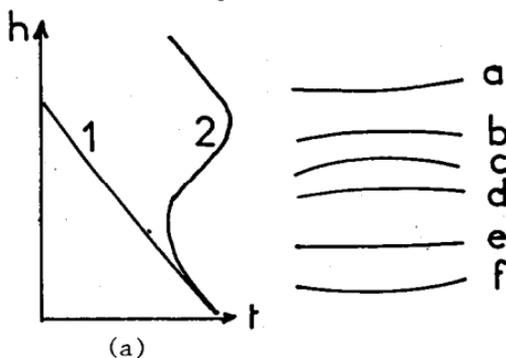


Fig. 9. — a) Inversion de température. La courbe (1) décrit la variation normale de la température t avec l'altitude h ; la courbe (2) correspond à une inversion de température. a, b, c, d, e, f , représentent des rayons lumineux de courbures diverses selon leur altitude.

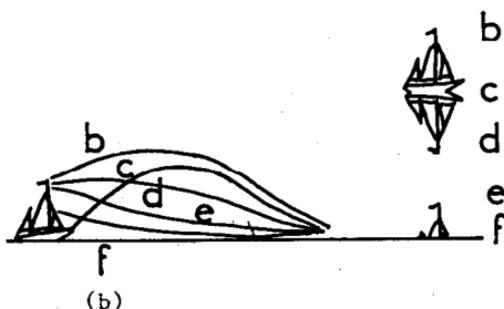


Fig. 9. — *b*) Formation d'images multiples par une inversion de température. *b, c, d, e, f*, sont les mêmes rayons qu'en *a*.

Par ailleurs, ces images peuvent être déformées, ce qui est probablement à l'origine de nombreuses légendes concernant des monstres marins ou des vaisseaux fantômes (fig. 10).

Notons que le mirage dit inférieur, produit au voisinage d'un sol chaud, est d'observation courante dans nos régions en été,

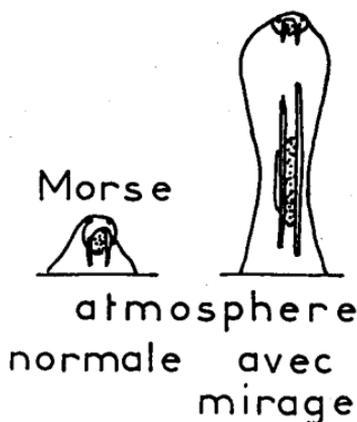


Fig. 10. — Déformation d'une image créant un « monstre ». La tête du morse (à gauche) paraît très allongée (à droite).

sur les routes asphaltées ou bétonnées. Ceci pose d'ailleurs un intéressant problème de thermodynamique : comment un tel gradient de température peut-il se maintenir malgré le brassage résultant du passage des voitures.

Il est assez difficile de réaliser en laboratoire un gradient de température suffisamment stable pour une démonstration. Il est plus pratique de le remplacer par un gradient de concentration.

Dans une cuve plate ($10 \times 10 \times 1$ cm), versez une couche d'eau puis superposez avec précautions une couche d'alcool. Attendez une heure ou deux, puis faites passer un faisceau laser horizontalement, au niveau de l'interface. Il se courbe nettement vers le haut. Inversement, la superposition d'une couche de glycérine ou de sirop de sucre et d'une couche d'eau crée une courbure vers le bas.

Indépendamment de ces fluctuations, il existe une variation d'ensemble de la densité de l'air avec l'altitude, liée à la diminution de pression. Le gradient d'indice qui en résulte courbe vers le sol les rayons lumineux et modifie la position apparente des objets célestes. C'est la réfraction atmosphérique, bien connue des astronomes. Plus près de nous, si j'ose dire, il provoque deux phénomènes curieux, l'un d'observation courante, l'aplatissement du Soleil couchant, l'autre plus rare, le rayon vert.

