

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen =
Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 27 (1947)

Heft: 1

Artikel: Observations sur la dispersion du plan de polarisation après réflexion
normale sur les minéraux métalliques anisotropes

Autor: Galopin, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-22405>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 04.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Observations sur la dispersion du plan de polarisation après réflexion normale sur les minéraux métalliques anisotropes

Avec un exposé général sur la réflexion normale

Par *R. Galopin*, Genève

Les couleurs que montrent, en lumière naturelle et en réflexion normale, les minéraux métalliques, constituent un des facteurs importants de détermination et servent de base pour l'établissement de plusieurs tables systématiques de minéraux. Mais ces couleurs, pour la plupart, ne possèdent pas la netteté de celles observées chez les minéraux transparents. Il en est de même pour les teintes vues en lumière polarisée, particulièrement entre les nicols croisés, qui ne sont guère comparables aux couleurs d'interférence de Newton.

En fait, les couleurs des minéraux métalliques, dues à la dispersion, sont généralement la résultante d'un mélange de teintes plus ou moins intensément réfléchies, qui donne au minéral une couleur souvent atténuée et aux nuances subtiles. C'est pour cela qu'après avoir défini la couleur d'un minéral, on le rapproche par comparaison à d'autres minéraux aux teintes apparentées. La comparaison est un procédé utile et souvent nécessaire par le fait même de la difficulté de définir avec précision une couleur. La pyrrhotine, pourtant assez nettement colorée, n'a-t-elle pas été décrite, selon les auteurs, comme étant crème, brun-crème pâle, bronze clair, bronze jaune et jaune-rougeâtre clair?

Les contrastes jouent d'ailleurs un rôle important et un minéral peut présenter des aspects assez divers selon la nature de ceux qui l'environnent. La chalcopirite d'un jaune clair vif dans le voisinage de la magnétite apparaît d'un jaune-verdâtre terne au contact de l'argent natif.

Chez les minéraux métalliques et effet, le facteur variable de l'intensité de la lumière réfléchiée vient s'ajouter à l'impression chromatique et l'impression de luminosité est, comme pour la couleur, fortement influencée par les contrastes.

L'observation de la dispersion du plan de polarisation se fera par la rotation de l'analyseur; ce mouvement produit sur le minéral une succession de teintes de valeurs rapprochées et facilement com-

parables entre elles. Le passage plus ou moins rapide d'une teinte à l'autre, la variété et la netteté plus ou moins grandes des nuances peuvent constituer des caractères distinctifs et contribuer à la détermination du minéral.

Cependant, pour suivre le processus assez complexe de la dispersion chez les minéraux métalliques anisotropes, il est nécessaire d'avoir présents à l'esprit les phénomènes de réflexion normale.

C'est pour cela que je ne crois pas inutile de les exposer succinctement dans leur ensemble, en leur consacrant la première partie de cette notice.

Ière partie

Notions théoriques sur la réflexion normale en milieu cristallin absorbant

Un rayon lumineux I tombant sur une surface cristalline, sous une incidence quelconque, peut se partager en trois composantes : la première r est réfléchi, la seconde t traverse, après réfraction, le milieu tandis que la troisième a est absorbée.

$$\text{On aura donc : } I = r + t + a.$$

Ces trois valeurs dépendent de la nature et des propriétés du corps considéré et le rapport entre a et t sera fonction du chemin parcouru dans le milieu.

Pour un corps transparent, r est très petit ou nul tandis que pour un corps opaque t devient négligeable ; ce dernier cas est celui des métaux et de la majorité des minéraux métalliques chez lesquels le facteur a prend de l'importance sous le nom de pouvoir absorbant du corps considéré.

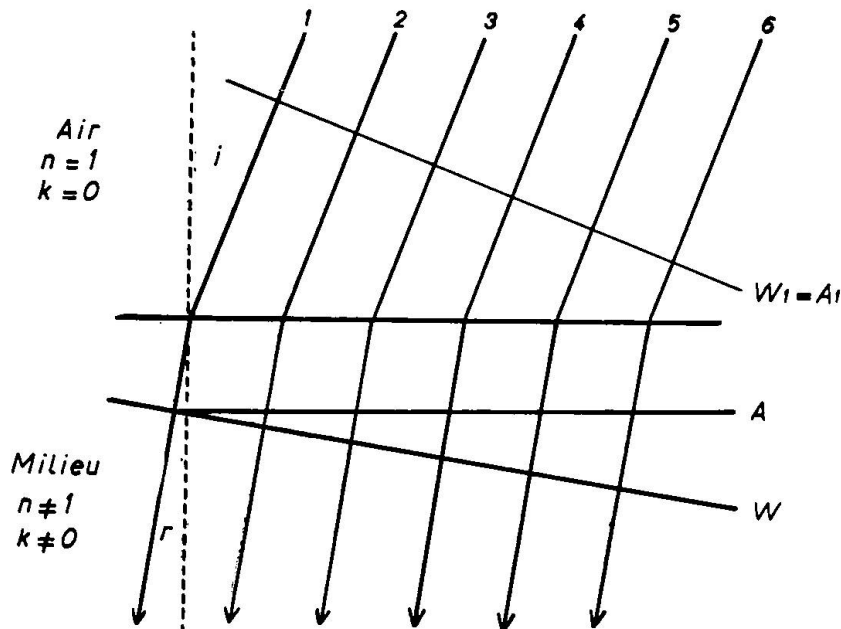
C'est ce pouvoir absorbant qui rend le processus et la théorie optiques de la réflexion normale particulièrement complexes.

L'optique cristalline des corps transparents, vus en lumière transmise, utilise des surfaces permettant de suivre, de comprendre et de prévoir la marche en diverses directions de rayons lumineux à travers un cristal. Ces surfaces sont des ellipsoïdes à deux ou trois axes, comme ceux des indices et des vitesses, ou des ovaloïdes à une ou deux nappes, dont les vecteurs indiquent, pour chaque direction de la radiation dans le cristal, la valeur des indices ou des vitesses des rayons réfractés. Ces surfaces ou indicatrices sont relativement simples et d'un usage aisé car les ondes planes, traversant le milieu transparent, sont homogènes, c'est-à-dire que, sur leur plan, les ondes de même phase ont aussi la même amplitude.

1. ONDE INHOMOGENE

Cette condition n'est pas remplie dans la réflexion normale sur des corps absorbants, c'est-à-dire les corps peu transparents et opaques, chez lesquels le facteur t tend à devenir nul alors que le facteur a croît en importance.

Il faut considérer que souvent les corps apparemment opaques sont transparents sous de très faibles épaisseurs, qui ne sont pas négligeables si on les rapporte à la longueur d'onde de la lumière. Avant d'être réfléchi, l'onde lumineuse parcourt, en aller et retour, une certaine distance dans la matière cristalline, parcours durant lequel le facteur d'absorption a agit sur la radiation lumineuse.



(d'après M. Berek).

Fig. 1. Onde inhomogène dans un milieu absorbant

D'autre part, le dispositif optique du microscope, avec son prisme à réflexion totale et son objectif convergent, ne permet pas une incidence rigoureusement normale. Le rayon réfléchi sera donc partiellement réfracté et absorbé, durant son passage dans le minéral, et l'absorption se manifestera sur l'onde par une diminution progressive de son amplitude.

Le plan des ondes de même phase W des rayons réfractés fait avec le plan d'incidence un angle égal à l'angle r de réfraction. Mais en considérant les chemins parcourus dans le milieu cristallin par les rayons composant ce plan d'onde, on voit qu'ils sont crois-

sants du rayon 1 au rayon 6. A cette augmentation de parcours correspond une action progressive d'absorption, c'est-à-dire une diminution continue de l'amplitude. Par conséquent, les rayons constituant le plan d'onde d'égale phase n'ont pas la même amplitude. Le plan d'onde de même amplitude A ne correspond pas au plan d'onde de même phase W : l'onde est inhomogène.

Dans le cas d'un corps isotrope absorbant, le rôle joué par l'absorption tend à rendre déjà assez complexes les phénomènes optiques; cette complexité sera encore plus accentuée pour les corps absorbants anisotropes.

P. DRUDE a montré qu'on peut généraliser le processus de progression de la lumière dans les milieux absorbants en remplaçant, dans la formule des milieux transparents, l'indice de réfraction n par la valeur n' qui est égale à $n(1-ik)$, où k est l'indice d'absorption, et $i = \sqrt{-1}$. Cette relation exprime implicitement l'inhomogénéité de l'onde mais ne contient rien de visible indiquant la complexité de l'équation. Cette complexité va évidemment se retrouver dans les indicatrices. En effet, les phénomènes optiques s'illustreront par deux ellipsoïdes à trois axes ayant un centre commun mais dont l'orientation et la longueur des axes principaux sont différents. Une équation ayant des valeurs réelles et imaginaires exprime la complète interdépendance de ces deux ellipsoïdes dont l'un est celui des indices de réfraction et l'autre celui des pouvoirs absorbants. Si l'on considère par exemple un vecteur quelconque de l'ellipsoïde d'absorption, on ne peut nullement considérer sa longueur comme indiquant la valeur de l'absorption dans la direction de ce vecteur; l'importance de l'absorption sera établie par une valeur calculée en rapportant ce vecteur à son correspondant de l'ellipsoïde des indices et, s'il y a lieu, aux angles que font entre eux les trois axes principaux des deux ellipsoïdes.

2. LES INDICATRICES DANS LES DIVERS SYSTEMES CRISTALLINS

Système cubique

L'indicatrice complexe est formée de deux sphères concentriques aux rayons n et nk . La sphère nk tend vers le point lorsque k tend vers zéro.

La symétrie de l'indicatrice exprime, comme pour les milieux transparents, la polarisation et la vitesse de propagation des ondes pénétrant dans le cristal, mais sans indiquer toutefois l'abaissement d'amplitude.

Systèmes quadratique, hexagonal et trigonal

L'indicatrice est formée de deux surfaces de révolution ayant le même axe de révolution, mais de longueurs différentes. Les vecteurs d'une surface mesurent les valeurs n , ceux de l'autre les valeurs nk .

L'axe de révolution est aussi un axe optique comme pour les minéraux transparents, mais la surface n'est pas un ellipsoïde de révolution; pour la surface n surtout, les vecteurs sont plus grands que pour les minéraux non absorbants, mais l'écart n'est pas grand et devient nul à l'équateur et aux pôles de la surface.

Pour une direction de propagation Z , la section principale passe par Z et l'axe optique ou de révolution. Le plan perpendiculaire à Z coupe les surfaces en deux courbes dont les axes sont perpendiculaires l'un à l'autre pour chaque courbe; les axes de la surface n sont parallèles à ceux de la surface nk . Comme pour les minéraux transparents, les plans de polarisation sont parallèles et perpendiculaires à la section principale. Il y a un rayon ordinaire et un rayon extraordinaire. En plus de l'action de l'absorption, la valeur de n ne suit plus la loi de Fresnel dans la variation des directions de propagation, elle est toujours plus grande que ne l'indique l'ellipsoïde d'un milieu transparent.

Système orthorhombique

L'indicatrice complexe se compose de deux surfaces à trois axes perpendiculaires entre eux, soit six axes de longueurs différentes. La direction des axes des deux surfaces et les axes cristallographiques correspondent. Les deux surfaces ne sont pas des ellipsoïdes.

En considérant une direction de propagation quelconque Z , un plan qui lui est perpendiculaire ne coupe pas une surface de révolution; les axes des courbes d'intersection avec ce plan de la surface n ne sont plus parallèles à ceux des courbes d'intersection avec la surface nk . Les deux axes perpendiculaires de la courbe n forment un certain angle avec les deux axes perpendiculaires de la surface nk . Il s'ensuit un état de polarisation complexe de l'onde se propageant dans la direction Z qui se traduit par une lumière elliptiquement polarisée.

On aura en effet deux ondes polarisées elliptiquement, dont les ellipses de vibration sont à 90° et qui ont même ellipticité et même sens de vibration.

C'est seulement lorsque la direction Z se trouve dans un des plans principaux de l'indicatrice que les axes des courbes d'inter-

section entre les surfaces n et nk , d'une part, et le plan perpendiculaire à Z d'autre part, sont de nouveau parallèles entre eux; la lumière se propageant parallèlement à la direction Z est alors rectilignement polarisée, parallèlement et normalement aux trois plans principaux de l'indicatrice; les sections principales de l'indicatrice ne sont pas des ellipses.

Axes hélicoïdaux ou de torsion

Dans le plan principal de l'indicatrice n contenant le plus petit et le plus grand indice, il y a deux directions pour lesquelles les deux ondes ont le même indice n_m , mais contrairement aux minéraux transparents, ce ne sont pas des axes optiques. En effet, pour ces deux directions, dites axes de polarisation, les deux ondes ont des coefficients d'absorption différents et restent linéairement polarisées. Il en est de même pour l'indicatrice nk qui possède deux directions, dites axes d'absorption, pour lesquels les deux ondes ont un même coefficient d'absorption mais des indices de réfraction différents et restent ainsi linéairement polarisées.

Il existe en dehors des plans principaux quatre directions symétriquement disposées pour lesquelles les deux ondes ont même indice de réfraction et même coefficient d'absorption; la vibration des ondes est circulairement polarisée selon ces quatre directions appelées axes hélicoïdaux ou de torsion (*Windungsachsen*) (fig. 2a).

