

Union des professeurs de physique et de chimie

La lumière polarisée dans la nature

par **Roland JOUANISSON**

roland.jouanisson@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

Après un bref historique des découvertes sur la polarisation de la lumière, l'auteur rappelle les résultats théoriques concernant la réflexion vitreuse et la diffusion. Suit une présentation générale de la polarisation dans les phénomènes majeurs de l'optique atmosphérique ainsi qu'une description des méthodes expérimentales mises en œuvre pour leur observation.

Un faisceau lumineux est décrit par trois propriétés : son intensité, sa composition spectrale (qui détermine sa couleur) et son état de polarisation. C'est grâce aux deux premières propriétés que nous prenons connaissance de l'essentiel des informations sur le monde qui nous entoure. Quant à la polarisation, sa découverte est récente : la principale raison en est que nous ne sommes pratiquement pas sensibles à cette propriété.

En fait, la lumière polarisée n'est pas rare dans la nature : que l'on songe à la lumière diffusée par le ciel et aux lumières réfléchies par différentes surfaces comme les eaux calmes de nos étangs. On connaît aujourd'hui un grand nombre de phénomènes polarisés comme, par exemple, l'arc-en-ciel, de sorte qu'un observateur muni d'un analyseur a une vision du monde notablement différente du monde qui nous est familière.

Curieusement, les premières observations concernant la lumière polarisée sont dues aux propriétés biréfringentes de certains cristaux, plutôt rares, comme la tourmaline et la cordiérite qui sont dichroïques, ou le spath d'Islande. Il n'est pas impossible que les navigateurs Vikings aient été, vers l'an 1000, capables de se diriger par ce moyen en utilisant la polarisation du ciel. La première découverte sûre est due à un médecin danois, Erasme BARTHOLIN, qui observa la double réfraction des cristaux de calcite en 1669. HUYGENS



Étienne-Louis MALUS
(1775-1812)

découvrit en 1690 la polarisation des deux faisceaux réfractés mais ne fut pas en mesure d'en donner une explication. On disposait alors d'un analyseur potentiel efficace et malgré cela il faudra attendre plus d'un siècle pour qu'on découvre la polarisation par réflexion. Cet honneur revient à un Français, Étienne-Louis MALUS.

Cette découverte mérite qu'on s'y arrête un instant. MALUS, comme la plupart des élèves de l'École des Ponts et Chaussées créée en 1794, partageait son temps entre l'armée et la recherche. Pendant les interruptions dues à la maladie (MALUS fut deux fois atteint de la peste pendant l'expédition d'Orient), il s'intéressa à la théorie de la lumière qui faisait alors l'objet de spéculations passionnées. En 1808, des fenêtres de sa maison, rue d'Enfer à Paris, il examinait, à l'aide d'un cristal biréfringent, le disque solaire réfléchi par

les vitres du Palais du Luxembourg et eut la surprise de constater la disparition périodique des images lors d'une rotation de son dispositif. Pendant la nuit même de cette découverte MALUS déterminait l'angle sous lequel apparaît la polarisation totale sur l'eau et le verre. Par la suite il étudia la double réfraction, proposa de nommer le phénomène « polarisation », nom qui lui est resté, et établit les lois désormais connues sous le nom de « lois de MALUS ». Un nouveau champ de recherches particulièrement fécond venait de naître.

On se propose dans cet article de donner des indications pratiques pour observer la polarisation de divers phénomènes naturels polarisés, soit par réflexion, soit par diffusion. Pour cela un analyseur est nécessaire. Dans certains cas un morceau de polaroïd du commerce suffit pour analyser des lumières fortement polarisées rectilignement. Pour certaines observations on a cependant intérêt à réaliser un analyseur à pénombre selon la technique qui sera décrite plus loin : un tel appareil est en effet indispensable pour repérer avec précision une direction de polarisation. Il existe également des situations où l'on peut utiliser un analyseur naturel, tel que la surface réfléchissante d'une eau calme.

RAPPELS THÉORIQUES

L'onde lumineuse est transversale, de sorte que la direction de vibration est toujours perpendiculaire à la direction de propagation. Avec une lumière naturelle on peut considérer que la direction de vibration change un grand nombre de fois, de façon statistiquement symétrique par rapport à tout plan contenant le rayon médian du pinceau, pendant la durée nécessaire pour faire une observation. C'est le cas de la lumière émise par le soleil et la plupart des sources. Dans le cas d'une lumière polarisée rectilignement la direction de vibration est fixe : l'onde se propage dans un plan déterminé (cf. figure 1). Lorsqu'une lumière naturelle traverse un polariseur, 50 % de la lumière incidente est

interceptée (c'est à peu près le cas avec un prisme de Nicol dans lequel on élimine une des composantes polarisées) ; avec un polaroïd dichroïque, qui a la propriété d'atténuer différemment les composantes, on obtient environ 35 % de lumière polarisée et de plus cette lumière est légèrement colorée, ce qui peut constituer parfois un inconvénient.

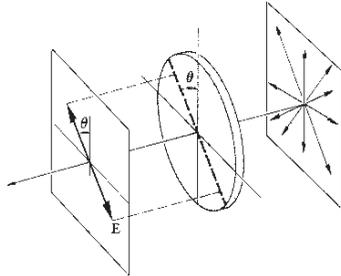


Figure 1 : Obtention d'une lumière polarisée rectilignement à l'aide d'un « polaroïd ».

Dans un grand nombre de cas on observe une lumière partiellement polarisée : on peut considérer qu'une telle lumière est la superposition d'une lumière naturelle et d'une lumière totalement polarisée. On appelle I l'intensité de la lumière transmise par un analyseur. Quand son axe effectue un demi-tour dans un plan normal à la direction de propagation du pinceau, I passe par un minimum I_m et un maximum I_M pour des directions orthogonales. On appelle « taux (ou degré) de polarisation de Rubenson » la quantité :

$$T = \frac{(I_M - I_m)}{(I_M + I_m)}$$

Il s'avère que, si le pinceau est (partiellement) polarisé linéairement, T est égal au « taux (ou degré) de polarisation » traditionnel, défini par le rapport de l'intensité de la lumière polarisée à l'intensité totale du pinceau (décrit formellement comme superposition incohérente d'un pinceau naturel et d'un pinceau parfaitement polarisé). Ce taux varie de 0 à 1 quand on passe d'une lumière naturelle à une lumière totalement polarisée rectilignement.