Le gradient d'indice n'est pas uniforme, étant d'autant moins prononcé que l'altitude est plus élevée. Par suite, les rayons lumineux issus du bord inférieur du Soleil sont plus courbés que ceux issus du bord supérieur, ce qui diminue le diamètre vertical apparent. Horizontalement, par contre, la variation d'indice est négligeable, si bien que le diamètre apparent n'est pas modifié (fig. 11).

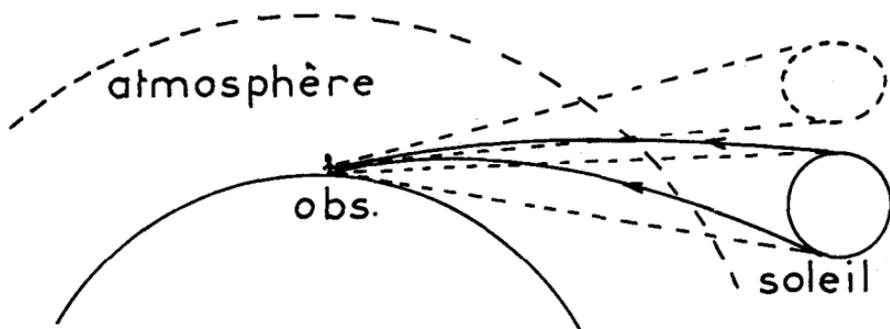


Fig. 11. — Aplatissement apparent du Soleil couchant. La hauteur de l'atmosphère et la courbure des rayons lumineux sont très exagérées.

L'atmosphère, compte tenu de son gradient d'indice, se comporte comme un prisme d'arête horizontale et de base confondue avec le sol. Le cercle lumineux du Soleil, vu à travers un tel prisme paraît irisé, le bleu étant du côté de l'arête et le rouge vers la base. Quand le Soleil se couche, l'horizon masque successivement toutes les couleurs et ne laisse finalement subsister que la dernière, ce qui donne naissance au rayon vert. Pourquoi vert et non bleu ? Nous retrouvons ici notre vieille amie, la diffusion dont nous verrons qu'elle élimine pratiquement du spectre

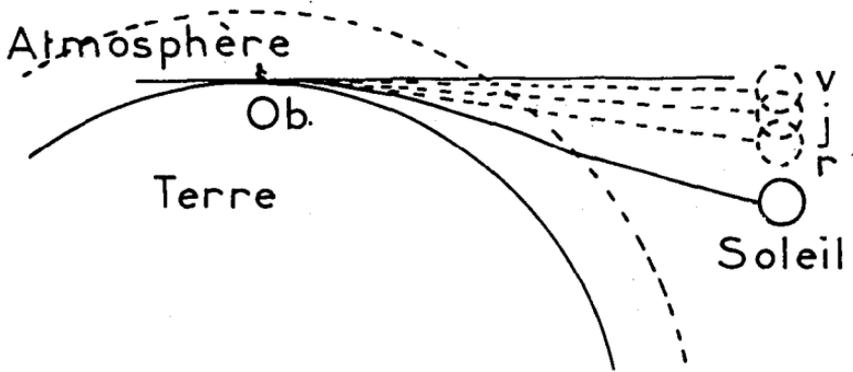


Fig. 12. — Formation du rayon vert par dispersion de la lumière du Soleil. L'atmosphère terrestre joue le rôle du prisme.

solaire tous les rayons bleus. L'ultime couleur est alors la suivante, le vert (fig. 12). Si les choses étaient aussi simples, le rayon vert devrait être fréquent. En fait, la dispersion par l'atmosphère est très faible, de l'ordre d'une fraction de minute d'arc, si bien qu'il est difficile de séparer les couleurs. En pratique, il faut que l'horizon soit bien dégagé, que le ciel soit clair, et semble-t-il qu'un mirage élargisse l'image du Soleil à ce moment pour voir le rayon vert.

L'expérience suivante peut vous donner une idée de la façon dont les choses se passent. Collez un disque de papier blanc sur un support noir et observez-le à travers un prisme de verre. Vous verrez les irisations bleue et rouge de part et d'autre du cercle. Maintenant, passez un carton mince de la base vers l'arête du prisme, entre celui-ci et le disque. Vous verrez disparaître successivement le bord rouge, puis le cercle blanc et il ne vous restera que le bord bleuté.