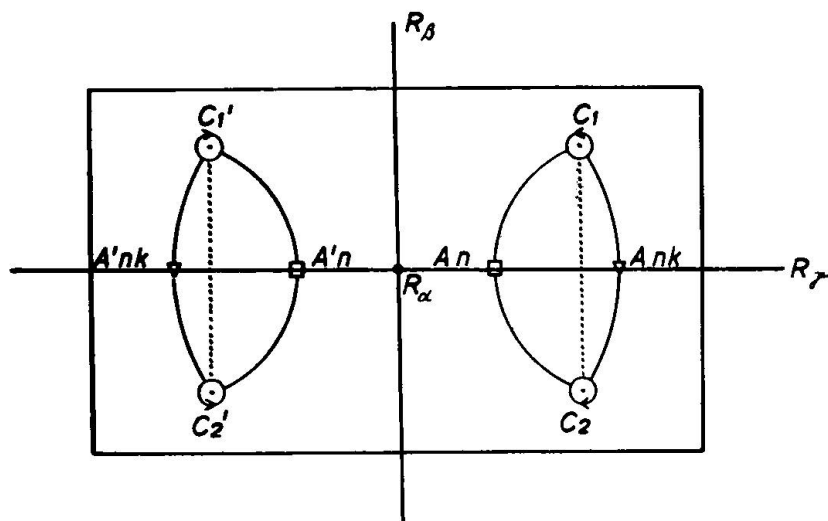
Les véritables axes optiques n'existent pas dans le système orthorhombique, ni dans les systèmes à symétrie inférieure. Il ne pourra y avoir biaxie que si l'absorption devient très faible, les quatre axes se rapprochant deux à deux et tendant à se confondre.

Système monoclinique

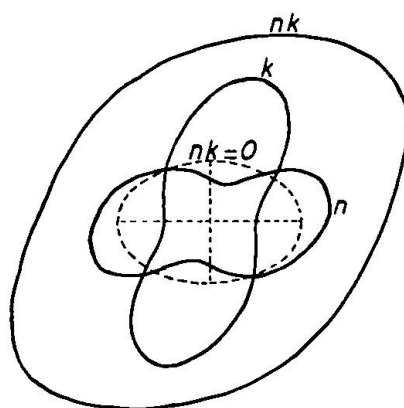
L'indicatrice complexe est formée de deux surfaces à trois axes dont les longueurs sont inégales pour chaque surface. Un seul des axes principaux a une direction commune aux deux surfaces et correspond à l'axe cristallographique b .

Seules, les directions de propagation comprises dans le plan de symétrie cristallographique donneront lieu à une lumière polarisée linéairement; les deux ondes sont parallèlement et perpendiculairement polarisées au plan comprenant des axes cristallographiques a et c . Celui-ci est le plan réel de symétrie de l'indicatrice complexe et contient les deux autres paires d'axes principaux qui ne sont plus perpendiculaires entre eux.

Les courbes d'intersection entre le plan perpendiculaire à la direction de propagation Z et les indicatrices n et nk sont asymétriques et n'ont de commun que le centre. Ni pour n , ni pour nk , les vecteurs minima et maxima des courbes ne sont perpendiculaires entre eux (fig. 2b).



a) (selon A. Cissar7).



b) (d'après M. Berek).

Fig. 2. a) Axes de torsion. b) Courbes d'intersection des indicatrices complexes avec le plan des axes principaux a et c dans le système monoclinique

Système triclinique

Les deux indicatrices n'ont en commun que le centre et sont orientées de façon quelconque dans le cristal.

Il existe encore deux plans dans lesquels la propagation lumineuse est linéairement polarisée, mais la direction de polarisation n'est plus parallèle ou perpendiculaire à ces plans.

3. REFLEXION NORMALE

Le rayon réfléchi subit, par rapport à un rayon incident plus ou moins rigoureusement normal, une modification qui dépend du degré de pénétration de l'onde dans le milieu réfléchissant. Cette modification se manifeste par une diminution d'intensité lumineuse qui correspond à une baisse de l'amplitude de la radiation.

Si I_0 est l'intensité du rayon incident et I l'intensité du rayon réfléchi, on peut exprimer leur relation par

$$(1) \quad I = I_0 e^{-\alpha x}$$

$e =$ base du logarithme naturel
 $x =$ chemin parcouru par l'onde dans le milieu
 $\alpha =$ module d'absorption

Le module d'absorption α exprime ainsi l'influence du pouvoir absorbant du milieu sur le rayon qui le pénètre; l'absorption ne dépend pas uniquement de la nature du corps, mais aussi de la longueur d'onde et de la fréquence de la radiation incidente.

Pour exprimer la relation entre ces divers facteurs et les rendre comparables, il est nécessaire de fixer une valeur-unité. En choisissant l'unité de phase, à laquelle correspond un temps déterminé de propagation de la lumière, on a aussi un parcours déterminé de la radiation dans le milieu absorbant. Durant ce temps, ou parcours-unité, le pouvoir absorbant agit dans le sens d'un affaiblissement de l'amplitude qui se manifeste par une diminution de l'intensité de la radiation incidente.

Le facteur d'abaissement de l'amplitude correspondant à cette unité de phase se nomme indice d'absorption k et s'exprime par e^{-k} .

En fixant, comme unité de phase, la période de la vibration incidente, le chemin parcouru est de 2π . La relation $e^{-2\pi k}$ exprime l'absorption durant une période, c'est-à-dire pour une épaisseur de λ , égale à la longueur d'onde de la radiation. L'absorption pour l'unité d'épaisseur sera donc

$$(2) \quad e^{-\frac{2\pi k}{\lambda}}$$

La vitesse de la lumière varie selon les milieux qu'elle traverse; cette variation se manifeste par des différences de fréquence et de longueur d'onde. Si λ est la longueur d'onde dans le milieu et λ_0 celle dans l'air, on a la relation $\lambda_0 = \lambda n$, où n exprime l'indice de réfraction du milieu. La relation 2 peut s'écrire

$$(3) \quad e^{-\frac{2\pi kn}{\lambda_0}}$$

kn est dit coefficient d'absorption.

Ainsi, les facteurs k et n du milieu et la longueur d'onde λ_0 de la source lumineuse sont liés en une relation qui exprime l'absorption pour une épaisseur-unité.

Lorsque la radiation aura parcouru une distance quelconque x dans le milieu, l'absorption s'exprimera par

$$(4) \quad e^{-\frac{2\pi knx}{\lambda_0}}$$

Cette relation peut nous amener à exprimer la diminution d'intensité du rayon réfléchi, conséquence de l'affaiblissement de l'amplitude, dû à l'absorption.

L'intensité lumineuse est proportionnelle au carré de l'amplitude. Si I_0 et A_0 sont l'intensité et l'amplitude maximum dans l'air, et I et A ces mêmes facteurs dans le milieu absorbant, nous aurons

$$\frac{A^2}{A_0^2} = \frac{I}{I_0}$$

Pour un parcours d'une épaisseur x dans le milieu, l'amplitude s'exprimera par

$$A = A_0 e^{-\frac{2\pi knx}{\lambda_0}}$$

$$\text{d'où} \quad \frac{I}{I_0} = \frac{\left[A_0 e^{-\frac{2\pi knx}{\lambda_0}} \right]^2}{A_0^2} = e^{-\frac{4\pi knx}{\lambda_0}} = e^{-\alpha x}$$

$$\text{Le module d'absorption } \alpha \text{ est } = \frac{4\pi kn}{\lambda_0} = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

Ce module peut être introduit dans l'équation du mouvement vibratoire pour calculer l'amplitude de la vibration à un moment quelconque de son parcours dans le milieu absorbant.

Soit a_0 l'amplitude au moment t_0 du mouvement périodique où la radiation pénètre dans le milieu; on a:

$$a_0 = \frac{A_0 \sin 2\pi t_0}{T} \quad \begin{array}{l} A_0 = \text{amplitude maximum} \\ T = \text{période} \end{array}$$

Au temps t , la vibration a traversé l'épaisseur x . La durée du trajet $t-t_0$ peut s'exprimer par $\frac{x}{V}$ où V = vitesse de la lumière.

L'amplitude au temps t sera égale à $a_t = A_0 \sin \frac{2\pi}{T} \left(t_0 + \frac{x}{V} \right)$ dans un milieu non absorbant; mais pour un milieu absorbant, la relation devient

$$a_t = A_0 e^{-\frac{2\pi knx}{\lambda_0}} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t_0 + \frac{x}{V} \right)$$

LE POUVOIR REFLECTEUR

Le pouvoir réflecteur d'un corps s'exprime par le rapport de l'intensité I_r du rayon réfléchi à l'intensité I_0 du rayon incident

$$R = \frac{I_r}{I_0} \leq 1$$

Dans le cas de l'incidence normale ($i = 0$), le pouvoir réflecteur dépend de l'indice d'absorption k du corps réfléchissant et de son indice de réfraction n , rapporté à celui du milieu (air ou immersion).

4. MINÉRAUX ISOTROPES

Dans le cas des minéraux isotropes, le pouvoir réflecteur s'exprime par la relation

$$R = \frac{(n-1)^2 + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2} \quad \text{ou} \quad \frac{n^2(1+k^2) + (1-2n)}{n^2(1+k^2) + (1+2n)}$$

En opérant avec la lumière monochromatique, on constate que la nature de la lumière, polarisée ou non, n'influence pas le pouvoir réflecteur; le corps isotrope n'a pas d'action sur elle. La lumière naturelle est réfléchie naturelle et la lumière polarisée est réfléchie polarisée, sans que l'orientation de son plan soit modifiée. L'emploi de la lumière blanche sera considéré plus loin (16).

Minéraux isotropes transparents

Pour les minéraux transparents, l'indice d'absorption k est nul ou négligeable et la relation R devient celle de Fresnel.

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

On voit que, plus l'indice de réfraction du minéral est élevé par rapport à celui du milieu, plus le pouvoir réflecteur est élevé. Par contre, lorsque l'indice du milieu est égal à celui du minéral, l'indice n est égal à l'unité et R devient nul. Le minéral ne réfléchit pas la lumière incidente et apparaît en sombre sous le microscope.

Minéraux isotropes opaques (absorbants)

Les minéraux n'ont généralement pas un indice d'absorption aussi élevé que les métaux; c'est l'indice de réfraction qui aura le plus d'influence sur le pouvoir réflecteur et cela d'autant plus que les minéraux opaques sont transparents sous des épaisseurs variables,

très faibles il est vrai, mais non négligeables par rapport aux longueurs d'ondes de la lumière. Le pouvoir réflecteur est ainsi influencé par les deux indices n et k , selon la relation donnée plus haut.

On trouve dans la publication de F. E. WRIGHT les courbes exprimant la variation du pouvoir réflecteur en fonction des indices de réfraction et d'absorption.

Cependant, certains minéraux et les métaux natifs peuvent être parfaitement opaques; avec eux, l'indice n est négligeable parce que presque sans effet et le pouvoir réflecteur tend vers l'unité,

$$R = \frac{n^2 k^2}{n^2 k^2}$$

Ces minéraux tendent à réfléchir la totalité de la lumière reçue.

5. MINÉRAUX ANISOTROPES

Comme précédemment, la lumière incidente sera monochromatique.

Dans le cas général, la lumière réfléchiée par la surface d'un minéral anisotrope est la somme de deux radiations polarisées perpendiculairement entre elles et ayant chacune leur indice de réfraction et leur indice d'absorption.

Soit n_1 et k_1 , les indices du rayon R_1 , et n_2 et k_2 , les indices du rayon R_2 . On posera R_2 plus grand que R_1 , et n_2 plus grand que n_1 . Le pouvoir réflecteur des diverses sections d'un minéral sera donc variable selon l'orientation de celles-ci.

La lumière incidente non polarisée est réfléchiée partiellement polarisée, en quantité d'autant plus grande que la biréfringence du minéral est plus élevée et que l'un de ses deux indices est plus proche de celui du milieu.

Réflexion normale de la lumière rectilignement polarisée

Le pouvoir réflecteur s'exprime par la relation

$$R = \sqrt{\left\{ \frac{(n_2 - 1)^2 + n_2^2 k_2^2}{(n_2 + 1)^2 + n_2^2 k_2^2} \sin^2 \alpha + \frac{(n_1 - 1)^2 + n_1^2 k_1^2}{(n_1 + 1)^2 + n_1^2 k_1^2} \cos^2 \alpha \right\}^2 - 4 \sin^2 2\alpha X^2}$$

où X est une relation complexe entre les indices n_1 , n_2 , k_1 et k_2 . α est l'angle que fait le plan de polarisation de l'onde incidente avec l'onde réfléchiée du plus petit indice n_1 , pour une position quelconque de la section considérée (fig. 3).

L'expression du R pour une telle position du minéral est donc fort complexe; elle devient plus simple si, par rotation de la platine du microscope, la direction de l'indice n_1 ou n_2 est parallèle à l'orientation du polariseur.

En effet, pour $\alpha = 0^\circ$ ou 180° nous avons

$$R = R_1 = \frac{(n_1 - 1)^2 + n_1^2 k_1^2}{(n_1 + 1)^2 + n_1^2 k_1^2}$$

et pour $\alpha = 90^\circ$ ou 270°

$$R = R_2 = \frac{(n_2 - 1)^2 + n_2^2 k_2^2}{(n_2 + 1)^2 + n_2^2 k_2^2}$$

Dans ces 4 positions, le membre $-4 \sin^2 2\alpha X^2$, est égal à zéro.

En tournant de 360° la platine du microscope, on observe deux positions de luminosité maxima à 90° et 270° et deux positions de luminosité minima à 0° et 180° . C'est ce que CISSARZ et BEREK appellent la biréflexion.

6. LA BIREFLEXION

Ce phénomène à été longtemps appelé pléochroïsme de réflexion, par analogie à celui observé en coupe mince. Il n'est cependant pas en relation uniquement avec l'absorption. En effet pour être visible à l'oeil, la différence entre R_1 et R_2 doit être grande, ce qui implique une grande différence de valeur des indices.

Les minéraux transparents, chez lesquels l'indice d'absorption est négligeable, présentent, s'ils ont une forte biréfringence, une très nette biréflexion; c'est le cas de la calcite, par exemple, qui n'est pas pléochroïque en coupe mince. Au contraire, les minéraux parfaitement opaques, très absorbants et réflecteurs, n'ont guère de biréflexion perceptible, l'influence des indices de réfraction étant minime.