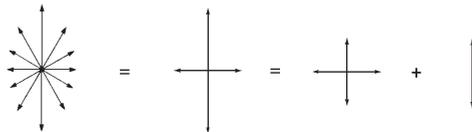


Figure 2 : Représentation schématique d'une lumière partiellement polarisée.

On emploie parfois le terme de *polarisation négative* quand la direction de polarisation est perpendiculaire à une direction initiale de référence.

POLARISATION PAR RÉFLEXION

La polarisation de la lumière est une conséquence directe de son caractère trans-

versal. Ainsi la théorie électromagnétique permet de justifier la polarisation totale d'une lumière naturelle par réflexion sur un diélectrique sous l'incidence brewsterienne.

Diverses expériences permettent d'identifier le champ électrique \mathbf{E} à la direction de vibration. On considère un rayon SO faisant un angle i avec la normale à la surface en O ; le réfracté correspondant fait un angle r . Soit a et b les composantes de \mathbf{E} respectivement dans le plan d'incidence yOz et dans le plan perpendiculaire, a' b' les composantes réfractées, a'' b'' les composantes réfléchies (les sens positifs choisis pour E'_y , E'_r et E''_y sont précisés sur la figure 3).

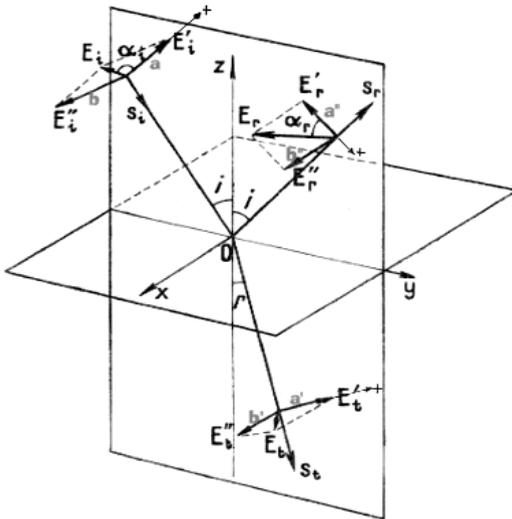


Figure 3

Le calcul donne : $a'' = -a \frac{\tan(i - r)}{\tan(i + r)}$ $b'' = -b \frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)}$

De ces formules on déduit que a'' s'annule lorsque $i + r = 90^\circ$. Il en résulte que la lumière réfléchie est totalement polarisée dans une direction perpendiculaire au plan d'incidence lorsque le rayon réfléchi est normal au rayon réfracté. L'application de la loi de Descartes donne : $\tan i_b = n$.

Si la lumière incidente est naturelle, on peut la considérer comme formée de deux composantes rectangulaires égales, sans cohérence de phase ; le rapport des intensités vaut :

$$(a''/b'')^2 = \frac{\cos^2(i + r)}{\cos^2(i - r)}$$

Cette formule montre que, sauf pour l'incidence normale et l'incidence rasante, la lumière est toujours partiellement polarisée avec prépondérance de la vibration perpendiculaire au plan d'incidence.

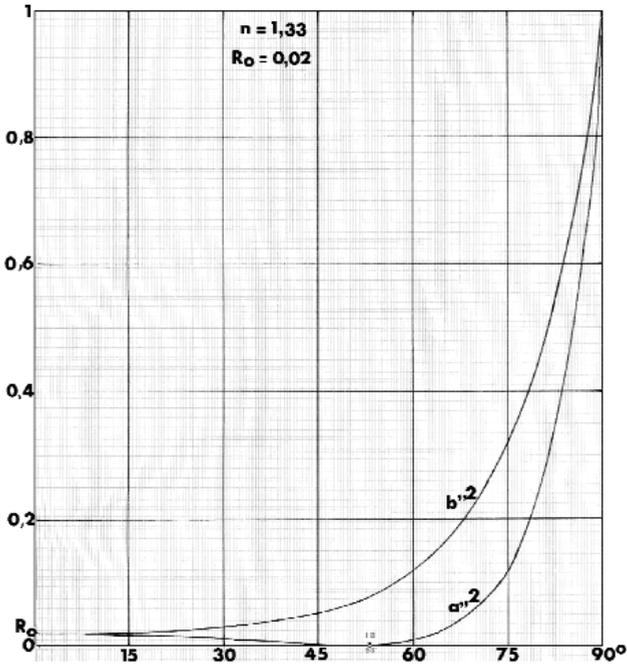


Figure 4 : La figure montre comment varient les intensités réfléchies rapportées aux intensités incidentes $(a''/a)^2$ et $(b''/b)^2$.

Dans la nature les polarisations par réflexion sont dues le plus souvent au passage air/eau pour lequel l'indice de réfraction n est voisin de 1,33. L'angle de Brewster vaut alors 53° . La valeur absolue de la quantité $\frac{b''^2 - a''^2}{b''^2 + a''^2}$ permet de calculer le taux de polarisation pour un angle d'incidence quelconque. Ainsi, pour $i = 45^\circ$ on trouve $T = 90\%$; pour $i = 75^\circ$ le taux est voisin de 50% .

Les formules précédentes permettent de calculer également l'intensité de la lumière réfléchiée sous l'incidence brewsterienne. Le calcul donne :

$$(b''/b)^2 = \frac{(n^2 - 1)^2}{(n^2 + 1)^2}$$

Pour $n = 1,33$ ce rapport est faible (inférieur à 8%). Avec le verre ordinaire situé dans l'air on trouve 15% .