III. OPTIQUE PHYSIQUE.

L'optique géométrique est impuissante à expliquer la totalité des phénomènes lumineux. Le modèle simple du rayon lumineux doit être remplacé par celui de l'onde lumineuse. Dans ce modèle, la lumière est considérée comme une onde électromagnétique qui se propage dans tout l'espace et obéit au principe de Huygens-Fresnel.

Les interférences au sens strict, c'est-à-dire la répartition d'intensité lumineuse résultant de la superposition d'un nombre limité de vibrations demande une régularité de structure qu'il est rarissime de trouver dans l'atmosphère. Par contre, la diffraction et la diffusion sont d'observation courante. Notons au passage

qu'il n'existe pas de limite tranchée entre la diffraction et la diffusion. Nous utiliserons plutôt le premier terme pour traduire l'action de grosses particules et le second pour celle de petites, la longueur d'onde de la lumière étant l'étalon de mesure.

III.1. Couronnes. Gloires.

Outre les molécules des gaz qui constituent l'air, l'atmosphère contient en permanence, encore qu'en proportion très variable, une grande diversité de particules dont les tailles s'échelonnent d'une fraction de micromètre à quelques millimètres. Nous avons déjà rencontré les cristaux de glace ; il convient d'ajouter les gouttes d'eau, les aérosols et les poussières d'origine terrestre : sables soulevés par le vent, cendres volcaniques, fumées dues à l'activité humaine. Les plus grosses diffractent la lumière et sont à l'origine de plusieurs météores lumineux, selon la jolie expression du siècle dernier.

Les gouttes d'eau sphériques qui forment les nuages se comportent comme autant d'ouvertures circulaires, et nous pouvons leur appliquer avec une très bonne approximation les résultats indiqués par les théories classiques. La lumière est répartie sur des anneaux concentriques au Soleil, irisés avec le rouge à l'extérieur (fig. 13).

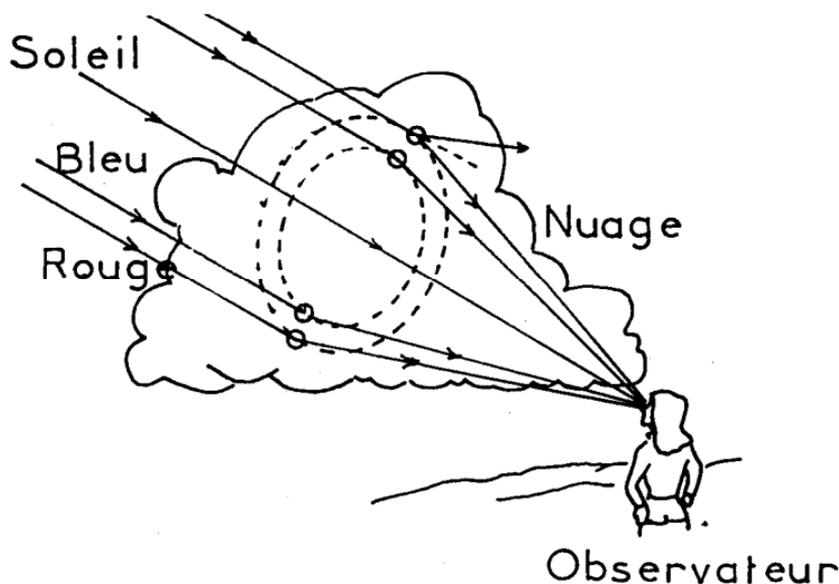


Fig. 13. — Formation d'une couronne. Chaque goutte diffracte la lumière. Comme pour le halo, les diverses parties de la couronne sont dues à des gouttes différentes. Les rayons bleus sont moins déviés que les rouges et forment le bord intérieur de l'anneau irisé.