Il est possible d'exprimer la biréflexion d'une section quelconque ou, comme l'appelle ORCEL, sa biréfectance, par analogie avec la biréfringence des minéraux transparents, soit

$$\Delta R = R_2 - R_1$$

La biréflexion des sections principales d'un cristal seront

$$R_g - R_m; R_m - R_p; R_g - R_p$$

En plaçant la section à un angle α égal à $\pm 45^\circ$, le $\cos^2 \alpha$ et le $\sin^2 \alpha$ sont égaux à $1/2$, et on obtient ainsi le pouvoir réflecteur moyen de la section, par la relation

$$R_h = \frac{1}{2} (R_2 + R_1)$$

Le pouvoir réflecteur moyen du cristal s'exprimera par

$$R_h^{g-p} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{R_g + R_m}{2} \right) + \left(\frac{R_m + R_p}{2} \right) \right] = \frac{R_g + 2R_m + R_p}{4}$$

Enfin, la biréflexion moyenne du cristal est donnée par la relation

$$\Delta R^{g-p} = \frac{1}{3} [(R_g - R_m) + (R_m - R_p) + (R_g - R_p)] = \frac{2}{3} (R_g - R_p)$$

7. EFFET DE L'IMMERSION EN LUMIÈRE MONOCHROMATIQUE

Il a été établi (4) que le pouvoir réflecteur diminue avec la valeur de l'indice de réfraction n et que l'indice n exprime le rapport de l'indice de réfraction du minéral à celui du milieu. Si ce dernier augmente, l'indice n diminue et devient égal à 1 lorsque le minéral et le milieu ont le même indice. Le pouvoir réflecteur est alors nul et le minéral ne réfléchit plus de lumière; ce cas limite se présente pour les minéraux transparents qui n'ont pas d'absorption. On peut ainsi déterminer l'indice de réfraction d'un minéral isotrope et, successivement par deux immersions, les indices d'un minéral anisotrope.

Pour les minéraux opaques absorbants, l'immersion abaisse simplement le pouvoir réflecteur. Dans le cas des minéraux anisotropes, elle modifie, en l'accentuant souvent, le phénomène de biréflexion, surtout si elle abaisse sensiblement le pouvoir réflecteur d'un des indices.

8. RÉFLÉXION, SOUS INCIDENCE NORMALE, D'UN RAYON MONOCHROMATIQUE RECTILIGNEMENT POLARISÉ

Observation entre les nicols croisés

Minéraux isotropes

La section d'un minéral isotrope n'agit pas sur la lumière incidente normale; le rayon incident rectilignement polarisé sera réfléchi sans que l'orientation de son plan de polarisation soit modifiée. Vu entre les nicols croisés, le minéral isotrope sera à l'extinction et le restera durant la rotation de 360° de la platine du microscope.

Extinctions incomplètes

Certains minéraux présentent, entre les nicols rigoureusement croisés, une luminosité, qui d'ailleurs ne varie pas avec la rotation de la platine. Cette luminosité est due à la dépolarisation partielle, soit de la radiation incidente déjà, soit de la radiation réfléchie.

La source lumineuse, employée en incidence normale, est généralement très vive, surtout pour l'observation entre les nicols croisés.

La lumière incidente peut être partiellement dépolarisée par réflexion sur le prisme ainsi que lors de son passage à travers l'objectif, surtout si le verre optique n'est pas exempt de tensions internes et si le réglage de la source lumineuse laisse à désirer (voir *Berek*, *Orcel*, etc. . .).

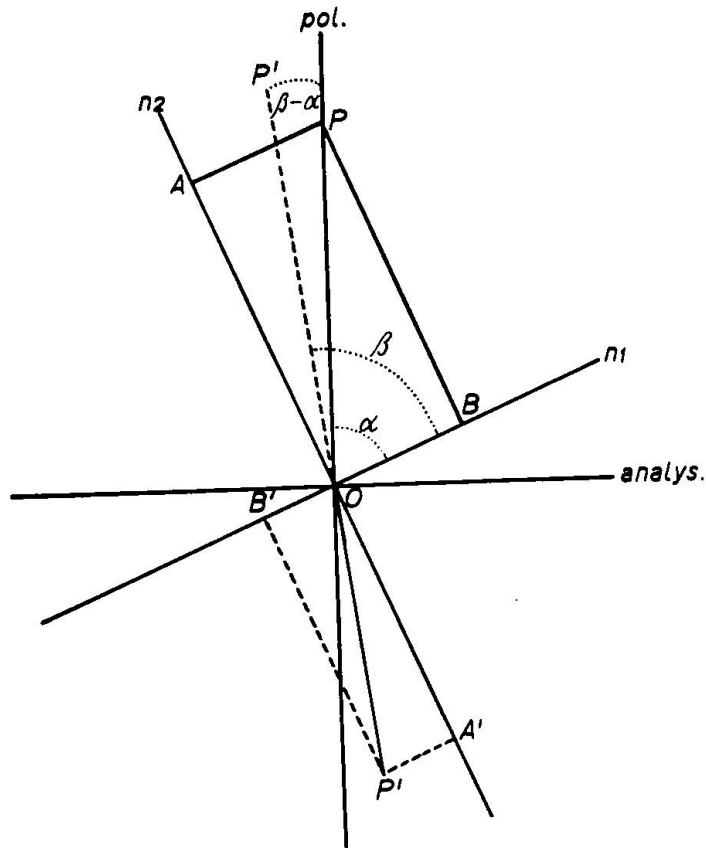


Fig. 3. Rotation du plan de polarisation d'un rayon réfléchi normalement (d'après J. Orcel).

D'autre part, la convergence plus ou moins accentuée de l'objectif fait que les rayons tombant sur la préparation ne sont pas tous rigoureusement normaux et peuvent partiellement se dépolarisier par réflexion. Il faut considérer aussi que la surface polie du minéral n'est pas sans imperfections. Les raies de polissage, persistant sur une surface, apparaissent lumineuses entre les nicols croisés, preuve qu'elles dépolarisent la lumière réfléchie. Même si ces raies disparaissent après le dernier polissage, elles persistent en profondeur, puisqu'elles réapparaissent dès le début d'une faible attaque chimique de la surface. On constate aussi que de nombreuses réflexions internes peuvent, par production de lumière dépolarisée, voiler complètement des phénomènes optiques superficiels. On pour-

rait donc envisager que l'extinction incomplète d'un minéral isotrope soit due aussi à un grand nombre de petites réflexions dépolarisantes sur de menues raies, plans de clivage et inclusions situés en dessous de la surface.

Un tel processus peut être comparé, par analogie, à une masse microcristalline vue par transparence et qui, entre les nicols croisés, présente la même luminosité dans toutes les orientations; cette luminosité diffuse est produite par la somme de l'éclairement des parcelles anisotropes, trop petites pour être perceptibles individuellement.

9. MINERAUX ANISOTROPES

Eclairée par un faisceau incident normal et rectilignement polarisé, une section d'un minéral anisotrope présente, pour une rotation de 360° , quatre positions d'extinction perpendiculaires entre elles. L'intensité de la lumière réfléchie, dans les positions intermédiaires, dépendra, de façon variable, des indices de réfraction et d'absorption, selon que le minéral est transparent ou opaque. Comme c'est le cas en lumière transmise et, plus encore, en lumière normale, l'usage des deux nicols amène une forte déperdition de lumière. Celle-ci devra atteindre une grande intensité pour permettre l'observation des phénomènes optiques. L'emploi de la vue conoscopique n'exige cependant pas beaucoup plus de lumière que pour l'observation sans analyseur (voir BEREK).

En plaçant la section du minéral dans une position d'éclairement, on appellera α l'angle que fait le petit indice n_1 du minéral avec la direction OP du plan de polarisation de l'onde incidente (fig. 3).

Soit OP l'amplitude de la lumière incidente, qui se décompose en deux vibrations OA parallèle au grand indice n_2 et OB parallèle au petit indice n_1 . Par suite de l'absorption, ces deux vibrations seront réfléchies avec des amplitudes diminuées OA' et OB' .

L'intensité étant proportionnelle au carré des amplitudes, on peut exprimer les pouvoirs réflecteurs des deux vibrations par le carré du rapport de l'amplitude de l'onde réfléchie à celle de l'onde incidente.

$$R_2 = \left(\frac{OA'}{OA}\right)^2 \quad \text{et} \quad R_1 = \left(\frac{OB'}{OB}\right)^2$$

10. ROTATION DU PLAN DE POLARISATION

Les deux vibrations réfléchies OA' et OB' se composent en une résultante d'amplitude OP' dont le plan de polarisation fait un angle

β avec l'indice n_1 du minéral. Le rayon réfléchi voit donc, par une perte d'amplitude proportionnellement différente entre ses deux composantes, son plan de polarisation tourner de $\beta - \alpha$ par rapport au plan de polarisation du rayon incident.

Pour établir une relation entre β et α , nous avons

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{OA'}{OB'} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{OA}{OB}$$

Le rapport des pouvoirs réflecteurs s'exprimera par

$$\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = \frac{\frac{OA'}{OA}}{\frac{OB'}{OB}} \quad \text{ou} \quad \frac{OA'}{OB'} = \frac{OA}{OB} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad \text{d'où} \quad \operatorname{tg} \beta = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \operatorname{tg} \alpha$$

Si n_2 est plus grand que n_1 , R_2 sera plus grand que R_1 , et β plus grand que α ; cela indique que la rotation du plan de polarisation se fait du côté du plus grand indice.

Si α est égal à 0° et 90° , β est aussi égal à 0° et 90° ; il n'y a pas de rotation de plan de polarisation; l'onde réfléchie vibre dans le même plan que l'onde incidente. Celle-ci, pour α égal à 0° , 90° , 180° et 270° , rencontre le plan de l'un ou l'autre des indices n_1 et n_2 et, sans se partager en deux composantes, est réfléchie dans son plan pour être arrêtée par l'analyseur; le minéral est à l'extinction dans ces quatre positions. Quant à la grandeur de l'angle de rotation du plan de polarisation, dans les positions intermédiaires, elle est déterminée par la différence entre les pertes d'amplitude des deux composantes.

En effet, comme

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{OA'}{OB'} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{OA}{OB}$$

il faut que la perte d'amplitude soit proportionnellement différente pour OA et pour OB afin que le rapport $OA':OB'$ soit différent du rapport $OA:OB$.

On peut dire aussi que l'angle β sera d'autant plus grand que la section du minéral aura une plus grande biréflexion comme l'indique d'ailleurs aussi la relation

$$\operatorname{tg} \beta = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \operatorname{tg} \alpha$$

La construction graphique (fig. 3) montre aussi clairement ces conditions.

Pouvoir réflecteur d'une section dans une position quelconque α

Le pouvoir réflecteur s'exprime par

$$R = \frac{(OP')^2}{(OP)^2} = \frac{(OA')^2 + (OB')^2}{(OP)^2}$$

or,

$$(OA')^2 = R_2(OA)^2 \quad \text{et} \quad (OB')^2 = R_1(OB)^2$$

et d'autre part,

$$OA = OP \sin \alpha \quad \text{et} \quad OB = OP \cos \alpha$$

d'où

$$(OA')^2 = R_2(OP)^2 \sin^2 \alpha \quad \text{et} \quad (OB')^2 = R_1(OP)^2 \cos^2 \alpha$$

En introduisant dans la première équation ces expressions de OA' et OB' , on obtient une relation reliant R_1 , R_2 et α , soit

$$R = R_2 \sin^2 \alpha + R_1 \cos^2 \alpha$$

relation valable pour les corps non absorbants. La relation pour les corps anisotropes absorbants, plus complexe, a été citée dans le chapitre traitant du pouvoir réflecteur (5).

11. RETABLISSEMENT DE L'EXTINCTION PAR ROTATION DE L'ANALYSEUR

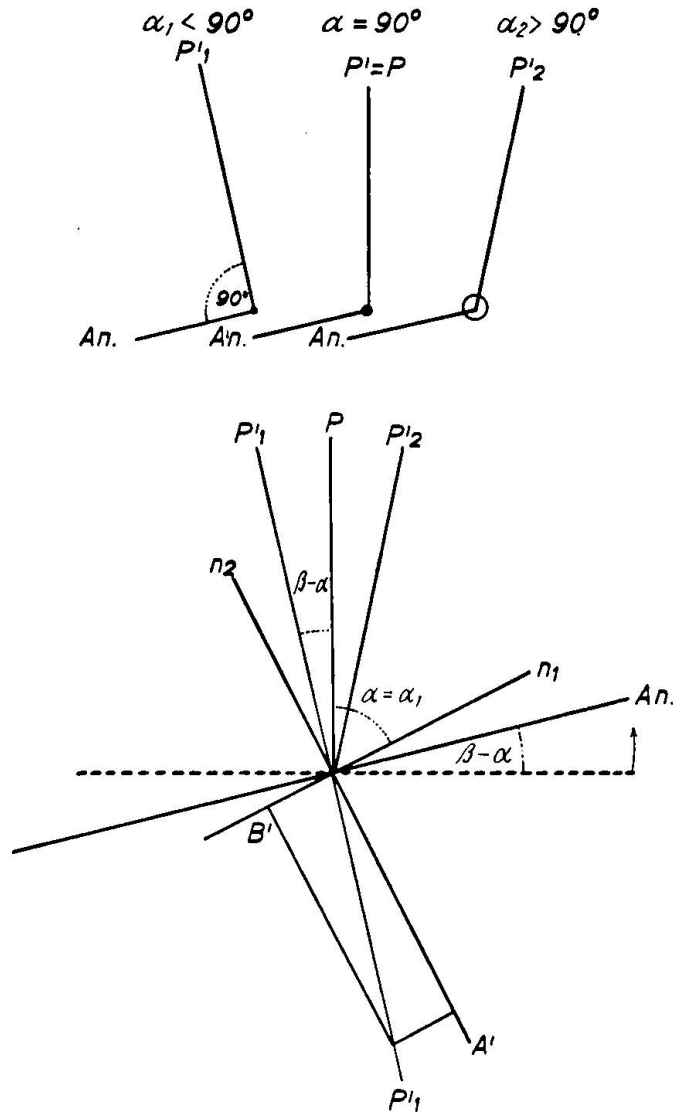
En plaçant le minéral à 45° de sa position d'extinction, on rétablit la lumière; par rotation d'un angle $\beta - \alpha$ de l'analyseur, on peut à nouveau rétablir l'extinction car l'analyseur se trouve en position croisée par rapport au plan de polarisation OP' du rayon réfléchi. Si maintenant, le minéral effectue une rotation de 360° , il ne sera à l'extinction que dans les positions α et $(180^\circ + \alpha)$. En réalité, les deux positions d'extinction se prolongent de quelques degrés surtout si l'extinction n'est pas absolument franche (fig. 4).