Cas où la lumière incidente est polarisée rectilignement

Supposons que la lumière incidente soit polarisée. Si la direction de vibration est soit parallèle soit perpendiculaire au plan d'incidence il en est de même de la vibration

réfléchi. Si la vibration incidente fait un angle α avec la normale au plan d'incidence on peut la décomposer en deux vibrations rectangulaires cohérentes en phase, d'amplitude :

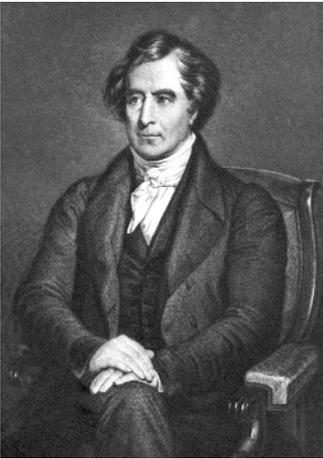
$$b = A \cos \alpha \quad a = A \sin \alpha$$

La vibration réfléchi est la résultante de deux vibrations rectilignes cohérentes dont les amplitudes sont données par les relations de Fresnel. On obtient une vibration rectiligne qui fait avec la normale au plan d'incidence un angle α'' tel que :

$$\tan \alpha'' = \frac{a''}{b''} = \tan \alpha \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}$$

Pour $\alpha = 45^\circ$ et pour une incidence de 45° on trouve $\alpha'' = 13^\circ$. C'est pourquoi la polarisation d'un arc-en-ciel réfléchi par un plan d'eau est différente de celle de l'arc lui-même, car elle est presque parfaitement polarisée rectilignement

POLARISATION PAR DIFFUSION



François ARAGO
(1786-1853)

La diffusion de la lumière par les molécules de gaz de l'atmosphère qui est responsable, selon la théorie de RAYLEIGH, de la couleur du ciel, s'accompagne de polarisation. Cette lumière polarisée a été analysée par François ARAGO en 1809. Celui-ci a découvert notamment l'existence d'un point neutre (sans polarisation). Sur sa lancée, ARAGO découvrit la polarisation des queues de comètes, des halos, de la lune. Sa découverte la plus importante fut cependant le pouvoir rotatoire du quartz.

La diffusion de la lumière est responsable, dans la nature, d'un grand nombre de phénomènes polarisés. Lorsqu'une onde lumineuse rencontre une particule mésoscopique quelconque elle entraîne la vibration forcée des électrons qui émettent à leur tour de la lumière vibrant dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Supposons une onde incidente polarisée \mathbf{E} arrivant sur une molécule (cf. figures 5a et 5b) de polarisabilité isotrope. Elle ne peut donner naissance qu'à des vibrations parallèles à \mathbf{E} : on n'observe pas de lumière diffusée se propageant dans la direction de \mathbf{E} puisque l'onde est transversale. Si la lumière incidente est naturelle on peut la représenter par deux composantes orthogonales : la lumière diffusée est la superposition incohérente des deux états correspondants. Dans la direction de l'onde incidente la lumière n'est pas polarisée ; dans la direction perpendiculaire, elle est totalement polarisée ; en dehors de ces axes elle est partiellement polarisée (cf. figure 6).

Le taux de polarisation T varie donc selon la direction de la lumière diffusée. Si θ

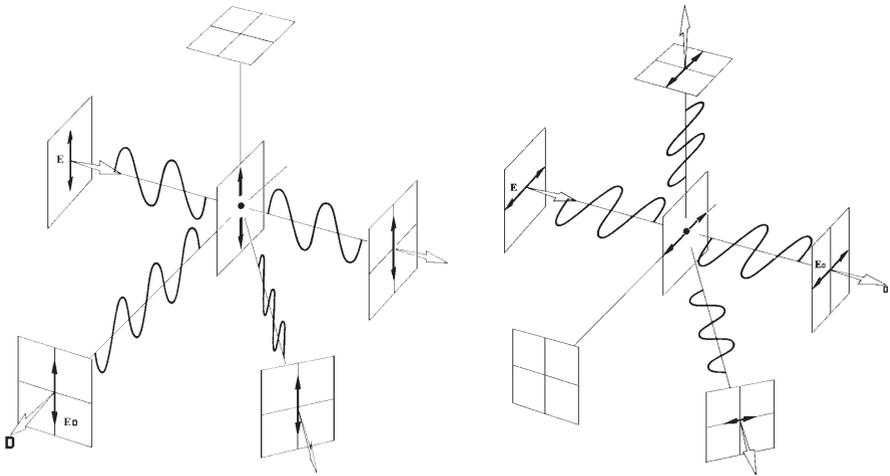


Figure 5a

Figure 5b

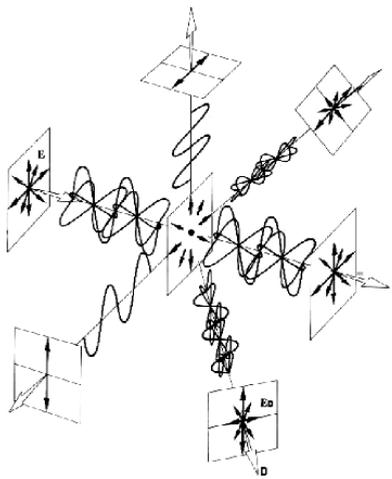


Figure 6 : Polarisation par diffusion.

désigne l'angle formé par la direction incidente avec la direction de la lumière diffusée le calcul donne :

$$T = \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta}$$

Ainsi pour $\theta = 45^\circ$ on trouve $T = 33 \%$. En réalité les valeurs expérimentales sont inférieures, pour des raisons diverses que l'on verra plus loin. La valeur maximale observée dans la direction perpendiculaire au soleil est de l'ordre de 75% .

Le taux de polarisation serait indépendant de la longueur d'onde s'il ne se produisait que de la diffusion RAYLEIGH simple et par des molécules de polarisabilité isotrope. Comme l'efficacité de diffusion décroît en fonction de λ dans le domaine visible il en est de même pour l'importance de la diffusion multiple ; aussi la valeur maximale de T dans le ciel croît avec λ .

Lorsque les particules ne sont plus petites par rapport à λ les phénomènes ne peuvent pas être décrits aussi simplement. On observe encore une polarisation dans de nombreux cas : nuages, queues de comètes, lumière zodiacale, fumées légères, etc. D'une manière générale, lorsque les particules ont des dimensions très supérieures à λ , les phénomènes de diffusion dépendent de nombreux facteurs, comme la forme, l'orientation et les propriétés optiques des particules. Il y a lieu aussi de faire intervenir les phénomènes de réflexion, réfraction, diffraction. C'est le cas des halos et arcs-en-ciel que l'on interprétera de la sorte. En fait il n'y a pas de frontière nette entre les différents types de phénomènes.

INSTRUMENTS D'OBSERVATION

Étant donné que nous sommes pratiquement insensibles à la lumière polarisée (contrairement à certaines espèces comme les abeilles, fourmis, langoustes et quelques autres animaux), il est nécessaire d'avoir recours à des analyseurs. Il n'est pas possible de se contenter des « touffes de Haidinger », ces petites figures jaunâtres que certaines personnes perçoivent en présence de lumière polarisée.