Le diamètre angulaire des anneaux est inversement proportionnel à la taille de la particule et ne dépasse habituellement pas quelques degrés, ce qui est très inférieur aux dimensions des halos. Ces anneaux sont les couronnes, et sont d'observation très fréquente si l'on prend garde de ne pas regarder directement le Soleil mais plutôt son reflet dans un morceau de verre noirci, afin de ne pas être ébloui. Dans la plupart des nuages, les gouttes d'eau ont des diamètres variés. Par suite, les irisations sont souvent peu prononcées, les couleurs se recouvrant plus ou moins. Comme l'arc-en-ciel et les halos, chaque partie d'une couronne provient d'une goutte particulière, et il arrive que le cercle ne soit pas complet si le nuage est trop petit. Par ailleurs, la théorie de la diffraction indique une rapide décroissance de l'intensité lumineuse dès le second anneau, aussi est-il rare d'en voir plusieurs. Signalons enfin qu'il a été observé des couronnes d'assez grand diamètre angulaire, de l'ordre d'une dizaine de degrés, et nommées anneaux de Bishop. La tendance actuelle est de les attribuer à des aérosols d'origine volcanique.

Vous pouvez réaliser de très jolies couronnes en saupoudrant une plaque de verre d'une pincée de poudre de lycopode puis en regardant à travers cette lame une source blanche de faible diamètre apparent.

La prochaine fois que vous verrez une couronne, regardez bien. Outre la structure à grande échelle que nous venons de signaler, il apparaît une structure fine donnant une apparence granulaire et due à des interférences aléatoires. La théorie classique de la diffraction par un grand nombre d'ouvertures semblables réparties au hasard comme les gouttes d'eau d'un nuage admet que les diverses figures de diffraction se superposent en intensité sans interférer. Ceci n'est pas tout à fait exact. Un calcul plus précis, tenant compte des phases aléatoires montre que l'intensité résultante présente des fluctuations importantes à courte distance, ce qui donne naissance à la structure granulaire, dénommée granularité cohérente ou encore speckle par les auteurs anglo-saxons. Bien qu'observée depuis longtemps, par Newton et le Duc de Chaulnes entre autres, la granularité cohérente n'est utilisée que depuis une vingtaine d'années.

La théorie classique de la diffraction suppose explicitement que la particule diffractante est située entre la source de lumière et l'observateur. Y a-t-il quelque chose à voir de l'autre côté, c'est-à-dire sous un angle de 180° par rapport à la direction de propagation de la lumière ? Pour nous, oui. Les gouttes d'eau diffractent la lumière aussi bien vers l'arrière que vers l'avant. A un phénomène aussi remarquable, nous nous devons de réserver une brillante appellation, et c'est la gloire (fig. 14).

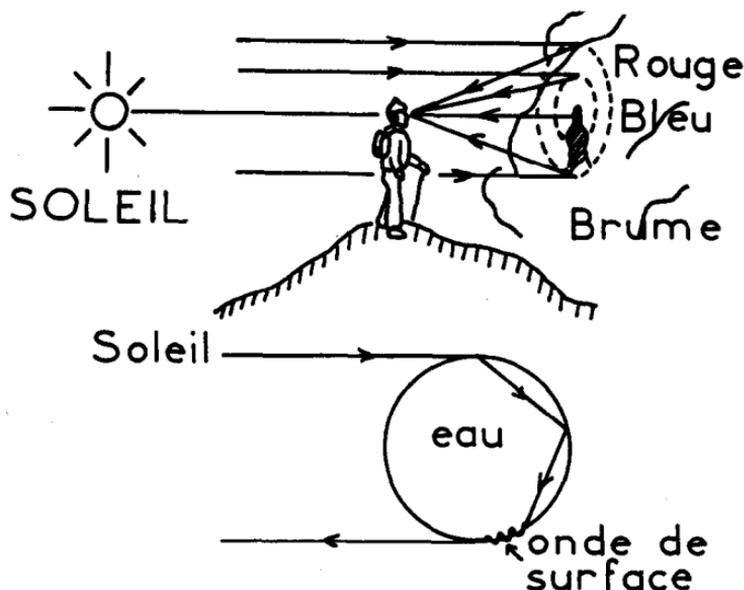


Fig. 14. — Origine de la gloire. Les gouttes d'eau du banc de brume diffractent la lumière vers l'arrière et les anneaux irisés entourent l'ombre de la tête de l'observateur, celle-ci étant le spectre du Brocken. En *b*), trajet de la lumière dans une goutte d'eau. Le renvoi à 180° est assuré par une onde de surface.