Remarquons que si les quatre extinctions observées entre nicols croisés ne sont pas à 90° les unes des autres, cela indique que les nicols ne sont pas rigoureusement croisés et que l'analyseur se trouve entre la position croisée avec le polariseur et celle croisée avec l'onde réfléchie OP' .

12. LUMIERE REFLECHIE ELLIPTIQUE

Chez les minéraux anisotropes, à indice d'absorption relativement élevé, la rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction, par suite de l'ellipticité du rayon réfléchi. Cette ellipticité est due à la différence d'absorption entre les deux composantes OA' et OB' ; celle-ci entraîne, outre la différence d'amplitude, une différence de

phase, génératrice de l'ellipticité. Cette ellipticité sera d'autant plus grande que la différence des indices $k_2 - k_1$ est plus élevée et que la pénétration du rayon dans le minéral est plus profonde. L'ellipse de la lumière réfléchie est comprise dans le rectangle dont les côtés



(selon Ed. Sampson)

Fig. 4. Rétablissement de l'extinction par l'analyseur mis en position croisée avec le plan de polarisation du rayon réfléchi dans une des positions d'éclairement maximum

sont $2OA'$ et $2OB'$ (fig. 5), et comme son intensité est proportionnelle au carré des diagonales d'un tel rectangle, elle n'est pas influencée par la différence de phase. Par contre, le grand axe de l'ellipse fait un angle γ avec la direction OP' d'une onde réfléchie rectilignement polarisée.

Cette ellipticité peut être compensée par l'introduction d'un mica quart-d'onde, convenablement orienté, et l'extinction rétablie par rotation de l'analyseur. La différence de phase, d'autre part, peut être mesurée au moyen du compensateur de Babinet.

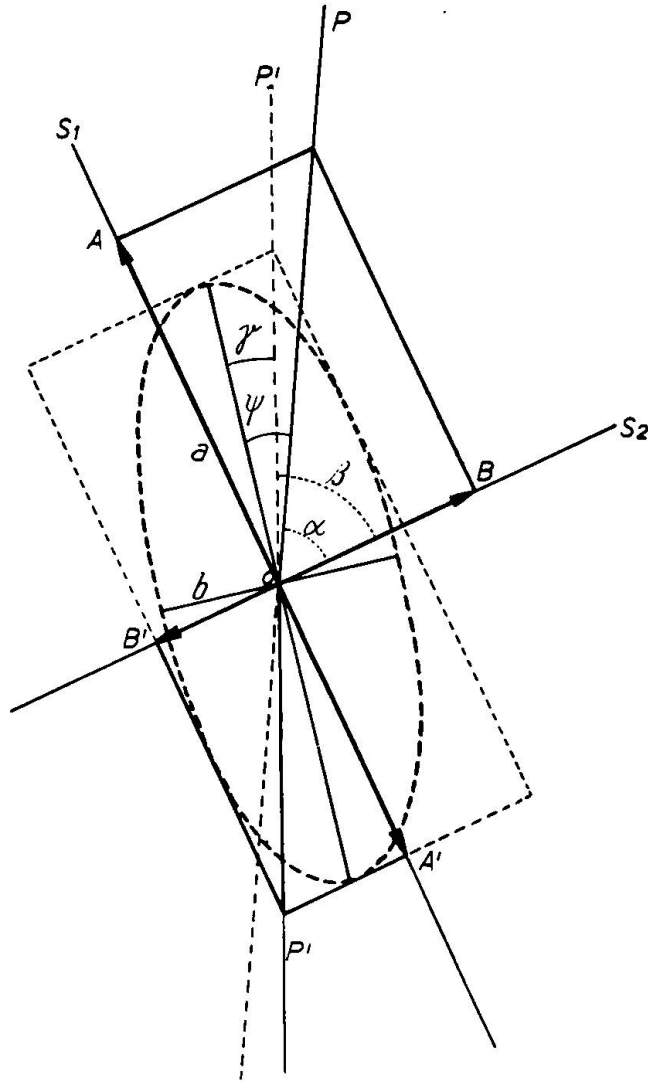


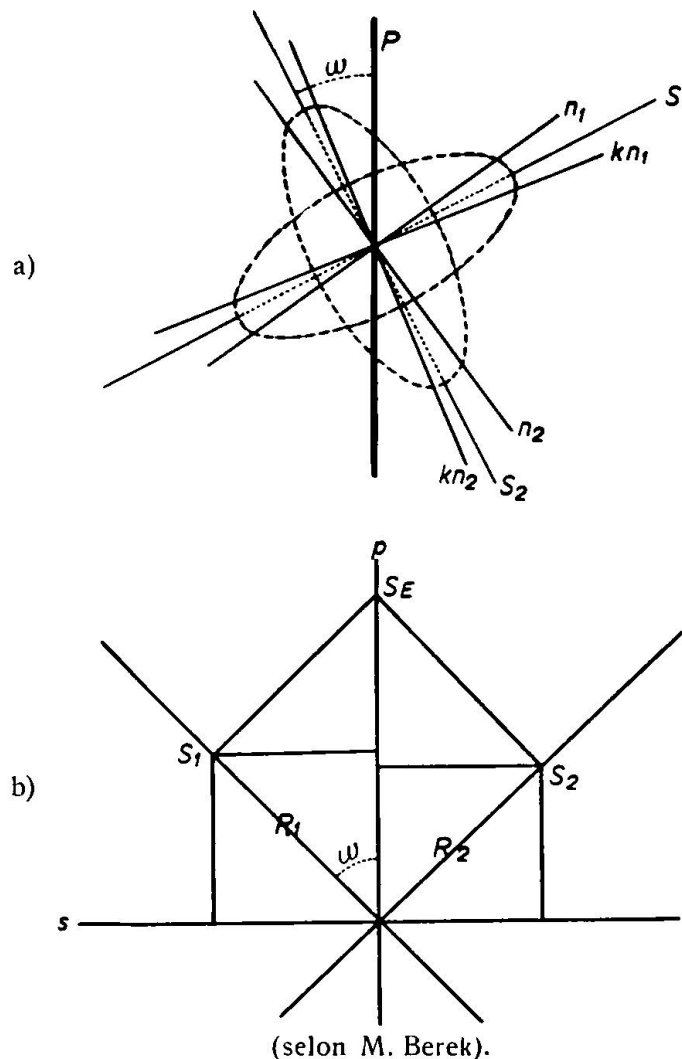
Fig. 5. Ellipticité de la vibration d'une onde réfléchie sur un minéral absorbant anisotrope

On trouve dans la publication de F. E. WRIGHT des courbes exprimant les différences de phases entre les composantes incidente et réfléchie, en fonction des indices de réfraction et d'absorption (Ref. bibl. No 9) ainsi qu'ORCEL (Ref. bibl. No 5).

13. LUMIERE ELLIPTIQUE COMPLEXE

Jusqu'à présent, les composantes OA' et OB' étaient considérées comme rectilignement polarisées et ce n'était que par leur dif-

férence de phase, due à l'absorption, que la résultante réfléchie OP' vibrait elliptiquement.



(selon M. Berek).

Fig. 6. a) Ellipticité de la vibration des rayons S_1 et S_2 en incidence normale sur un minéral absorbant anisotrope de symétrie inférieure. b) Décomposition des composantes complexes S_1 et S_2 , suivant les deux directions perpendiculaires des nicols p et s

D'autre part, l'examen des indicatrices du système orthorhombique et des systèmes inférieurs (2) a montré que pour une direction de propagation quelconque, non comprise dans un plan de symétrie du cristal, le plan perpendiculaire à cette direction découpe dans les deux indicatrices des indices de réfraction et d'absorption, deux courbes non elliptiques, dont les axes principaux ne sont pas parallèles d'une courbe à l'autre.

Le fait que les deux axes principaux de la courbe donnée par l'indicatrice des indices de réfraction font un certain angle avec les

deux axes principaux de la courbe de l'indicatrice des indices d'absorption a pour conséquence que les deux composantes de l'onde incidente S_1 et S_2 vibrent déjà elliptiquement, et perpendiculairement (fig. 6a).

L'ellipticité de ces deux composantes dépend des valeurs relatives de n et k ainsi que de la grandeur de l'angle entre les axes principaux des courbes découpées dans les indicatrices par le plan perpendiculaire à la direction de propagation. L'ellipticité de la résultante OP' sera donc déterminée par la différence de phase des deux composantes OA' et OB' , elles-mêmes déjà elliptiquement polarisées.

On juge, par ce qui précède, de la complexité de l'état de polarisation de l'onde réfléchi par une section quelconque d'un minéral absorbant à symétrie inférieure. Cette complexité ressort encore plus nettement dans son expression mathématique.

Sans entrer dans les détails pour lesquels nous renvoyons à la publication de M. BEREK (Ref. bibl. No 2), on peut exprimer le processus optique de la façon suivante:

posons $E e^{i\Phi}$, l'onde incidente sortant du polariseur et se partageant en deux composantes S_1 et S_2 parallèles aux directions de propagation dans le cristal, soit (fig. 6b):

$$\begin{aligned} \parallel S_1 &= E \cos \omega e^{i\Phi} \\ \parallel S_2 &= - E \sin \omega e^{i\Phi} \end{aligned}$$

Φ exprimant la phase de la période du mouvement vibratoire au moment de l'entrée du rayon dans le cristal.

Les deux composantes réfléchies R_1 et R_2 s'exprimeront en fonction des indices de réfraction complexes:

$$r = \frac{n - n_0 - ik}{n + n_0 - ik}$$

où n_0 est l'indice du milieu.

Nous aurons

$$\begin{aligned} \parallel S_1: R_1 &= E r_1 \cos \omega e^{i\Phi} \\ \parallel S_2: R_2 &= - E r_2 \sin \omega e^{i\Phi} \end{aligned}$$

ω est l'azimut de la direction S_1 par rapport au plan de polarisation du rayon incident, mais cet azimut est déjà complexe parce que sitôt entrées dans le milieu cristallin, les composantes S_1 et S_2 sont déjà elliptiquement polarisées.

Ces deux composantes complexes se partagent elles-mêmes en deux, selon les directions p et s , parallèles aux sections principales des deux nicols (fig. 6b).

Les deux rayons réfléchis selon ces deux directions s'expriment de la façon suivante:

$$\begin{aligned} \parallel S_E: R_p &= E r_1 \cos^2 \omega e^{i\Phi} + E r_2 \sin^2 \omega e^{i\Phi} \\ \perp S_E: R_s &= E r_1 \cos \omega \sin \omega e^{i\Phi} - E r_2 \sin \omega \cos \omega e^{i\Phi} \end{aligned}$$

Lorsque les nicols sont rigoureusement croisés, l'analyseur ne laisse passer que la composante R_s .

Pour faire ressortir la complexité de l'azimut ω , on peut citer la relation

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\sin 2\psi \cos 2\vartheta + i \sin 2\vartheta}{1 + \cos 2\psi \cos 2\vartheta}$$

dans laquelle ψ est l'azimut du grand axe de la vibration de l'onde réfléchie et ϑ l'ellipticité de cette vibration rapportée aux deux axes de l'ellipse a et b par la relation

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{b}{a}$$

Jusqu'à présent, la lumière employée était supposée monochromatique mais si l'on fait usage de la lumière blanche, la dispersion amènera des effets chromatiques que la complexité même de ce processus de réflexion permettra d'interpréter sinon de suivre dans le détail (IIème partie).

14. EXTINCTIONS INCOMPLETES

Dans leurs positions d'extinction, les minéraux anisotropes ne sont pas toujours complètement obscurs; ce fait amène les mêmes remarques que pour les minéraux isotropes (8). Mais pour les minéraux anisotropes à symétrie inférieure, il faut également tenir compte de l'ellipticité des résultantes OA et OB , due à l'orientation différente des indices de réfraction et d'absorption (13). Le rétablissement incomplet de l'extinction par rotation de l'analyseur a pour cause principale l'ellipticité de la vibration OP' , produite par la différence de phase entre les composantes OA' et OB' (12). Les extinctions incomplètes dues à la dispersion de la lumière blanche seront examinées plus loin (18 et 22).

15. LA PELLICULE SUPERFICIELLE

L'opération de polissage, même menée avec prudence afin d'éviter un échauffement ou une action mécanique trop vive, engendre, sur la surface polie du minéral, une pellicule superficielle, qui n'est pas sans action sur les phénomènes optiques.

Cette pellicule est formée d'une mince couche de parcelles fort menues, arrachées au réseau cristallin. Lors de l'attaque chimique d'une surface polie, les raies de polissage réapparaissent rapidement et cela bien avant que l'action du réactif mette en évidence la structure du minéral. D'après SCHNEIDERHÖHN, les fins matériaux, formant la pellicule, ont comblé les raies de polissage et les intervalles entre les grains; moins résistantes à l'action d'un dissolvant qu'un réseau intact, ces particules superficielles disparaissent dès le début de l'attaque chimique et laissent apparaître les vides qu'elles avaient comblés.

