Zeitschrift: Archives des sciences [1948-1980]

Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève

Band: 19 (1966)

Heft: 2

Artikel: Notions essentielles théoriques et pratiques pour l'étude microscopique des minéraux opaques

Autor: Galopin, Raymond

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-739328

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: 15.07.2025

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

NOTIONS ESSENTIELLES THÉORIQUES ET PRATIQUES POUR L'ÉTUDE MICROSCOPIQUE DES MINÉRAUX OPAQUES

PAR

Raymond GALOPIN

Lorsqu'il s'agit de procéder à l'étude de l'ensemble des échantillons d'un gisement, la chimie et la physique fournissent leurs propres méthodes, parmi lesquelles un choix peut être fait selon les circonstances; d'une part, les diverses formes d'analyses qualitatives et quantitatives et, d'autre part, les diverses applications analytiques de la spectroscopie et des rayons X.

Cependant il ne suffit généralement pas de connaître les éléments présents et leurs composés mais aussi de connaître les relations entre ces derniers, c'est-à-dire s'ils ont été formés simultanément ou successivement, s'il y a eu séparation, altération et remplacement, afin de mieux saisir la genèse du gisement.

Une telle connaissance ne s'obtient que par l'étude, en lumière incidente normale, sur une surface polie des échantillons. Les minéraux seront déterminés en établissant leurs propriétés qualitatives et morphologiques, en procédant à la mesure quantitative de leurs pouvoirs réflecteurs et de leurs microduretés, et, au besoin, en contrôlant leurs compositions chimiques au moyen de méthodes microchimiques adaptées à la microscopie des corps opaques. Un examen des structures, avec les diverses formes de juxtaposition, d'exsolution, d'interpénétration, de remplacement et d'inclusions entre les minéraux, permettra de mieux comprendre le processus de minéralisation de l'ensemble. C'est dire que, malgré les grands progrès réalisés dans les méthodes analytiques chimiques et physiques, l'observation microscopique garde toute sa valeur.

Le présent article se limitera à l'examen des propriétés optiques qualitatives et morphologiques, en rappelant les principes théoriques essentiels et en donnant quelques indications utiles pour l'observation et l'interprétation des faits.

LA LUMIÈRE RÉFLÉCHIE SOUS INCIDENCE NORMALE

En passant de l'étude des minéraux transparents à celle des minéraux opaques, il apparaît que les caractères morphologiques et les phénomènes optiques ont une

grande analogie; pour ces derniers, dans les deux cas, on observe des minéraux colorés ou non, du polychroïsme, de l'isotropie, ou une anisotropie plus ou moins prononcée, des teintes de polarisation et même une frange lumineuse à la limite de deux minéraux qui émigre de l'un à l'autre lorsque la mise au point est modifiée.

En fait, ces phénomènes d'apparence si semblable ont des causes tout autres car les processus optiques de la lumière transmise et de la lumière réfléchie sont très différents.

Dans les deux cas, le minéral reçoit un rayon polarisé qu'il transmet, ou réfléchit, soit inchangé soit plus ou moins modifié selon ses propriétés, qui peuvent ainsi être établies; il est donc indispensable, pour la lumière polarisée, que l'équipement optique soit de qualité et que les lentilles soit exemptes de tension.

Pour la lumière réfléchie les conditions nécessaires sont plus rigoureuses encore car le rayon, issu du polariseur, traverse, avant d'atteindre l'œil de l'observateur, les divers éléments du microscope au risque de subir une dépolarisation et une dispersion qui peuvent être faussement attribuées aux propriétés du minéral. C'est dire que la qualité optique et le réglage du microscope a une importance primordiale, et que ce n'est pas sans danger d'erreur qu'on utilise pour la lumière réfléchie des lentilles destinées à la lumière transmise.

Il est utile, pour la compréhension des phénomènes de la lumière réfléchie et de leurs anomalies, de se rappeler l'effet de l'incidence oblique sur la lumière polarisée ou non car, en fait, ce n'est que le rayon passant par le centre de l'objectif qui atteint la surface polie sous une incidence rigoureusement normale.