Le mécanisme de sa formation n'est pas encore complètement élucidé, mais la théorie généralement admise est la suivante. La lumière qui pénètre sous l'incidence rasante dans une goutte d'eau est réfractée, réfléchiée, puis réfractée à nouveau et transportée par une onde de surface de façon à repartir vers la source de lumière (fig. 14). Une onde de surface s'apparente aux ondes évanescentes et est bien connue dans la théorie et la pratique de la propagation des ondes électromagnétiques dans les conducteurs. Le décalage qu'elle entraîne pour le rayon lumineux est une variante de l'effet Goos-Hanchen. Il en résulte que la lumière renvoyée vers la source lumineuse paraît provenir d'un mince anneau de diamètre égal à celui de la goutte d'eau. Le calcul de l'intensité de la lumière diffractée par un ensemble de tels anneaux donne des résultats conformes à l'expérience. Comme pour la couronne et pour la même raison, les anneaux de diffraction sont irisés, avec le rouge vers l'extérieur. Par contre, l'intensité décroît moins vite d'un anneau au suivant, et il est fréquent d'en voir plusieurs.

L'observateur étant situé entre le Soleil et le nuage, la gloire entoure l'ombre de sa tête, ce qui est un spectacle exceptionnel. L'un des premiers comptes rendus est dû au sculpteur

Benvenuto Cellini qui y vit en toute modestie la marque de son génie. De nos jours, il est courant d'observer la gloire depuis un avion, ce qui la ramène à de plus justes proportions.

Pour la petite histoire, je rappelle que Wilson inventa la chambre à brouillard pour tenter de recréer la gloire en laboratoire. Quand il se rendit compte qu'il enregistrait plus facilement le passage des particules élémentaires, il abandonna vite l'optique au profit de la physique nucléaire...

III.2. Ciel bleu. Soleil bleu.

La diffraction de la lumière par les gouttelettes d'eau ou d'autres particules peut être décrite à partir du principe d'Huygens-Fresnel. Or, celui-ci n'est qu'un cas particulier d'une théorie plus générale basée sur les équations fondamentales de l'électromagnétisme, les équations de Maxwell, la théorie de la diffusion. Sans entrer dans le détail des calculs, nous pouvons donner quelques indications permettant d'interpréter ce phénomène fondamental, et de décrire quelques-uns des effets particuliers auxquels il donne naissance.

Le champ électrique alternatif de l'onde incidente exerce une force périodique sur les électrons liés aux atomes constituant les molécules d'air et les particules en suspension dans l'atmosphère. Chaque électron ainsi mis en mouvement réémet une onde électromagnétique de même fréquence que l'onde incidente, ce qui constitue la diffusion à proprement parler. L'électron mis en mouvement se comporte comme un courant électrique d'autant plus intense que son mouvement est plus rapide, donc que la fréquence de l'onde excitatrice est plus élevée. Plus le courant électrique est intense, plus le champ électromagnétique créé est important comme chacun sait. En d'autres termes, l'intensité de la lumière diffusée est d'autant plus grande que la lumière incidente est de fréquence plus élevée ou de longueur d'onde plus courte. Plus précisément, elle varie comme l'inverse de la puissance quatrième de la longueur d'onde, si bien que les radiations bleues sont à peu près quinze fois plus diffusées que les rouges. Par ailleurs, la lumière diffusée est émise de façon pratiquement isotrope autour de l'électron.