Le plus simple est de se procurer un filtre de type polaroïd avec lequel on pourra, soit polariser une lumière naturelle, soit analyser une lumière naturelle ou circulaire. Il est commode d'équiper également une paire de lunettes en disposant les filtres de manière que les vibrations transmises soient verticales (de manière à éliminer les lumières polarisées horizontalement). Un appareil photographique sera équipé d'un analyseur mobile autour de l'axe optique. Dans tous les cas la direction de vibration transmise par l'analyseur sera soigneusement repérée sur celui-ci.

Avec ce type de filtres il est difficile de repérer une direction à mieux que quelques degrés près, surtout pour les faibles éclaircissements. D'une manière générale, pour repérer une direction de polarisation, on tourne l'analyseur de manière à observer un minimum de lumière : la position ainsi repérée est perpendiculaire à la position cherchée. En effet, la recherche du maximum de lumière qui permettrait d'obtenir directement la position cherchée est beaucoup moins précise. Cela tient au fait que la sensibilité de l'œil aux variations d'éclairement E dépend essentiellement du rapport $\Delta E/E$ quand on passe d'une plage où l'éclairement est E à une plage où il est $E-\Delta E$. Or, pour le même ΔE le rapport est globalement plus grand au voisinage d'un minimum de lumière. Dans les deux cas la sensibilité est diminuée par le fait que les variations d'éclairement sont continues.

Il existe un moyen d'améliorer de manière importante la sensibilité de la méthode en utilisant un analyseur à pénombre comportant une lame demi-onde sur la moitié du

champ à analyser. Cette lame a la propriété de transformer une vibration rectiligne A_1 en une vibration A_2 symétrique par rapport aux lignes neutres de la lame (cf. figure 7). On est alors amené à comparer deux plages contiguës a'_1 et a'_2 , séparées par une ligne nette, et qui ont le même éclairement lorsque la vibration à analyser est normale à la bissectrice de l'angle formé par les directions de A_1 et A_2 . On se trouve ainsi dans les conditions optimales pour l'observation. L'appareil qu'on vient de décrire sommairement est utilisé en polarimétrie pour des mesures de précision et n'est pas particulièrement adapté pour les observations qu'on se propose de faire avec les phénomènes naturels. Cependant, sur le même principe on pourra réaliser très simplement un analyseur avec deux morceaux de polaroïd juxtaposés selon une droite bissectrice de l'angle formé par leurs directions de polarisation (cf. figure 8). (On trouvera des précisions sur cette réalisation dans mon article cité en référence 11.

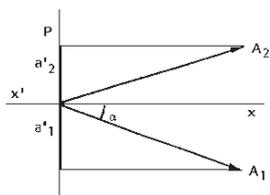


Figure 7 : Principe de l'analyseur à pénombre : comparaison de deux plages d'éclairements voisins.

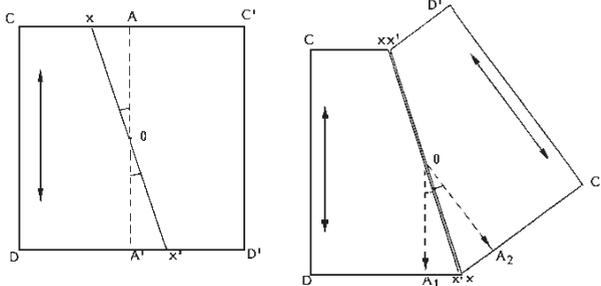


Figure 8 : Réalisation d'un analyseur à pénombre à l'aide d'un morceau de polaroïd.

LA POLARISATION DU CIEL

La couleur du ciel est due à la diffusion de la lumière par les molécules présentes dans l'atmosphère (l'intensité diffusée varie approximativement comme $1/\lambda^4$). Les différentes particularités que l'on observe sont liées à la position du soleil et au fait que l'épaisseur d'atmosphère traversée par la lumière solaire est plus faible au zénith qu'à l'horizon.

Le ciel bleu est fortement polarisé selon un mode « tangentiel », c'est-à-dire que le vecteur E vibre perpendiculairement à l'arc de grand cercle joignant sur la sphère céleste la source au point observé. Le taux de polarisation est maximum au crépuscule, pour un angle de 90° , et peut atteindre 75 % dans les meilleurs cas. Il diminue quand on s'écarte de cette position : 30 % au plus pour un angle de 45° . Le taux est nul dans la direction du soleil ainsi que dans la direction opposée. Un ciel brumeux fait chuter ce taux de manière importante. Au lever et au coucher du soleil la polarisation est verticale avec un fort taux sur la plus grande partie de l'horizon. Si le soleil est haut dans le ciel, la polarisation varie beaucoup avec la direction d'observation.

Quand on observe le ciel à travers un analyseur on note une bande sombre d'un bleu profond qui correspond au maximum de polarisation dans une direction faisant un angle

de 90° avec celle du soleil (cette particularité sera plus facile à voir si l'on photographie le ciel à l'aide d'un objectif à grand champ qui permet de voir simultanément la plus grande partie du ciel). Il est donc possible de se diriger en l'absence de soleil. C'est ce que font certains insectes en utilisant, semble-il, la lumière ultraviolette.

Polarisation « négative »

D'une manière générale, la polarisation du ciel est maximale lorsque le soleil est juste au dessous de l'horizon. On remarquera que la Terre est alors entièrement éclairée par de la lumière polarisée dont le taux de polarisation est maximal au zénith. Dans cette situation particulière (S proche de l'horizon) on constate un phénomène curieux : si l'on trace une carte de la polarisation en partant du zénith et en se dirigeant, sur le grand cercle de la sphère céleste, vers le point opposé au soleil (S), on constate que le taux de polarisation devient nul pour une hauteur d'environ 25° au-dessus de l'horizon, puis recommence à croître, avec cette fois, une direction de vibration perpendiculaire à l'horizon (on dit qu'elle est « négative »). Le point N où la polarisation est nulle est appelé *point neutre d'Arago* (cf. figure 9). Il en résulte que la direction de polarisation est verticale comme pratiquement partout sur l'horizon.