Les rayons Röntgen et la diffraction électronique sont deux moyens d'investigation qui ont beaucoup contribué à la connaissance de la constitution de la pellicule superficielle. D'après BOAS et SCHMID, son épaisseur est, pour les métaux, de l'ordre de 15 à 30 millièmes de millimètre. Sous cette couche finement cristalline se trouve une couche de réseaux déformés, environ 10 fois plus épaisse. Pour la plupart des minéraux, ces épaisseurs doivent probablement être moindres.

Cette couche microcristalline, formée de parcelles déformées, brisées et orientées de façon quelconque, possède, à l'échelle des radiations visibles, les caractères de l'isotropie, et cela, même si cette pellicule provient de minéraux anisotropes. Si un polissage prolongé diminue encore la dimension des particules, la couche tend vers l'état amorphe. L'influence qu'a la pellicule superficielle sur les phénomènes optiques n'est pas suffisamment grande, surtout en incidence normale, pour avoir un inconvénient d'ordre pratique; les effets de l'anisotropie ne sont pas modifiés, pas plus que l'orientation des extinctions et les caractères conditionnant l'asymétrie. Seul, le pouvoir réflecteur subit certains abaissements, comme le montrent les mesures comparées faites sur des faces naturelles et des faces de clivage, d'une part, et sur des surfaces polies plus ou moins longuement, d'autre part.

C'est surtout sur la nature elliptique du rayon réfléchi que la pellicule a une action sensible; il n'est pas exclu que la couche des réseaux déformés soit la cause d'une dépolarisation partielle de la lumière.

16. COULEUR ET DISPERSION

Jusqu'à présent, l'examen des phénomènes optiques s'est fait en utilisant de la lumière monochromatique. Si l'on fait usage de la lumière blanche, les minéraux accuseront des teintes plus ou moins

vives ou accentuées. Ces teintes ne sont pas sans analogie avec celles observées chez les minéraux transparents, en lumière transmise, mais le processus optique est bien différent.

Les teintes de pléochroïsme, observées en coupe mince, sont dues à l'absorption, alors que les teintes de biréfringence, vues en nicols croisés, sont le produit d'interférences entre deux rayons polarisés vibrant dans le même plan.

Les couleurs des minéraux métalliques, observés en incidence normale, résultent de la dispersion des indices de réfraction et d'absorption, que ces couleurs soient vues avec ou sans l'analyseur.

Couleur d'un minéral isotrope

On sait (4) que le pouvoir réflecteur dépend des indices d'absorption et de réfraction et qu'il augmente quand ces derniers croissent simultanément ou individuellement. WRIGHT a montré que l'accroissement de l'indice d'absorption a plus d'effet que celui de l'indice de réfraction (Ref. bibl. No 9).

D'autre part, l'absorption est étroitement liée au phénomène de dispersion, qui est particulièrement accentué au voisinage des bandes d'absorption et où il présente souvent de fortes anomalies. En effet, les indices de réfraction et d'absorption changent de valeur pour les diverses radiations; l'indice de réfraction, cependant, varie généralement plus d'une radiation à l'autre que l'indice d'absorption.

Normalement, l'indice de réfraction augmente lorsque la longueur d'onde diminue. La radiation bleue, à indice plus élevé, aura un pouvoir réflecteur supérieur et dominera sur les autres couleurs: le minéral sera coloré en bleu. C'est le cas de la dispersion normale (chalcosine par exemple). Dans le cas fréquent de dispersion anormale, une autre couleur, le jaune par exemple, aura l'indice de réfraction le plus élevé; cette radiation sera la plus vivement réfléchie, elle dominera sur les autres et colorera le minéral (pyrrhotine par exemple).

On peut conclure, d'une façon générale, que c'est l'absorption qui donne au minéral sa propriété dispersive, mais que c'est principalement les indices de réfraction qui produisent de notables différences dans le pouvoir réflecteur des diverses radiations et qui entraînent de nettes colorations.

Les minéraux les plus colorés sont ceux assez opaques pour avoir un indice d'absorption d'une certaine importance, et transparents sous une épaisseur suffisante pour que l'indice de réfraction garde son

efficacité. Le pouvoir réflecteur de ces minéraux est régi par la formule générale citée plus haut.

Par contre, les minéraux parfaitement opaques, dont le pouvoir réflecteur est proche de l'unité, subissent peu l'influence de la dispersion de l'indice de réfraction, celui-ci ne jouant qu'un rôle minime sur le pouvoir réflecteur; ces minéraux auront un éclat vif mais ne seront que légèrement teintés.

Pour les minéraux transparents, dont l'absorption est faible ou nulle, il y aura peu ou pas de dispersion. Ils seront d'un gris plus ou moins clair, selon la valeur de l'indice de réfraction, et légèrement colorés selon la plus ou moins faible dispersion de celui-ci.

Couleur d'un minéral anisotrope

Les remarques faites précédemment pour les minéraux isotropes sont valables aussi pour les minéraux anisotropes. Ceux-ci présentent cependant en plus et de façon plus ou moins visible le phénomène de biréflexion (6). Vue en lumière blanche, la biréflexion est accentuée par des effets chromatiques; mais les deux indices présentent plutôt des variations d'intensité et de nuance des teintes que de nettes différences de couleur.

17. EFFET DE L'IMMERSION

L'emploi de l'immersion a pour effet, comme cela a été exposé précédemment (7), de diminuer le pouvoir réflecteur par l'abaissement de l'indice n du minéral, considéré par rapport à celui du milieu. Dans le cas de la dispersion, les indices des diverses radiations monochromatiques verront leur rapport entre eux être modifié par l'immersion et, en conséquence, la valeur des pouvoirs réflecteurs sera elle aussi changée pour les diverses radiations.

Ce ne sera pas toujours la même radiation qui dominera les autres lorsque l'on utilisera une série de liquides. Un minéral pourra changer de couleur et d'intensité à chaque nouvelle immersion. Ce processus est observable surtout chez les minéraux très dispersifs et dont les indices ne sont pas trop éloignés de ceux des liquides.

L'exemple le plus frappant est celui de la covelline qui est bleue à l'air, violet bleu dans l'eau, rouge violet dans l'huile de cèdre et orange rouge dans l'iodure de méthylène.

En général, le changement de teinte ne dépasse guère le degré des nuances. L'immersion, cependant, peut mettre en évidence une biréflexion faible à l'air mais qui devient sensible à l'oeil grâce à des effets chromatiques accentués.

Les minéraux opaques, à pouvoir réflecteur pas trop élevé, modifient plus nettement leur apparence à l'immersion que les minéraux parfaitement opaques, dont le pouvoir réflecteur élevé ne sera que peu abaissé et dispersé par l'usage d'un liquide.

18. EXTINCTIONS INCOMPLETES

En lumière monochromatique, certains minéraux présentent, entre les nicols croisés, des extinctions incomplètes, qu'ils soient isotropes ou anisotropes. En lumière blanche, cet état de fait provient des mêmes causes que celles citées plus haut (8 et 14), mais des effets chromatiques dus à la dispersion teintent la lumière de l'intensité minima qui correspond à l'extinction incomplète.

Chez les minéraux isotropes, le phénomène est peu apparent mais chez les minéraux anisotropes, la dispersion des positions d'extinction pourra être particulièrement accentuée pour ceux appartenant aux systèmes orthorhombique, monoclinique et triclinique.

Les indicatrices de ces systèmes ont montré (13) que les sections inclinées sur un plan de symétrie donnent lieu à de la lumière elliptique complexe. S'il y a dispersion des ellipses de vibration des diverses radiations, le minéral n'aura pas d'extinctions complètes et franches mais un minimum d'intensité qui, durant une petite rotation de la platine, présentera des variations de nuance. En fait, ces nuances sont peut perceptibles, car la luminosité est faible mais de part et d'autre du minimum d'intensité apparaissent des teintes différentes qui dénotent une position non symétrique des diverses radiations par rapport à la section principale du polariseur. Ce fait influencera la teinte de la radiation réfléchie par le minéral en position du maximum d'éclairement.

La lumière incidente elliptique, due à l'équipement optique, et la lumière dépolarisée partiellement par la surface, peuvent, l'une et l'autre, être dispersées, et contribuer au défaut d'extinction.

11ème partie

Dispersion du plan de polarisation de l'onde réfléchie

19. OBSERVATION ENTRE NICOLS CROISES ET EN LUMIERE BLANCHE

On sait que lorsqu'on imprime une rotation de 360° à un minéral anisotrope, observé entre les nicols croisés et en lumière monochromatique, il passe par 4 positions d'extinction. Entre ces 4 positions, le minéral rétablit la lumière car l'onde réfléchie n'est pas

arrêtée par l'analyseur. Nous avons vu (9) que l'onde incidente se partage en deux composantes parallèles aux indices n_1 et n_2 de la section du minéral; ces deux rayons subissent, par absorption, une diminution d'amplitude et donnent lieu à une résultante réfléchie, dont le plan de polarisation a tourné d'un certain angle par rapport à celui du rayon incident. Ce processus est facilement contrôlable en tournant l'analyseur dans le sens convenable, afin de le croiser avec l'onde réfléchie et de rétablir ainsi une extinction. Celle-ci ne sera pas complète s'il y a production de lumière elliptique, mais l'angle de rotation du plan de polarisation de l'onde réfléchie sera déterminé par l'angle de rotation de l'analyseur qui amènera le minimum de luminosité. Cet angle sera d'autant plus grand que la différence d'absorption entre les deux composantes sera plus accentuée (fig. 3).

Si maintenant on fait usage de la lumière blanche, l'extinction par rotation de l'analyseur ne sera rétablie que pour les minéraux peu ou pas dispersifs, car dans ce cas, toutes les radiations ayant des indices de réfraction et d'absorption égaux ou très voisins, traverseront ensemble le processus optique de réflexion.

Dans le cas d'un minéral dispersif, il ne sera pas possible de rétablir l'extinction par rotation de l'analyseur. En effet, les radiations monochromatiques ont des indices n et k qui varient parfois notablement de valeur de l'une à l'autre. Leur pouvoir réflecteur variera en conséquence de cette variation des indices, ce qui amène une coloration plus ou moins accentuée du minéral en lumière naturelle.

D'autre part, l'absorption sera différente pour chaque couleur et par conséquent l'angle de rotation du plan de polarisation est, lui aussi, dispersé. En faisant tourner l'analyseur dans le sens convenable, on le croise successivement avec le plan de polarisation des diverses radiations réfléchies qui sont ainsi éteintes l'une après l'autre, tandis que leur teinte complémentaire apparaît.

La rotation de l'analyseur, si la dispersion est étendue, ne pourra rétablir l'extinction et entraînera une succession de teintes. Pour obtenir une vue juste de la dispersion et des observations comparables entre les divers minéraux, il importe d'opérer avec des nicols aussi rigoureusement croisés que possible.

20. REGLAGE DU CROISEMENT DES NICOLS

On réglera pour commencer la position des nicols au moyen d'un minéral isotrope, la magnétite et la galène par exemple, pour les-

quels on amènera une extinction complète ou, si ce n'est pas possible, le minimum de luminosité, en déplaçant légèrement l'analyseur, et le polariseur s'il y a lieu.

La figure 4 montre que lorsque l'analyseur est en position croisée avec le rayon réfléchi d'un minéral anisotrope, en position d'éclairement, il y a rétablissement d'extinction et que celle-ci ne se produit que deux fois pendant une rotation de 360° . Par contre, si l'analyseur se trouve dans une position intermédiaire, entre celle croisée avec le polariseur et celle croisée avec le rayon réfléchi, une rotation de 360° , imprimée au minéral, amène à nouveau quatre positions d'extinction mais qui ne sont plus perpendiculaires entre elles. On peut inversement conclure que les nicols ne sont pas rigoureusement croisés, si un minéral présente des extinctions qui ne sont pas à 90° les unes des autres.

Il est donc possible de parfaire la position croisée des nicols, fixée au moyen d'un minéral isotrope, en corrigeant, souvent imperceptiblement, la position de l'analyseur, jusqu'à obtention d'extinctions perpendiculaires. Il importe de choisir, pour un réglage précis, un minéral anisotrope dont les extinctions sont aussi complètes et franches que possible et ne présentant pas de lumière elliptique dispersée dans la direction des indices.

Une préparation de covellite et une de magnétite avec aiguilles de rutile se sont montrées particulièrement propres au but proposé.

Les teintes de dispersion dans les positions d'éclairement du minéral peuvent aussi contribuer, dans des cas déterminés, au réglage précis du croisement des nicols.

21. OBSERVATION DES TEINTES DE DISPERSION ENTRE LES NICOLS CROISÉS

Choisissant un minéral ayant de bonnes extinctions, on le placera en position d'extinction en mettant son plus grand indice n_2 parallèlement à la section principale du polariseur.

En tournant la platine du microscope de 45° , dans un sens puis dans l'autre, le minéral réfléchit un rayon lumineux dont l'intensité représente le pouvoir réflecteur moyen de la section, et cette intensité sera identique dans les deux positions.

Si le minéral est peu ou pas dispersif, la lumière sera légèrement colorée ou blanche. Par contre, si le minéral possède une forte dispersion, le rayon réfléchi sera coloré par la radiation dont l'intensité est dominante. Cette coloration sera la même de part et d'autre de la position d'extinction puisque le plan de polarisation OP' de

l'onde réfléchi tourne symétriquement d'un même angle par rapport au plan OP de l'onde incidente, mais la coloration ne sera pas identique si les nicols ne sont pas rigoureusement croisés. C'est en tenant compte de ce fait que, pour mieux discerner l'anisotropie faible d'un minéral, il est recommandé de légèrement décroiser les nicols, afin de produire un contraste entre les positions d'éclairement.