Ceci concerne un seul électron. La lumière diffusée par une particule est déterminée par l'interférence de toutes les ondes « élémentaires », ce qui peut en modifier considérablement la répartition spectrale aussi bien que spatiale par rapport au schéma précédent. Ainsi, pour une « grosse » particule, de quelques dizaines de micromètres de diamètre, nous retrouvons les résultats de la théorie classique de la diffraction.

Nous envisageons à présent le cas des « petites » particules, auxquelles nous ne pouvons pas appliquer les calculs de diffraction ni, *a fortiori*, ceux de l'optique géométrique.

Le cas le plus simple est celui où toutes les longueurs d'onde de la lumière visible sont grandes devant la taille de la particule, la limite généralement admise étant de l'ordre de 50 nanomètres, soit une agglomération de quelques milliers d'atomes au plus. En pratique, cette catégorie comprend les molécules des gaz constituant l'air ainsi que les plus petites gouttes d'aérosols et poussières. Tous les électrons sont soumis à chaque instant au même champ électrique, si bien que les ondelettes réémises par les électrons sont toutes en phase. La particule se comporte à très peu de choses près comme un atome isolé et les conclusions précédentes restent applicables.

Un tel milieu paraît bleu quelle que soit la direction d'observation, sauf bien entendu celle de la source de lumière qui, elle, paraît jaune ou même rouge si l'épaisseur traversée est suffisante. Ce mode de diffusion, dit de Rayleigh ou de Tyndall, est d'observation quotidienne — ou presque — puisqu'il est responsable de la couleur bleue du ciel et des couleurs orangées à rouge du Soleil couchant.

De nombreux milieux permettent d'observer une diffusion bleue. Parmi les plus immédiatement accessibles, je citerai une solution diluée de lait, de l'eau savonneuse, de la fumée de tabac,...

Dès que le diamètre de la particule est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière, le modèle précédent n'est plus satisfaisant et doit être remplacé par une théorie plus élaborée, celle de Mie.

Pour des particules de 0,4 à 0,5 μm de diamètre et d'indice de réfraction comparable à celui de l'eau, cette théorie prévoit un résultat curieux : la répartition spectrale de la lumière diffusée est inversée par rapport à celle indiquée par le modèle de Rayleigh. En d'autres termes, les radiations rouges sont fortement diffusées, et les bleues très peu. Si l'atmosphère se comportait ainsi, nous verrions un Soleil bleu dans un ciel orangé. Si étrange que puisse paraître une telle situation, elle a été effectivement observée à diverses reprises, par exemple en 1960 au cours de gigantesques incendies de forêt au Canada, en 1983, après l'éruption du Krakatoa, et, de temps en temps, à Pékin, quand le vent du nord soulève de la poussière de loess (4).

(4) Je donne cette dernière information sous toutes réserves, une enquête menée auprès de collègues chinois ayant eu un bilan négatif (NdA).

Les gouttes d'eau formant la brume ou les nuages ont un diamètre de l'ordre de quelques micromètres, bien supérieur à la longueur d'onde des radiations visibles. La théorie de Mie montre qu'alors la répartition spectrale de la lumière diffusée est pratiquement identique à celle de la lumière incidente. Là encore, il s'agit d'observations banales : les nuages sont blancs en cours de journée et roses ou orangés à l'aube ou au crépuscule. Par ailleurs, l'intensité de la lumière diffusée présente un maximum dans la direction de la lumière incidente et un second, moins accentué, dans la direction opposée.

Nous retrouvons ici les conditions signalées tout au début, qui nous permettent de voir les rais de lumière et le spectre du Brocken.

Pour terminer, je citerai deux phénomènes étranges, combinant les divers modes de diffusion : le second crépuscule et la lumière pourpre.