On peut également observer cette polarisation négative sur des nuages isolés qui ne sont plus éclairés directement par le soleil. On explique ce phénomène par le fait que les particules (P) concernées sont éclairées par le ciel et non par le soleil. La lumière provenant du zénith est polarisée horizontalement et celle provenant de l'horizon l'est verticalement (cf. figure 10). Or la plus grande partie de la lumière vient de l'horizon ; de plus, les diffusions multiples apportent une contribution dans ce sens.

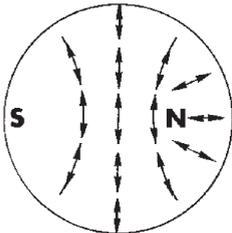


Figure 9 : Polarisation du ciel au crépuscule.

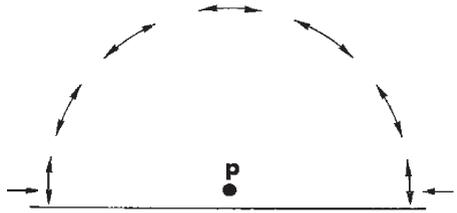


Figure 10

Polarisation des nuages

La lumière diffusée par les nuages est polarisée et cette polarisation dépend de la manière dont ils sont éclairés. Par exemple, si le soleil éclaire directement des nuages isolés peu épais, on constate une polarisation tangentielle comme pour le ciel bleu, mais avec un taux bien inférieur. Il existe de nombreux types de nuages mais la polarisation de la lumière diffusée ne dépend que de la manière dont ils sont éclairés, de leur composition (glace ou eau), de leur densité et de la taille des constituants. De telles observations sont délicates et nécessitent un analyseur à pénombre. Nous ne développerons pas

cet aspect. En revanche, il est possible de profiter de la différence importante de polarisation entre le ciel et les nuages pour procéder à certaines observations. Par exemple, si on observe le ciel à travers un analyseur le contraste entre le ciel et les nuages est beaucoup plus net (cf. photo 2) quand l'analyseur est orienté de manière à éliminer la lumière polarisée du ciel.



Photo 1



Photo 2 : La lumière du ciel observée à travers un analyseur.

Une observation analogue peut être réalisée encore plus simplement (sans appareil) en utilisant comme analyseur la surface réfléchissante d'une étendue d'eau calme. On a vu, en étudiant la figure 4, que le taux de polarisation varie lentement autour de l'incidence brewsterienne (53°), de sorte que le plan d'eau peut être, dans ces conditions, un bon analyseur ; de plus il permet de comparer, simultanément, les deux images. Comme l'axe de l'analyseur est nécessairement horizontal, on obtiendra les résultats les plus spectaculaires lorsque la lumière incidente polarisée est verticale, c'est-à-dire le matin ou le soir quand on regarde le reflet de régions du ciel sous une incidence convenable (cf. photo 3).

Dans certaines circonstances il peut être intéressant d'éliminer la lumière polarisée de manière à observer plus nettement des objets. On peut ainsi éliminer partiellement de légers nuages, des fumées, des lointains brumeux, etc. Cette technique est bien connue des photographes amateurs.



Photo 3 : La surface de l'eau utilisée comme analyseur.

Il est à noter également que la lune produit les mêmes effets que le soleil. La polarisation du ciel nocturne obéit aux mêmes lois que le ciel diurne. En fait, l'œil n'est pas capable de discerner les couleurs sous un éclairage trop faible. Cependant il est possible de mettre en évidence la polarisation, notamment pendant la pleine lune.

POLARISATION DE L'ARC-EN-CIEL

Parmi les phénomènes naturels, l'arc-en-ciel est certainement l'un des plus remarquables. Son explication scientifique a été élaborée très progressivement et continue de faire l'objet de recherches. Au niveau élémentaire sa compréhension exige que l'on maîtrise plusieurs lois physiques concernant la lumière, notamment : réfraction, réflexion, dispersion, interférences, diffraction et polarisation.

On pourra trouver les données théoriques, supposées connues du lecteur, dans divers ouvrages et articles. On rappelle seulement ici les éléments nécessaires à l'étude de la polarisation en insistant sur certains points, généralement peu explicités.

Pour l'étude qui suit on suppose que la source de lumière (le Soleil) est ponctuelle et que les gouttes d'eau sont sphériques.

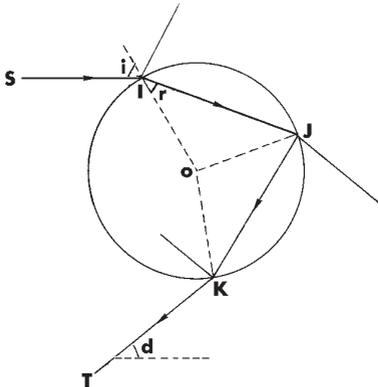


Figure 11 : Formation de l'arc primaire.

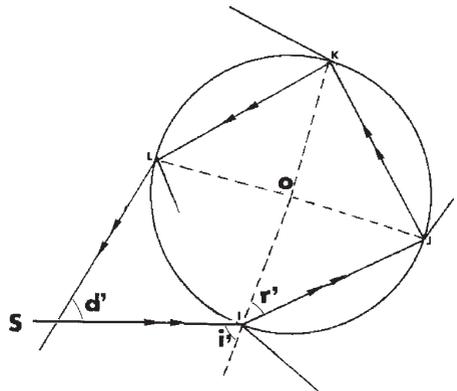


Figure 12 : Formation de l'arc secondaire.

La figure 11 représente le trajet du rayon de DESCARTES (souligné par une flèche) correspondant au minimum de déviation pour lequel on observe l'arc primaire. Les valeurs numériques sont les suivantes pour une goutte d'eau sphérique d'indice $n = 1,33$ et pour la longueur d'onde moyenne du spectre :

$$i = 59^\circ \quad r = 40^\circ \quad d = 42^\circ$$

On notera qu'une partie de la lumière provenant du Soleil S est réfléchiée en I, la plus grande partie est réfractée en J et sort de la goutte, une autre partie est réfléchiée en K et contribue à la formation de l'arc secondaire. En définitive, moins de 5 % de la lumière incidente se retrouve dans le rayon considéré. Par suite des propriétés du minimum de déviation il y a cependant une accumulation de lumière dans la direction de l'arc.