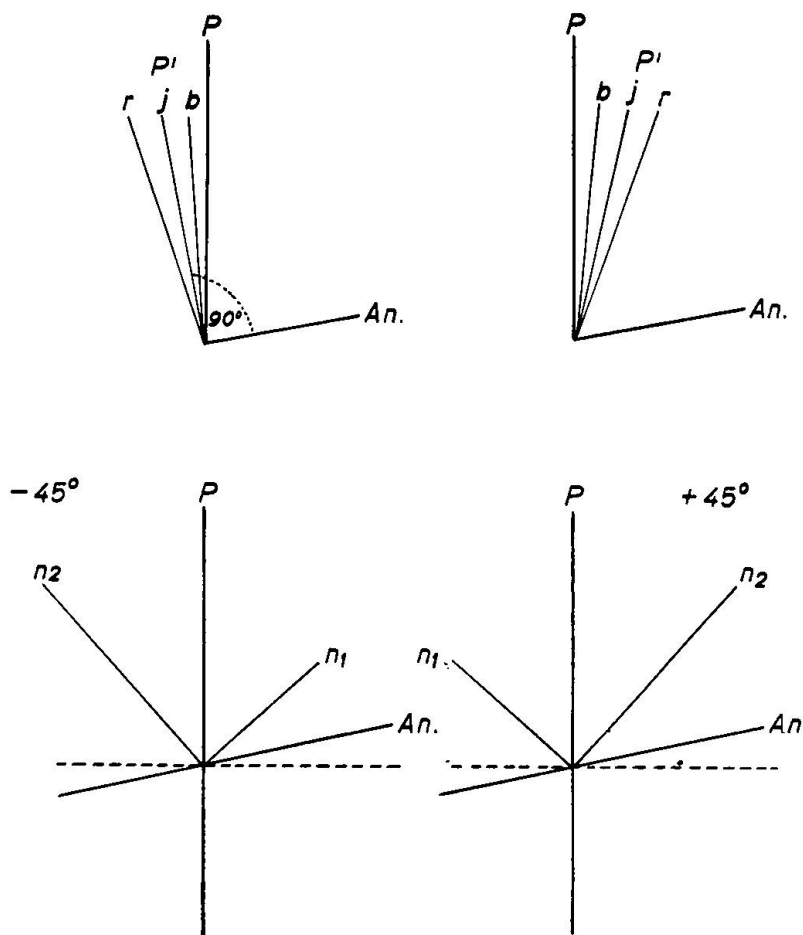


Fig. 7. Dispersion du rayon réfléchi OP'

Cette différence de teinte des deux positions d'éclairement est en relation avec la dispersion du plan de polarisation de l'onde réfléchi; le plan OP' n'est pas commun à toutes les radiations de la lumière blanche. La valeur de son angle de rotation varie plus ou moins, pour chaque radiation, selon les minéraux; cette dispersion est plus ou moins étendue et n'intéresse pas toujours toutes les radiations; le plan OP' peut être très rapproché, sinon confondu, pour certaines d'entre elles alors que pour d'autres, il est largement dispersé.

La figure 7 montre que, si l'analyseur n'est pas croisé, les deux positions d'éclairement ne sont plus symétriques. Dans la position -45° , l'analyseur est croisé avec la radiation réfléchie OP' jaune, qu'il éteint; le minéral sera coloré par la radiation complémentaire dominante, et l'intensité générale sera diminuée. Dans la position $+45^{\circ}$, les divers plans OP' des radiations réfléchies s'inclinent vers la position parallèle à l'analyseur; l'intensité de l'onde réfléchie sera plus grande et colorée par la radiation au plus grand pouvoir réflecteur.

Cet exemple montre le cas d'un dérèglement accentué de l'analyseur. Par le réglage au moyen des extinctions symétriques, l'analyseur peut être assez rigoureusement croisé mais il est possible de parfaire ce réglage en cherchant à égaliser l'intensité lumineuse des deux positions à $+$ et -45° , puis par de délicates retouches, à égaliser les teintes.

Une telle manipulation est d'une extrême délicatesse et n'exige de l'analyseur qu'un mouvement de l'ordre de fractions de degré, surtout si les plans OP' des radiations sont rapprochés et ne forment qu'un petit angle avec le plan OP .

Si l'égalité des teintes ne peut être obtenue par le mouvement de l'analyseur seul, il faut légèrement modifier la position du polariseur, dont le plan de polarisation n'est pas parallèle au plan d'incidence sur le prisme à réflexion totale, ce qui entraîne une production de lumière elliptique dispersée.

Tous les minéraux ne sont pas utilisables pour un tel réglage. Ceux des systèmes à symétrie inférieure, entre autres, ne peuvent donner, dans les positions d'éclairement, des teintes identiques. On sait que, déjà l'onde incidente OP est elliptique et peut être dispersée, ce qui revient à dire que les positions d'extinctions des diverses radiations ne sont pas identiques. Le bleu, par exemple, peut avoir sa position d'extinction à gauche, et le rouge à droite du plan OP d'une onde rectilignement polarisée. Les plans OP' des radiations bleue et rouge ne seront plus dans une situation semblable vis-à-vis de l'analyseur pour les positions $+45^{\circ}$ et -45° du minéral, et dans ces conditions, les teintes ne peuvent être identiques.

Les minéraux réfléchissant une lumière elliptique complexe et dispersée montrent d'ailleurs des teintes variant souvent beaucoup avec l'orientation des sections. Pour ces minéraux, si l'on obtient, par tâtonnement de l'analyseur, une égalité rapprochée de teintes et d'intensités, on constate que les extinctions ne sont plus à 90° . Les nicols ont été dérèglés en plaçant l'analyseur dans une orientation

moyenne entre les deux positions asymétriques d'éclairement. Pour obtenir un tel réglage, il faut un déplacement de l'analyseur beaucoup plus important que dans le cas précédent et qui indique que le minéral observé réfléchit de la lumière elliptique complexe et n'est pas propre au réglage d'un croisement rigoureux des nicols.

22. ROTATION DE L'ANALYSEUR ET SUCCESSION DES TEINTES

Le réglage des nicols ainsi effectué, on peut procéder à l'examen de la succession des teintes produite par la rotation de l'analyseur. Pour cela, si un choix est possible, il se portera sur une section de plus grande biréfractance, afin d'avoir une bonne luminosité et un angle maximum de rotation du rayon réfléchi.

L'observation de la dispersion exigeant le décroisement de l'analyseur, sa position croisée avec le polariseur sera facilement retrouvée en prenant préalablement note, sur la graduation de la platine, de l'une des positions d'extinction du minéral; en replaçant la platine à la graduation relevée, la juste position croisée de l'analyseur est facilement retrouvée en le tournant jusqu'à l'extinction du minéral. L'examen de quelques minéraux mettra en évidence la variabilité de la dispersion; l'attention se portera sur la qualité de l'extinction, sur les teintes de dispersion dans les deux positions d'éclairement maximum ainsi que sur le rétablissement plus ou moins complet de l'extinction et la dispersion des radiations, observés pendant la rotation de l'analyseur. La position, en degrés, de l'analyseur sera indiquée avec chaque teinte citée.

Les minéraux choisis sont nettement anisotropes; ceux de faible anisotropie ne peuvent se prêter à l'étude de la dispersion car celle-ci est trop faible; l'anisotropie n'est d'ailleurs perceptible qu'entre les nicols légèrement décroisés.

Molybdénite (Azegour, Maroc.)

Système hexagonal. Pouvoir réflecteur de la radiation verte: 36 % (rayon ordinaire), 15,5 % (rayon extraordinaire).

Les extinctions sont complètes; généralement onduleuses, elles se révèlent être rigoureusement à 90° sur une partie restreinte et plane d'une section. La lumière réfléchie a même intensité et même couleur gris jaunâtre dans les deux positions d'éclairement maximum. Entre nicols légèrement décroisés, les teintes sont respectivement gris blanc et gris rosé.

La rotation de l'analyseur rétablit une bonne extinction, parfois

légèrement teintée de violet, extinction qui est précédée et suivie de légères colorations.

La grandeur de l'angle de rotation de l'analyseur, qui rétablit l'extinction, dépend de l'orientation de la section.

En considérant une section de haute biréfractance (I), de biréfractance moyenne (II) et de basse biréfractance (III), la rotation de l'analyseur donne, au degré donné, l'extinction rétablie et les teintes caractéristiques suivantes:

	gris mauve	extinction rétablie	gris verdâtre
I.	7°	12°	17°
II.	6°	10°	15°
III.	4°	8°	12°

Ilménite dans Magnétite (Kramstad, Suède)

Système hexagonal. P. R. du vert: 18 %.

L'ilménite, en aiguilles, a des extinctions franches qui la font disparaître dans la magnétite. Ces extinctions sont symétriques. Par un réglage rigoureux des nicols, l'intensité et la teinte, dans les deux positions d'éclairement maximum, sont identiques, mais il suffit d'un déplacement extrêmement petit de l'analyseur, qui n'affecte guère les extinctions symétriques, pour amener une différence d'intensité et de teinte (respectivement gris bleuté clair et gris brunâtre terne).

La rotation de l'analyseur produit les effets chromatiques suivants: 1° gris bleu clair; 1° 1/2 gris bleu foncé; 2° extinction rétablie; 2° 1/2 gris brun foncé; 3° gris brunâtre.

Breithauptite (Saint-Andreasberg, Hartz)

Système hexagonal. P. R. du vert: 45 % (r. ord.), 35 % (r. extraord.).

Les extinctions sont franches, incomplètes et symétriques. Dans les positions d'éclairement maximum, l'égalisation de l'intensité s'obtient aisément, mais l'égalisation de la teinte (vert jade) est plus délicate à obtenir. Les teintes sont dans les deux positions d'éclairement, respectivement vert bleuté clair et vert jaunâtre clair, lorsque l'extinction est incomplète et la lumière incidente particulièrement vive.

La rotation de l'analyseur produit une série de teintes sans rétablir d'extinction complète, mais seulement un minimum de luminosité d'un violet très foncé. Les diverses orientations des sections

font varier assez nettement l'angle de rotation nécessaire au rétablissement de l'extinction.

En considérant une section de forte birélectance (vert-jade clair) (I), une de birélectance moyenne (vert bleu) (II) et une de faible birélectance (gris brun) (III), elles donnent les teintes suivantes pour les positions indiquées de l'analyseur:

	2°	3°	4°	5°
I.	bleu vert	bleu foncé	minimum lum.	mauve foncé
II.	bleu foncé	minimum lum.	mauve foncé	mauve
III.	minimum lum.	mauve foncé	gris mauve	mauve clair

C o v e l l i n e (Bor)

Système hexagonal. P. R. du vert: 18,5 % (r. ord.), 25 % (r. extraord.).

Les extinctions sont complètes, très franches et symétriques. En position d'éclairement maximum, l'intensité et la teinte (blanc rosé) sont identiques et faciles à obtenir.

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas d'extinction et à peine un minimum d'intensité; elle produit une succession de teintes, à des angles variables pour chacune d'elles selon l'orientation des sections. En considérant, comme précédemment, trois sections de birélectance différente, les teintes suivantes s'observent aux degrés indiqués.

	orange	rouge orange	rouge	pourpre
I.	5°	15°	20°	25°
II.	5°	11°	15°	19°
III.	5°	7°	10°	13°

S t i b i n e (Matignat, Allier)

Système orthorhombique. P. R. du vert: 44 % (// c), 30,5 % (// b).

La différence d'orientation des sections leur donne un aspect variable; les unes ont de bonnes extinctions symétriques et une même teinte dans les deux positions d'éclairement maximum. Les autres ont des extinctions incomplètes avec minimum d'intensité d'un noir brunâtre qui persiste pendant une rotation de 5° à 7°, et les nuances des teintes dans les positions symétriques d'éclairement ne sont pas égalisables; ces teintes sont respectivement gris bleuté et gris brunâtre à rosé et sont variables selon l'orientation des sections.

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction mais produit un minimum d'intensité violet très foncé.

Les teintes observées par rotation de l'analyseur sont les suivantes: 3° gris bleu; 4° bleu foncé; 6° (minimum) violet foncé; 8° brun foncé; 10° brun cuir clair.

Les sections de moindre birélectance agissent plus sur la luminosité des teintes que sur la grandeur des angles de dispersion.

Luzonite (Chili, Hercols et Kipushi (Congo))

Système monoclinique. P. R. du vert: 25 %.

La birélectance est variable selon l'origine du minéral.

Les extinctions sont franches et parfois complètes.

Les couleurs, entre les nicols croisés, sont assez variées selon l'orientation des sections, ce qui est une caractéristique du minéral (gris jaunâtre, jaune, orangé, rouge sombre, gris bleu, bleu ciel et bleu violacé). Les positions à $\pm 45^{\circ}$ ont souvent la même teinte mais généralement une différence de nuance (jaune terne et orangé, bleu et bleu violacé, ...).

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction mais un minimum d'éclairement encore très lumineux. Les teintes successives sont, là aussi, très variées.

0°	2° ou 3°	5°
bleu clair	bleu foncé (min.)	blanc bleuté à vert clair
jaune paille	minimum	vert gris terne
jaune paille clair	minimum	gris rosé
orangé	minimum	jaune paille

L'energite, qui accompagne généralement la luzonite, offre des teintes encore plus variées montrant une forte dispersion. Les couleurs observées qui encadrent les positions d'extinction ou de minimum de luminosité sont respectivement: gris vert olive et gris bleu jade; gris verdâtre clair et vert foncé; gris rosé et bleu vert; gris violacé et jaune paille; bleu foncé et jaune orangé.

L'examen des résultats d'observations faites sur ces minéraux permettra d'arriver à des conclusions propres à donner une idée du processus de dispersion et de sa variation.