Les couleurs du crépuscule sont dues à la diffusion de la lumière du Soleil par des nuages convenablement situés. Au coucher du Soleil, la lumière traverse une forte épaisseur d'atmosphère, et les radiations bleues et même vertes sont fortement diffusées par les molécules d'air. La lumière qui tombe sur les nuages est donc orangé-rouge, de même que la lumière qu'ils diffusent. Quand le Soleil passe sous l'horizon, ces nuages de basse altitude, quelques kilomètres au plus, ne sont plus éclairés et la nuit tombe. Certaines éruptions volcaniques intenses créent à haute altitude, environ 80 kilomètres, une mince couche d'aérosols qui diffusent aussi la lumière. Etant plus haute, elle est éclairée plus tard par le Soleil, ce qui prolonge le crépuscule ou même le renouvelle quand la géométrie de l'ensemble s'y prête (fig. 15).

Quand l'atmosphère contient une concentration suffisante de très petites particules, il peut arriver que la lumière bleue diffusée par l'air ait une intensité comparable à la lumière rouge diffusée par les nuages au crépuscule. Le paysage est alors baigné par le mélange des deux, ce qui donne une lumière dite pourpre, en fait plutôt violacée que rougeâtre. J'ai eu la chance d'être témoin, à plusieurs reprises, de ce phénomène et je puis vous garantir que l'effet en est saisissant.

Nous voici au terme de notre promenade, encore que nous n'ayons pas tout exploré, loin s'en faut. J'ai cru bon d'insister sur les effets lumineux qui ne font intervenir que les lois les plus simples, celles de l'optique géométrique, et qui sont peut-être plus proches de vos préoccupations immédiates. Quoi qu'il en soit, j'espère que notre petit tour d'horizon vous incitera à

ouvrir de temps à autre les rideaux de votre salle de cours et à inviter la Nature à participer à vos leçons d'optique.

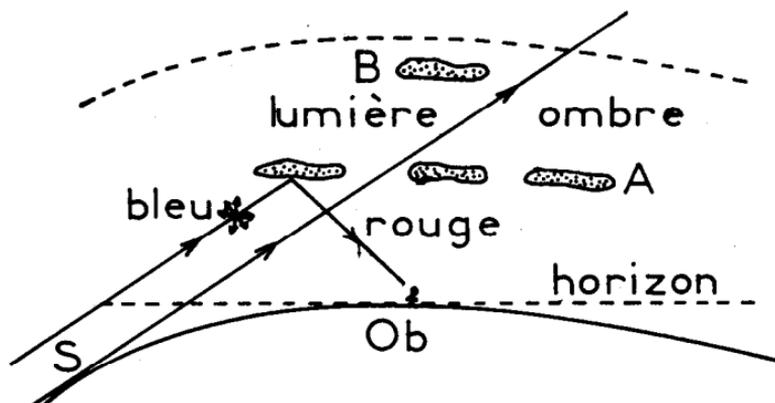


Fig. 15. — Couleurs du crépuscule. Le Soleil S est sous l'horizon pour l'observateur Ob. Les nuages bas A sont en partie dans l'ombre, tandis que les nuages hauts B sont encore éclairés. La combinaison de la lumière bleue diffusée par les molécules d'air et de la lumière rouge diffusée par les nuages peut créer la lumière pourpre.

ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE

Il n'existe pas d'ouvrage récent en français traitant d'optique atmosphérique. Au hasard des bibliothèques, vous pourrez peut-être trouver des « ancêtres » comme :

C. FLAMMARION. — *Atmosphère-Météorologie populaire*. Hachette, Paris, 1888.

MARGOLLE et ZURCHER. — *Les météores*. Hachette, Paris, 1867.

En anglais, les deux « bibles » :

M. MINNAERT. — *The nature of light and color in the open air*. Dover New York, 1954.

R. GREENLER. — *Rainbows, halos and glories*. Cambridge University Press, New York, 1980.

Deux autres ouvrages :

R. TRICKER. — *Introduction to optical meteorology*. Elsevier, New York, 1970.

Un bon ouvrage, malheureusement épuisé.

A. et M. MEINEL. — *Sunsets, twilights and evening skies*. Cambridge, University Press, New York, 1983.

Évitez le texte mais admirez les photographies.