NB : Pour les lecteurs qui seraient enclins à penser qu'il y a réflexion totale au point J, il convient de faire remarquer que cette situation est physiquement impossible : s'il y avait réflexion totale en ce point il en serait de même en K, etc. et la lumière subi-

rait une succession de réflexions totales sans pouvoir ni entrer ni sortir ; de plus, la réflexion totale n'augmente pas le taux de polarisation.

La compréhension des phénomènes, et en particulier la *forme de l'arc* ainsi que la *polarisation tangentielle* est facilitée si l'on fait remarquer que ces propriétés sont une *conséquence directe* de la *première loi* de DESCARTES, à savoir que le rayon incident SI, les trajets IJ, JK et le rayon émergent KT sont dans *un même plan passant par le centre de la sphère* (plan diamétral pris ici comme plan de figure).

La lumière incidente provenant du soleil subit une forte polarisation, dite positive, car elle est dans une direction perpendiculaire au plan d'incidence, lors de la *réflexion interne* en J. En effet, l'angle d'incidence en ce point vaut 40° , angle très voisin de l'incidence de Brewster donnée par la relation $\tan i_B = 1/n$, soit $i_B = 37^\circ$. Le taux de polarisation est supérieur à 90 %. Pour l'arc secondaire correspondant au trajet doublement fléché (cf. figure 12), l'angle d'incidence i' est de 72° , l'angle r' est voisin de 45° de sorte que le taux de polarisation est un peu moins élevé. En fait, les réfractions en I et L donneraient (s'il n'y avait pas de réflexion en J) une faible polarisation négative ; mais l'effet majeur sur la polarisation est celui des réflexions en J et K, donc la polarisation partielle de l'arc secondaire est bien positive. En définitive si l'on tient compte des polarisations négatives on constate que la direction de polarisation de la lumière émergente n'est pas exactement normale au plan d'incidence.

À l'aide de la figure 13 on schématise des gouttes *sphériques* situées le long de la circonférence de l'arc. L'observateur reçoit simultanément les pinceaux de lumière situés dans les plans diamétraux des sphères et par conséquent normaux à l'arc. On voit donc immédiatement que les *directions de polarisation, perpendiculaires aux différents plans d'incidence sont constamment tangentes à l'arc* lui-même. En conséquence, avec un analyseur ordinaire, on ne pourrait éteindre simultanément tous les points de l'arc, même si le taux de polarisation était égal à 1 en chacun d'eux.

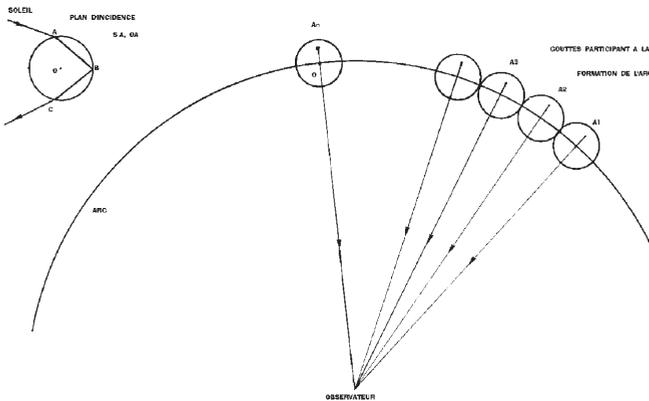


Figure 13 : La direction de polarisation est perpendiculaire au plan d'incidence, elle est donc tangente à l'arc.

Polarisation au voisinage de l'arc

À l'intérieur de l'arc primaire et à l'extérieur de l'arc secondaire le ciel est plus lumineux qu'entre les deux arcs où apparaît la *bande sombre d'Alexandre* (cf. photo 4).

L'intérieur de l'arc primaire, en particulier, est beaucoup plus lumineux. Cela est dû au fait que le supplémentaire du rayon angulaire est un minimum de déviation de la lumière par les gouttes. Des réflexions à l'intérieur des gouttes, selon des parcours analogues à ceux qui ont conduit à l'interprétation de l'arc primaire, sont observées dans des directions voisines. En faisant appel aux phénomènes d'interférences on explique la présence des arcs surnuméraires, peu nombreux en lumière blanche (cf. photo 5) à cause du brouillage des franges dû à la superposition des couleurs. Dans une telle interprétation l'arc primaire correspond à la frange d'ordre zéro et les arcs voisins aux ordres suivants 1, 2, 3, et rarement au-delà.

On peut donner une preuve expérimentale de cette interprétation en opérant avec un modèle simplifié en lumière monochromatique avec un faisceau laser diffusé par une goutte d'eau. Dans ces conditions on voit nettement qu'au-dessus de l'arc primaire il n'y a pas de lumière réfléchie (zone de la bande d'Alexandre) ; à l'intérieur de l'arc on observe la lumière réfléchie répartie dans les nombreux ordres d'interférences visibles dans ce cas (cf. photo 6). Ce sont les franges typiques du voisinage d'une caustique.

Auprès des arcs la lumière à l'intérieur de l'arc primaire (et à l'extérieur de l'arc secondaire) est polarisée dans les mêmes directions que sur les arcs eux-mêmes.

Dans la bande sombre on n'observe pas de lumière réfléchie à l'intérieur des gouttes mais uniquement de la lumière réfléchie extérieurement, au moment de pénétrer dans la goutte. La polarisation qui en résulte est également tangentielle mais la quantité de lumière réfléchie est faible (environ 3 % pour un angle d'incidence de 30° correspondant à une direction voisine de celle de l'arc). De plus le taux de polarisation est faible dans ces conditions.

Sur l'ensemble du front pluvieux qui donne naissance à l'arc-en-ciel la lumière est polarisée tangentiellement à cause de la lumière réfléchie par la face antérieure des gouttes. Le maximum de polarisation est atteint dans les régions du ciel où l'angle d'incidence est égal à l'angle de BREWSTER, mais même dans ce cas le taux de polarisation est très inférieur à celui des arcs car la lumière obéissant à cette condition ne représente qu'une faible partie de la lumière réfléchie.

Les parties du ciel bleu non masquées par les nuages sont polarisées comme on l'a vu précédemment.

Arcs-en-ciel réfléchis

L'arc-en-ciel n'est pas rare dans la nature mais les observations sont parfois délicates car les conditions météorologiques peuvent varier rapidement : il convient donc d'être toujours prêt à intervenir. Les arcs observés près des cascades sont plus stables mais ne présentent pas, en général, d'intérêt particulier.