En considérant la rotation qu'il faut imprimer à l'analyseur pour rétablir l'extinction, ou le minimum de luminosité, d'un minéral en position d'éclairement, on remarque qu'elle ne dépasse que rarement 10° et qu'elle peut être de 2° ou même moins. Un tel angle n'est guère considéré, par lui seul, comme un caractère vraiment spécifique, d'autant moins qu'il varie dans des proportions relativement grandes avec l'orientation des diverses sections. On ne dispose pas, comme chez les minéraux transparents, des figures de lumière convergente pour vérifier l'orientation optique, et ce n'est que par la mesure des pouvoirs réflecteurs des deux rayons qu'il est possible de

trouver la section de birélectance maxima. Mais, même sur de telles sections, le mouvement de l'analyseur, rétablissant l'extinction, a une amplitude trop voisine chez bon nombre de minéraux pour constituer un caractère distinctif.

Il en est autrement si l'on considère non seulement la position d'extinction, mais aussi la qualité de celle-ci et les effets de dispersion qui l'accompagnent. L'observation de ces effets permet d'interpréter les diverses manifestations de la dispersion, qui peuvent varier sensiblement d'un minéral à l'autre.

Chez l'ilménite, une rotation de l'analyseur de 2° rétablit l'extinction, alors qu'elle est de 10° chez la molybdénite. Dans les deux cas, l'extinction est presque complète et encadrée de deux teintes, respectivement mauve et verdâtre chez la molybdénite, et bleutée et brunâtre chez l'ilménite. Par suite de la différence de phase entre les deux composantes, le rayon réfléchi OP' est elliptiquement polarisé (fig. 5). La faible dispersion observée pour ces deux minéraux, au voisinage de l'extinction rétablie, permet d'estimer qu'il s'agit d'une dispersion des axes a et b de la lumière elliptique réfléchie; c'est-à-dire que les ellipses de vibration des diverses radiations dispersées restent inscrites dans le rectangle $2OA'$ et $2OB'$. Entre les nicols croisés, l'extinction est bonne dans les deux cas, mais l'égalisation de la teinte des deux positions d'éclairement de l'ilménite est une chose délicate. En effet, l'onde réfléchie OP' n'est qu'à 2° , ou moins, de la section du polariseur OP et il suffira d'un déplacement extrêmement petit de l'analyseur pour le rapprocher ou le croiser avec la radiation dispersée la plus proche de OP ; on amène ainsi une dissymétrie entre les deux positions d'éclairement et, partant, une différence de teinte.

Pour la molybdénite, la dispersion étroite étant aux environs de 10° de OP , le mouvement de l'analyseur influencera moins rapidement la symétrie des teintes.

Chez la breithauptite, la rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction et produit une succession de teintes d'intensité variable qui passe par un minimum; ce minimum peut être considéré comme correspondant à l'extinction de la radiation la plus vivement réfléchie.

Pour une section de birélectance élevée, la succession des teintes s'échelonne durant une rotation de l'analyseur de 10° à 12° , le minimum d'intensité se plaçant vers 4° ou 5° . La dispersion est ici notablement plus étendue que chez l'ilménite, quoiqu'elle se resserre presque de moitié pour les sections de faible birélectance.

Les teintes observées (vert bleuté, bleu vert, bleu foncé, violet foncé, mauve foncé, mauve clair) sont les teintes complémentaires des rouge, orangé et jaune qui sont les radiations les plus fortement réfléchies par la breithauptite. Celle-ci est en effet jaune rougeâtre clair, selon l'indice n_2 , et rouge violacé, selon l'indice n_1 . L'analyseur est amené, par rotation, successivement en position croisée avec les diverses radiations dispersées et les éteint, en laissant passer la teinte complémentaire.

Une dispersion aussi étendue ne peut guère être attribuée qu'à la simple dispersion d'un rayon réfléchi OP' , elliptiquement polarisé, comme c'est le cas pour la molybdénite et l'ilménite. Ici, les diverses radiations sont plus nettement séparées et ont leur plan OP' diversement orienté; elles peuvent être aussi elliptiquement polarisées, mais les ellipses de vibration pour chaque radiation ne s'inscrivent pas dans un même rectangle. Le rapport de OA' à OB' n'est vraisemblablement pas le même pour chacune d'elles.

Ce cas ressort encore plus nettement pour la covelline.

Entre les nicols croisés, la breithauptite ne donne pas d'extinction complète mais une teinte d'un noir brunâtre qui, par de petits mouvements de la platine, passe de part et d'autre au jaunâtre et au verdâtre. La lumière réfléchie est légèrement dépolarisée ou rendue elliptique, comme c'est le cas pour les minéraux à pouvoir réflecteur élevé. Elle est aussi légèrement dispersée et cette dispersion, quoique très peu accentuée, atteint la symétrie des deux positions d'éclairement maximum en agissant sur la nuance des teintes, sans cependant influencer leur intensité.

La covelline offre l'exemple de la dispersion la plus étendue. Les teintes se succèdent pendant une rotation de 25° de l'analyseur pour une section de forte biréflexance et de 13° chez une section presque cyclique. Ici, les plan OP' des diverses radiations sont nettement séparés et il ne peut s'agir d'une simple dispersion d'un seul rayon elliptique. Les teintes observées sont surtout les complémentaires du bleu.

Les diverses nuances (blanc rosé, orange, orangé rouge, rouge et grenat) se succèdent à des intervalles de 5° à 10° et sont successivement éteintes par le mouvement de l'analyseur; au delà de 25° , la teinte grenat passe au bleu, les nicols étant suffisamment décroisés pour laisser apparaître la couleur du minéral, vue en nicols parallèles ou sans analyseur. Entre les nicols croisés, les extinctions de la covelline sont complètes et sans dispersion. La teinte

des positions symétriques d'éclairement est facilement égalisée en nuance et en intensité.

Chez la stibine, la rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction mais produit un minimum d'intensité lumineuse, plus ou moins accentué, aux environs de 6 à 8° pour les sections de forte biréflexion. Les teintes sont plutôt ternes et peu variées, ce qui implique une dispersion partielle n'intéressant que quelques radiations, car ici, le minéral est blanc et n'en absorbe aucune. Le changement de couleur s'effectue lors d'une rotation de 4 à 5° , ce qui permet de supposer qu'il y a encore ici une dispersion du plan de polarisation OP' plutôt qu'une simple dispersion d'ellipses de vibration, inscrites dans un rectangle commun $2OA'$ et $2OB'$. Entre les nicols croisés, les sections de la stibine se comportent de façon différente selon leur orientation optique.

Nous savons que les sections non comprises dans un plan de symétrie réfléchissent une lumière elliptique complexe, due au fait que le rayon incident est lui-même déjà elliptiquement polarisé. De telles sections n'ont que des extinctions incomplètes qui peuvent être, de plus, dispersées. Les deux positions d'éclairement ne peuvent être symétriques par rapport à une position d'extinction, elle-même asymétrique. Les teintes, comme les intensités, ne peuvent être égalisées dans les positions d'éclairement maximum. Seules, les sections comprises dans un plan de symétrie, et perpendiculaires aux deux autres, ne présenteront pas de lumière incidente elliptique et pourront avoir leurs positions d'éclairement maximum égales en teinte et en intensité.

Les diverses sections des minéraux des systèmes à symétrie inférieure auront donc des teintes et des intensités assez variables.

C'est le cas de la luzonite, chez laquelle seules les sections perpendiculaires au plan de symétrie auront leurs composantes OA et OB rectilignement polarisées et donneront des extinctions complètes. Selon toutes les autres orientations, la lumière sera elliptiquement complexe.

A ce fait s'ajoute le caractère dispersif du minéral qui se manifestera d'une façon d'autant plus variée que les courbes, découpées par le plan de la section dans les indicatrices, sont très asymétriques.

De plus, les indices principaux n , compris dans le plan de symétrie, ne sont plus à 90° et il en est de même pour les indices k ; enfin, ces divers indices forment entre eux des angles variables. On voit donc que la dispersion des indices, comme celle du plan de polarisation du rayon réfléchi, seront d'une particulière complexité

qui se manifeste dans la variété peu commune des effets chromatiques.

Ces observations, faites sur des minéraux choisis pour la diversité qu'ils manifestent en dispersion, permettent de formuler quelques conclusions générales.

La dispersion, dans les quatre positions d'extinction, est faible; elle intéresse les minéraux à symétrie inférieure, qui produisent dans ces positions une lumière elliptique complexe, ainsi que certains minéraux des autres systèmes dont le pouvoir réflecteur est particulièrement élevé. Cette dispersion n'influence guère la symétrie des positions d'extinction incomplète mais agit sur la nuance des teintes des positions d'éclairement maximum.

Parmi les minéraux dont les extinctions sont dispersées ou non se rencontre une dispersion plus ou moins étendue du rayon réfléchi OP' . Si cette dispersion est peu accentuée la rotation de l'analyseur rétablira une extinction presque complète et nous avons interprété le fait comme une dispersion de l'ellipse de vibration du rayon réfléchi. Un rétablissement complet de l'obscurité ne pourra s'obtenir qu'en lumière monochromatique et avec le quartz compensateur rétablissant la lumière rectilignement polarisée.

La dispersion étendue, grâce à laquelle la rotation de l'analyseur ne produit pas, ou qu'un faible minimum de luminosité, s'explique par un étalement des directions de polarisation OP' des diverses radiations (fig. 7). De bonnes extinctions peuvent être rétablies en lumière monochromatique, et sans quartz compensateur, si les rayons OP' sont peu ou pas elliptiquement réfléchis, comme c'est le cas pour la covelline. Ces quelques cas de dispersion montrent qu'elle peut se manifester de façon variable, en qualité et en intensité, et qu'elle pourrait offrir des caractères spécifiques propres à faciliter la détermination d'un minéral.

C'est à l'examen de cette question qu'est consacré le dernier chapitre.

23. LA DISPERSION DU PLAN DE POLARISATION, FACTEUR DE DETERMINATION

L'étude des six minéraux, au chapitre précédent, a montré, d'une part, la grandeur variable de l'angle de rotation de l'analyseur nécessaire au rétablissement de l'extinction et, d'autre part, le rétablissement plus ou moins complet de cette extinction, accompagné de teintes variées et diversement dispersées.

L'angle de l'extinction rétablie, qui change selon l'orientation des sections, ne fournit guère qu'une valeur relative. Par contre, la nature des teintes, ou l'étendue de leur dispersion, offre des caractères plus spécifiques.

La difficulté reste l'estimation et la dénomination de ces teintes, qui sont complexes et nuancées, étant les complémentaires d'une ou plusieurs radiations arrêtées par l'analyseur.

Il est certain que le facteur personnel joue un grand rôle dans leur définition mais, même si certaines nuances peuvent être diversement décrites par plusieurs observateurs, les couleurs dominantes sont toujours reconnaissables. Il est souvent très difficile de définir la couleur d'un minéral poli lorsqu'il se trouve seul et sans possibilité d'être comparé à un autre, ou lorsqu'il se trouve au côté d'un minéral dont la teinte et le pouvoir réflecteur sont très différents. La succession de couleurs, produite par la rotation de l'analyseur, donne l'avantage de pouvoir comparer une série de teintes se suivant graduellement et dont les intensités sont assez proches; de ce fait, il est plus facile d'en établir la nature. Indépendamment du facteur personnel, l'appareillage, et particulièrement la source lumineuse, peut avoir une influence sur les teintes observées mais sans cependant dépasser le degré des nuances. D'ailleurs, les caractères de dispersion d'un minéral, qui pourraient aider à sa détermination, ont surtout une valeur comparative. Si la comparaison entre la dispersion de divers minéraux se fait avec le même équipement optique et la même source lumineuse, les effets chromatiques inhérents à l'appareillage n'ont plus guère d'importance. Il faut cependant les réduire au minimum par un réglage soigné de l'appareil.

OBSERVATIONS SUR QUELQUES MINÉRAUX

Les observations qui suivent ont été faites avec le microscope Leitz, muni de l'illuminateur „Opak“ à prisme et de l'objectif 3, spécial pour la lumière réfléchi. La source lumineuse est une lampe Monla, de Leitz, avec filtre bleu et résistance réglable.

La lumière incidente sera réglée aussi minutieusement que possible afin d'avoir un champ également éclairé et sans irisations au bord du diaphragme de l'illuminateur. Ce diaphragme sera en partie fermé pour éliminer les rayons périphériques obliques.

Processus des observations

Le grand indice du minéral (n_2) sera placé parallèlement au plan de polarisation du polariseur (direction du réticule vertical de l'ocu-

laire). La rotation de l'analyseur se fait dans le sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, ce sera la direction — (moins). Par rotation de la platine, dans ce sens, jusqu'au maximum de luminosité du minéral, ce dernier se trouve dans la position que nous nommerons -45° , quoique le maximum ne soit pas toujours exactement à 45° de l'extinction. La position d'éclairement maximum symétrique, obtenue par rotation de la platine en sens inverse, sera appelée $+45^{\circ}$.

Le plan de polarisation de l'onde réfléchie tournant dans la direction du plus grand indice du minéral, c'est dans la direction -45° , qui est celle de rotation de l'analyseur, que le rétablissement de l'extinction sera obtenu.

Bismuthine (Tarna. Bolivie. Brosso. Huayna Potosi)

Système orthorhombique.

Les extinctions sont assez franches, presque complètes, bordées de brun (direction —) et de bleu (direction +). La couleur et l'intensité sont égales dans les deux positions d'éclairement ($\pm 45^{\circ}$) chez certaines sections seulement. Couleur vert jade clair chez les sections très biréfléctantes. En général, gris jaune verdâtre (-45°) et gris bleu verdâtre ($+45^{\circ}$), mais variable selon les orientations.