Photo 4 : Arcs primaire et secondaire ; l'intérieur de l'arc primaire est plus lumineux.



Photo 5 : Arcs surnuméraires à l'intérieur de l'arc primaire.

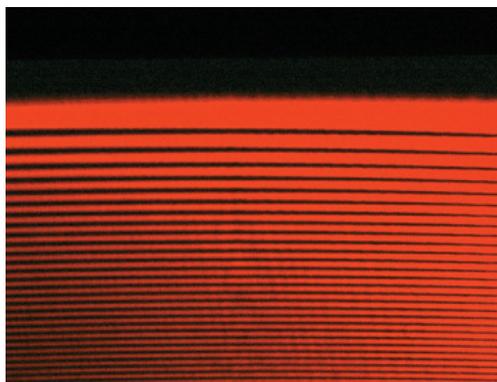


Photo 6 : Simulation d'arcs surnuméraires en lumière monochromatique.

Parmi les curiosités il faut noter l'existence d'arcs réfléchis. Deux cas sont envisagés : les arcs *réfléchis* par une surface (par exemple une eau calme) et les arcs formés à partir de *l'image du soleil dans un miroir*.

Dans le premier cas on constate que la direction de polarisation change peu par rapport à l'arc (noté a sur la figure 14). En effet, lors d'une réflexion sous une incidence importante la composante horizontale est beaucoup moins affaiblie que la composante verticale (qui est même totalement éteinte sous l'incidence brewsterienne). On constate seulement une rotation qui a pour effet de rendre la polarisation plus proche de l'horizontale. La figure 14 montre que dans ces conditions la polarisation n'est plus tangente à l'arc (courbe b) ; pratiquement, il est possible d'éteindre simultanément un point P quelconque de l'arc et son image P'.

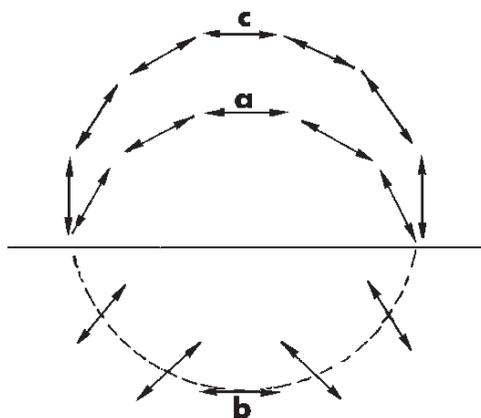


Figure 14 : Polarisation d'arcs réfléchis.

Le deuxième cas se produit très rarement (courbe c) ; la polarisation est presque tangente à l'arc car le fait que la lumière incidente soit polarisée par réflexion ne change que légèrement le taux et l'orientation de la polarisation, et la laisse rectiligne

AUTRES PHÉNOMÈNES DE POLARISATION PAR RÉFLEXION

Il existe de nombreuses situations, telles que celles qui ont permis la découverte de MALUS, où nous sommes confrontés à une lumière polarisée par réflexion. Chacun est en mesure de les déceler facilement. Signalons seulement des expériences où il peut être utile d'éliminer la lumière réfléchie lorsqu'elle est gênante (lumière des phares d'automobiles réfléchie sur une chaussée mouillée, lumière réfléchie à la surface de l'eau empêchant l'observation en profondeur, etc.). Les photographies 7 et 8 illustrent un cas particulier facile à observer. En éliminant une grande partie de la lumière réfléchie sur les vitres on peut distinguer les objets à l'intérieur du véhicule et même voir le rétroviseur situé sur le côté opposé. Le document 8 fait apparaître un autre effet de polarisation : les

figures colorées, visibles sur la vitre arrière, sont dues à la biréfringence des vitres : la vitre reçoit en effet de la lumière du ciel (polarisée) dont une partie se réfléchit sur la face intérieure avant de parvenir à l'observateur à travers l'analyseur. Les photographies 9 et 10 montrent un autre exemple de polarisation (plus complexe) par des surfaces lisses.



Photo 7 : Polarisation par réflexion sur une vitre.



Photo 8 : Observation à l'aide d'un analyseur.



Photo 9 : Polarisation par réflexion sur des feuilles de laurier.



Photo 10 : Observation à l'aide d'un analyseur.

Les halos

De nombreux autres phénomènes naturels, plus rares ou plus difficiles à mettre en évidence, sont polarisés. C'est le cas des halos qui sont dus à des réfractions et réflexions sur des cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère. Ces cristaux sont généralement hexagonaux avec des extrémités planes (*cf.* figure 15) ce qui autorise de nombreux parcours possibles pour la lumière. L'orientation des cristaux joue également un rôle. Par exemple,

s'il n'y a pas d'orientation privilégiée, on observe des cercles colorés autour du soleil. Les parcours de type 1 correspondent à une déviation minimale de 22° (cf. figure 16) : la lumière traverse un prisme d'angle égal à 60° .

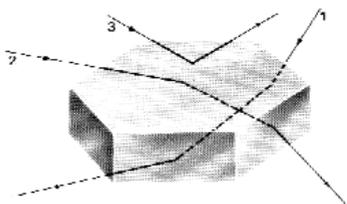


Figure 15

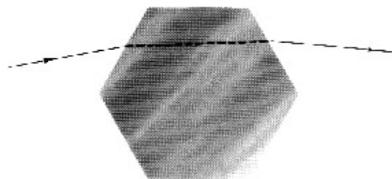


Figure 16

Les parhélies, qui appartiennent à cette catégorie, ne sont pas rares : ils apparaissent de part et d'autre du Soleil sous l'aspect de la photographie 11. La polarisation, due aux deux réfractions, est trop faible (4 %) pour être observée avec les moyens usuels.



Photo 11 : Parhélie.

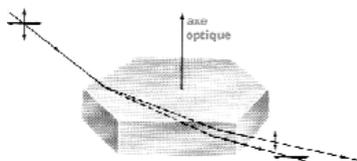


Figure 17

À noter qu'il est possible de mettre en évidence lors de cette observation la biréfringence des cristaux de glace. En effet tout rayon formant le parhélie à partir de la lumière incidente non polarisée donne naissance dans le cristal à deux rayons polarisés, rectilignement et orthogonalement entre eux, qui forment chacune leur propre halo (cf. figure 17). Le rayon le moins dévié, polarisé perpendiculairement à l'axe du cristal, est donc plus proche du Soleil. Comme l'angle des deux rayons est très faible (environ $0,1^\circ$) les deux spectres empiètent largement l'un sur l'autre et seule la partie rouge extrême du spectre se manifeste par une polarisation horizontale. On peut réaliser l'expérience au laboratoire avec un cristal de quartz pour lequel l'angle entre les rayons ordinaire et extraordinaire est sept fois plus élevé, ce qui permet d'éliminer une grande partie de l'un des spectres à l'aide d'un analyseur.

La gloire

Depuis que les voyages aériens sont banalisés, l'observation de la « gloire » n'est plus exceptionnelle. Cette auréole colorée qui entoure l'ombre de la tête de l'observateur apparaît sur les gouttelettes d'eau des nuages et du brouillard. Pour cela il est nécessaire

de se trouver au-dessus du nuage qui la produit. Une telle situation peut se produire en montagne, en haut d'un immeuble et même dans une salle de bains ! La dimension de la gloire dépend uniquement du diamètre des gouttes (son diamètre est de quelques degrés) ; elle est d'autant plus grande que les gouttes sont petites. Son centre est à l'opposé du Soleil par rapport à l'observateur (cf. photo 12 où l'on reconnaît la présence d'un deuxième anneau bordé de rouge). Comme pour l'arc-en-ciel chacun voit sa propre gloire.



Photo 12 : Gloire.

La polarisation de la gloire est très curieuse. Les anneaux colorés sont polarisés *radialement*, contrairement à ce qu'on observe pour l'arc-en-ciel mais la partie blanche près du centre est polarisée *tangentielle*, le centre lui-même n'est pas polarisé. D'autres particularités peuvent apparaître, dues en particulier à l'influence des dimensions des gouttelettes d'eau. Il existe des cas où la polarisation est absente. La théorie permettant d'expliquer l'existence de la gloire est complexe : nous renvoyons le lecteur à la bibliographie. Pour justifier la polarisation, signalons seulement l'existence de *réflexions* à l'intérieur des gouttes, comme pour l'arc-en-ciel, avec ici intervention *d'ondes de surface* qui permettent de rétrodiffuser la lumière. Ce mécanisme serait dominant pour les gouttes de très petite taille.

Parmi les autres phénomènes naturels polarisés citons la couronne solaire observable pendant quelques minutes lors d'une éclipse totale de soleil, événement très rare en un point donné du globe. La lumière de la couronne, visible pendant l'éclipse est formée de lumière solaire diffusée, avec un taux maximum de 40 %.

Signalons enfin que ni les couronnes solaires ni les nuages irisés dus à des phénomènes de diffraction ne sont polarisés.

REMERCIEMENTS

Nos vifs remerciements s'adressent à : David ROMEUF qui nous a communiqué la

photographie de la gloire (photo 12) et à Luc DETTWILLER, professeur en classe de mathématiques spéciales au lycée Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, qui a relu le texte et nous a suggéré de nombreuses améliorations.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages généraux et revues de vulgarisation

- [1] BRUHAT G. *Cours de physique générale*. Optique, 6^e édition. Paris : Masson, 1992.
- [2] HECHT E. et ZAJAC A. *Optics*. Addison-Wesley Publishing company, 1974.
- [3] DETTWILLER L. *Qu'est-ce que l'optique géométrique ?* Paris : Dunod Université, 1990.
- [4] KÖNNEN G.P. et TINBERGEN J. *Polarized light in nature*. Cambridge University Press, 1985.
- [5] COULSON K.L. *Polarisation and intensity of light in the atmosphere*. Deepak, Hampton, Va 1988.
- [6] KÖNNEN G.P. « *Polarisation in nature* », in *direct and inverse methods in radar polarimetry*, W.-M. BOERNER, éd, part I, Kluwer, Amsterdam, 1992.
- [7] MINNAERT M. *Light and color in the outdoors*. Berlin : Springer Verlag, 1993.
- [8] TRICKER R.A.R. *Introduction to meteorological optics*. New York : American Elsevier, 1970.
- [9] NUSSENZVEIG M. *La théorie de l'arc-en-ciel* in les phénomènes naturels, Bibliothèque Pour la Science, Paris : Belin, 1978.
- [10] HENRY M. Les halos, *Découverte* (Revue du Palais de la découverte), n° 291, octobre 2001.
- [11] JOUANISSON R. Lumière polarisée : matériel et expériences. *Bull. Un. Phys.*, novembre 2001, vol. 95, n° 838 (1), p. 1579-1600.
- [12] JOUANISSON R. L'arc-en-ciel : observations et expériences. *Bull. Un. Phys.*, décembre 1998, vol. 92, n° 809, p. 1765-1787.
- [13] DETTWILLER L. *Classification des phénomènes de halos et découvertes récentes*. À paraître dans « Auvergne Sciences », Clermont-Ferrand.

Articles de revues spécialisées

- ◆ FRASER A.B. Why can the supernumary bows be seen in a rain shower ? *J. Opt. Soc. Am.* 1983, 73, p. 1626-1628.
- ◆ VOSS K.J. et LIU Y. Polarised radiance distribution measurements of skylight. I - System description and characterisation. *Appl. Opt.* 1997, 36, p. 6083-6094.
- ◆ LIU Y. et VOSS K.J. Polarised radiance distribution measurement of skylight. II - Experiment and data. *Appl. Opt.* 1997, 36, p. 8753-8764.

- ◆ KÖNNEN G.P. Polarisation and intensity distributions of refraction halos. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, 73, p. 1629-1640.
- ◆ KÖNNEN G.P. et DE BOER J.H. Polarised rainbows. *Appl. Opt.*, 1979, 18, p. 1961-1965.
- ◆ FRASER R.S. Atmospheric neutral points outside the principal plane, *contrib. Atmos. Phys.*, 1981, 54, p. 286-297.
- ◆ NUSSENZVEIG H.M. *Diffraction effects in semiclassical scattering*. Cambridge : Cambridge university press, 1992 (cf. le chapitre 11 pour une théorie de la « gloire »).



Roland JOUANISSON

Ancien maître de conférence de physique
Université Blaise Pascal
Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)