La rotation de l'analyseur rétablit l'extinction parfois complète mais généralement un minimum de luminosité brun très foncé.

Succession des teintes: elle est sujette à certaines variations. 0° gris jaunâtre clair; 2° jaune verdâtre; 3° minimum; 5° rose violace.

Position de l'analyseur à environ 6° :

— 45° rose violacé plus ou moins clair.

+ 45° blanc jaune à verdâtre.

Chez certaines bismuthines, les teintes sont assez ternes.

Berthiérinite (Braunsdorf. Příbram. Auvergne)

Système orthorhombique.

Les extinctions sont assez franches, sinon complètes.

Les teintes dans les positions $\pm 45^{\circ}$ varient un peu selon l'orientation. Elles sont parfois égales dans les deux positions (bleu à gris bleu ou gris bleu jade). Sinon, elles se répartissent comme suit:

— 45° gris bleu	+ 45° gris bleu vert à jaunâtre
— 45° bleu	+ 45° gris bleuté

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction, mais ne donne qu'un minimum de luminosité. La dispersion est étendue et les teintes, chez certaines berthiérites, se succèdent nettement: gris bleuté clair, bleu jade pâle, bleu, bleu foncé, violacé (minimum), rouge mauve, brun orangé, brun brique clair.

Succession des teintes: elle est plus ou moins étendue selon l'orientation.

0° bleu clair; 3° bleu foncé; 4° minimum; 5° brun rouge sombre; 7° brun orangé foncé; 8° et plus, brun brique clair.

Position de l'analyseur à 5°. Teintes variables selon les sections:

— 45° bleu violacé	+ 45° blanc
— 45° brun orangé foncé	+ 45° gris clair verdâtre
— 45° brun cuir clair	+ 45° gris

Boulangérite (Altenkirchen. Pribram)

Système orthorhombique.

Les extinctions sont bonnes et franches. Les teintes dans les deux positions $\pm 45^\circ$ sont ternes et s'égalisent chez certaines sections; elles changent peu avec la différence d'orientation des sections.

$\pm 45^\circ$ gris terne ou — 45° gris bleuté et + 45° gris jaunâtre. La rotation de l'analyseur rétablit une bonne extinction.

Succession des teintes:

0° gris; 1° gris bleuté; 2° extinction; 4° gris brunâtre.

Position de l'analyseur à 5°:

— 45° gris brunâtre terne. + 45° gris clair.

Jamesonite (Arnsberg. Cornouailles)

Système orthorhombique.

Les extinctions sont franches et parfois complètes.

Dans les deux positions $\pm 45^\circ$, les teintes sont plus accentuées que chez la boulangérite, mais varient moins que la luminosité avec les différences d'orientation.

$\pm 45^\circ$ gris bleu ou gris brunâtre à jaune brun	
— 45° gris bleu	+ 45° gris brunâtre

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction, mais un minimum de luminosité bleu très foncé, ou parfois gris terreux, non encadré de teintes.

Succession des teintes:

0° gris bleu; 3° minimum; 5° gris brun à rosé.

Position de l'analyseur à 5°:

— 45° gris terne à rosé. + 45° gris clair.

Bournonite (Le Langeac, Hte Loire. Origines inconnues)

Système orthorhombique.

Les extinctions sont peu franches et souvent incomplètes. La luminosité est très faible entre les nicols croisés.

— 45° brun jaune. + 45° gris bleu terne.

La rotation de l'analyseur rétablit une extinction meilleure que celle des positions d'extinction.

Succession des teintes:

0° brun jaune clair; 1° extinction; 3° gris foncé bleuté.

Position de l'analyseur à 5°:

— 45° gris violacé. + 45° blanc jaunâtre.

Stibine (Queensland. Allier. Nevada)

Système orthorhombique.

Ses caractères ont déjà été décrits plus haut. Les teintes des positions $\pm 45^\circ$ varient selon l'orientation des sections mais dans des tons plutôt ternes.

— 45° gris bleuté, gris bleu, gris olive clair.

+ 45° gris clair jaunâtre, gris brunâtre clair, brun chocolat.

L'effet de la rotation de l'analyseur a été décrit plus haut. Ajoutons que la succession et la nuance des teintes varient notablement avec l'orientation des sections.

Position de l'analyseur à 8°:

— 45° brun cuir. + 45° blanc.

La boulangérite et la jamesonite sont caractérisées par leur très faible dispersion, nettement moins étendue que chez la stibine, et avec des nuances encore plus ternes. La boulangérite a un bon rétablissement de l'extinction; la rotation de l'analyseur est inférieure à celle exigée par la jamesonite, qui ne produit d'ailleurs qu'un minimum de luminosité.

La bournonite a une très faible biréfectance et un très petit angle de rotation de l'onde réfléchie OP' . Les teintes, quoique sombres, sont plus nettes que chez les minéraux précédents.

La bismuthine et la berthiérite sont caractérisées par leur dispersion étendue et riche en couleurs. Les verts (bleuté et jaunâtre) dominant chez la bismuthine, et le bleu chez la berthiérite. Le rétablissement de l'extinction est plus complet chez la bismuthine et est suivi d'une teinte rose violacé, caractéristique qui, chez la berthiérite, est d'un brun orangé.

C'est chez la stibine que l'angle de rotation de l'analyseur est le plus grand pour l'obtention du minimum de luminosité; celui-ci est suivi d'un brun jaune cuir assez terne mais caractéristique. La dispersion est étendue et les teintes varient plus, selon les différences d'orientation des sections, que chez les autres minéraux, mais elles sont nettement plus ternes que pour la berthiërite et la bismuthine.

L'observation des teintes à $+$ et $- 45^{\circ}$, dans la position indiquée de l'analyseur, est un apport utile à la différenciation.

Nickeline (Val d'Anniviers. Schladming, Tyrol. Pyrénées. Tasmanie)

Système rhomboédrique.

Les extinctions sont franches et presque complètes. Entre les nicols rigoureusement croisés, teinte bleue, délicate à égaliser ($- 45^{\circ}$ gris bleuté, $+ 45^{\circ}$ bleu verdâtre). Entre les nicols légèrement décroisés: $- 45^{\circ}$ bleu, $+ 45^{\circ}$ vert jaunâtre.

Peu de différences de teintes selon l'orientation des sections mais différence de luminosité.

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction mais donne un minimum de luminosité peu accentué.

La succession des teintes est la suivante:

0° bleu; 1° bleu foncé; 2° grisâtre à violacé (minimum); 4° jaune brun foncé; 5° brun orangé clair.

Position de l'analyseur à 5° :

$- 45^{\circ}$ brun orangé plus ou moins clair.

$+ 45^{\circ}$ blanc bleuté à bleu clair.

Millërite (Texas. St. Andreasberg)

Système rhomboédrique.

Les extinctions, souvent onduleuses, sont incomplètes. Dans les positions $\pm 45^{\circ}$ faible luminosité gris terne. Pour les nicols légèrement déréglés, $- 45^{\circ}$ gris jaunâtre, $+ 45^{\circ}$ gris bleuté. Il n'y a guère de différences selon l'orientation des sections.

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction, mais donne un minimum peu accentué.

La succession des teintes est la suivante:

0° gris jaune; 1° gris bleuté; 2° à 3° gris bleu foncé terne (minimum); 5° gris bleu violacé clair.

Position de l'analyseur à 5° :

$- 45^{\circ}$ gris bleuté à violacé.

$+ 45^{\circ}$ jaune canari.

Breithauptite (St. Andreasberg. Pyrénées)

Système rhomboédrique.

Ce minéral a été décrit plus haut (22).

Position de l'analyseur à 5° :

— 45° violet. + 45° jaune clair.

Pyrrhotine (Brésil. Sudbury, Canada. Rustenburg)

Système hexagonal.

Les extinctions sont franches mais incomplètes. Dans les positions $\pm 45^{\circ}$, les teintes sont délicates à égaliser (— 45° gris bleuté, + 45° gris rosé). Avec les nicols légèrement dérégés: — 45° gris bleu à bleu ciel, + 45° jaune ocre. Les teintes varient un peu selon l'orientation des sections.

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction, mais un minimum assez marqué.

Succession des teintes:

0° gris bleu; 2° minimum; 3° rouge violacé; 5° rose mauve.

Position de l'analyseur à 5° :

— 45° rose mauve. + 45° blanc jaunâtre.

Cubanite (Hakansboda, Suède. Rustenburg. Schlagenswald. Bohême)

Système orthorhombique.

Les extinctions sont franches et bonnes. Dans les positions $\pm 45^{\circ}$, la teinte gris bleu s'égalise aisément pour les sections à extinction droite. Pour les sections obliques: — 45° jaune clair, + 45° bleu clair. Les teintes varient peu avec l'orientation.

La rotation de l'analyseur ne rétablit pas l'extinction mais un minimum très peu accentué.

Succession des teintes:

0° gris bleu à gris jaunâtre; 2° violet foncé; 4° brun rouge brique. La nature des teintes et l'étendue de la dispersion varient avec l'orientation.

Position de l'analyseur à 5° ; teintes variables selon l'orientation:

— 45° brun cuir. + 45° gris bleuté.
— 45° violet. + 45° blanc jaunâtre.

Ces minéraux ont tous une dispersion accentuée; la rotation de l'analyseur ne rétablit pas de bonne extinction mais un minimum de luminosité, après une petite rotation. La succession des teintes est analogue pour tous, ainsi que l'étalement de la dispersion. Par

contre, la teinte qui suit le minimum d'intensité est caractéristique pour chacun. La comparaison des teintes dans les positions d'éclairement, avec l'analyseur à 5° , permet une facile différenciation de ces minéraux.

CONCLUSIONS

L'étude de la dispersion chez les minéraux métalliques anisotropes a montré, à la fois, sa complexité et ses différents aspects.

Si la dispersion, dans les positions d'extinction, varie d'un minéral à l'autre et influence, plus ou moins nettement, les teintes des positions d'éclairement maximum, la dispersion du plan de polarisation de l'onde réfléchie OP' offre des variations beaucoup plus tranchées. Le fait de pouvoir suivre, par rotation de l'analyseur, le passage graduel d'une teinte à l'autre, facilite l'estimation de la nuance et permet d'établir une série de couleurs, qui devient la caractéristique d'un minéral donné.

On pourrait se demander si les différences de teintes, consécutives aux diverses orientations des sections d'un même minéral, ne sont pas aussi importantes que celles observées d'un minéral à l'autre. Ceci ne semble pas être le cas car, généralement, la différence d'orientation agit plus sur le pouvoir réflecteur et sur l'intensité de la teinte que sur la qualité de celle-ci; même si la teinte change avec l'orientation optique, comme par exemple chez la luzonite, elle le fait en restant dans une gamme de couleurs qui est caractéristique du minéral considéré.

Les minéraux nettement anisotropes se prêtent certes mieux à l'étude de la dispersion car elle produit des effets chromatiques plus différenciés qui peuvent servir à leur détermination. Si, chez les minéraux faiblement anisotropes, les positions d'éclairement, entre nicols rigoureusement croisés, ne sont qu'à peine marquées, la rotation de l'analyseur crée néanmoins des teintes qui ne sont pas négligeables, malgré leur faible luminosité et la dispersion peu étendue.

Il a été dit plus haut combien le facteur personnel est important dans l'estimation des teintes, mais pour une détermination, la comparaison reste le procédé le plus fructueux, car il met en évidence les différences de couleurs de façon suffisamment claire pour réduire au minimum l'inconvénient des variations individuelles d'estimation.

Des yeux, peu entraînés à l'examen optique, ont bien voulu procéder à la détermination de quelques minéraux d'après les observations citées plus haut. Malgré quelques divergences dans la

description des teintes, ces minéraux ont été différenciés sans difficulté.

Certains ouvrages ont déjà donné les couleurs des minéraux entre nicols dits croisés, mais généralement ces derniers étaient légèrement décroisés pour précisément augmenter les contrastes entre les deux positions d'éclairement.

L'examen entre nicols rigoureusement croisés, pour les minéraux suffisamment anisotropes, et l'indication des teintes, produites par rotation de l'analyseur, peuvent constituer un facteur de détermination de plus, qui s'est révélé particulièrement précieux pour les petites inclusions.

Une description des effets de la dispersion peut être utilement ajoutée à la liste des propriétés des minéraux, et contribuer, pour sa part, à leur identification.

Genève, Muséum d'Histoire Naturelle.

Bibliographie

1. M. BEREK. Elementare Einführung in der Optik absorbierender Kristalle. Zentralbl. für Min. A. 1931.
2. — Optische Messmethoden im polarisierten Auflicht, insonderheit zur Bestimmung der Erzminerale, mit einer Theorie der Optik absorbierender Kristalle. Fort. d. Min., Krist. u. Petr. V. 22, 1er (1937).
3. A. CISSARZ. Optische Messungen an rhombischen absorbierenden Kristallen. Fort. d. Min., Krist. u. Petr. V. 16. 1931.
4. J. ORCEL. Les méthodes d'examen microscopique des minerais métalliques. Bull. Soc. Franç. Min. T. 48. 1925.
5. — La mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques à l'aide de la cellule photo-électrique et ses applications. Bull. Soc. Franç. Min. 1930. Livre jubilaire.
6. ED. SAMPSON. The determination of anisotropism in metallic minerals. Econ. Geol. 24. 1929.
7. H. SCHNEIDERHÖHN. Anleitung zur mikroskopischen Bestimmung und Untersuchung von Erzen und Aufbereitungsprodukten, besonders im auffallenden Licht. Berlin 1922.
8. H. SCHNEIDERHÖHN u. P. RAMDOHR. Lehrbuch der Erzmikroskopie. V. 1. 1er et V. 2. 1934.
9. F. E. WRIGHT. Polarized light in the study of ores and metals. Proc. Amer. Phil. Soc. V. 58. 1919.

Reçu le 19 mars 1947.