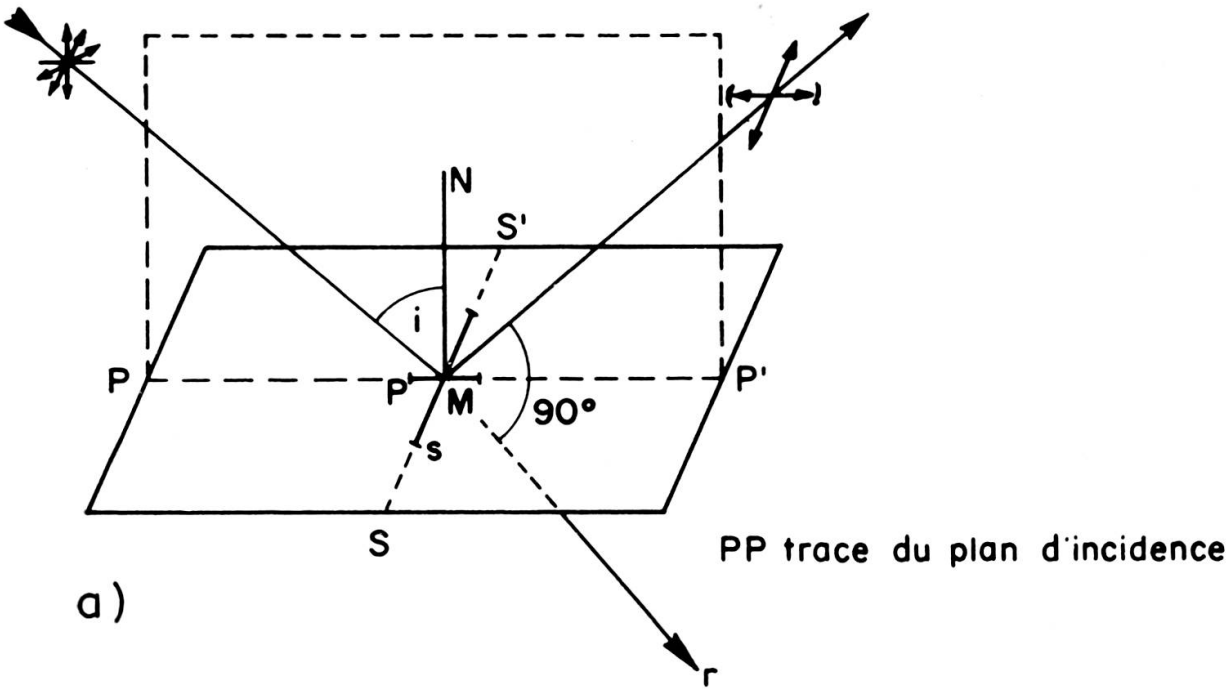
MODIFICATION DE L'ÉTAT DE POLARISATION D'UN RAYON RÉFLÉCHI SOUS INCIDENCE OBLIQUE

CAS D'UN MILIEU TRANSPARENT

Lorsqu'une surface réfléchissante d'un milieu transparent isotrope reçoit un rayon de lumière naturelle oblique ($i > 0$), elle peut réfléchir une lumière partiellement ou totalement polarisée; en revanche si la lumière est polarisée, elle peut être réfléchie plus ou moins dépolarisée.

La figure 1*a* montre la surface d'un milieu transparent isotrope sur laquelle tombe, au point M, un rayon de lumière naturelle sous un angle i d'incidence. La lumière est alors réfléchie selon deux composantes dont l'une p vibre dans le plan d'incidence dont la trace est PP', et l'autre s (senkrecht) qui vibre dans le plan perpendiculaire à celui d'incidence et dont la trace est SS'.

Cependant l'intensité lumineuse de deux composantes n'est pas la même. Comme le montre la figure 1*b*, pour une incidence normale ($i = 0$) les deux composantes ont la même intensité, qui est déterminée par le pouvoir réflecteur du milieu



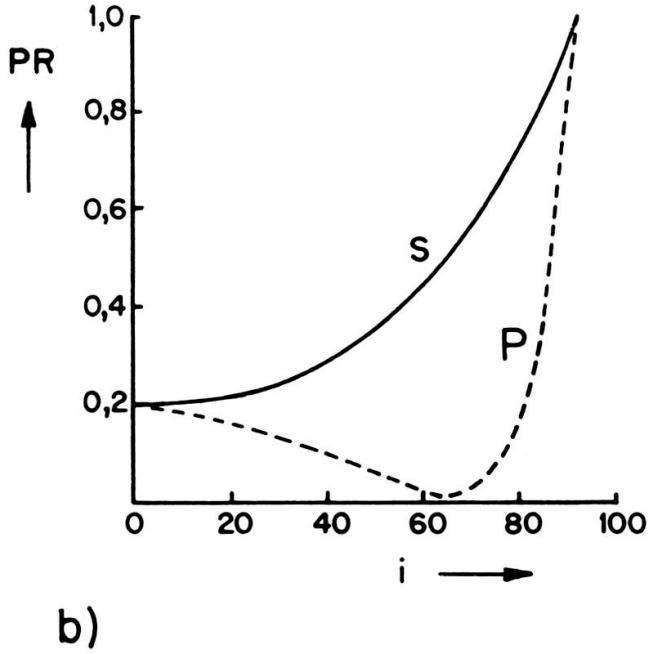


Fig. 1.

Polarisation par réflexion de la lumière naturelle.

a) La lumière se partage en deux composantes *s* et *p*; cette dernière n'est plus réfléchie lorsque l'angle entre le rayon réfléchi et celui réfracté est de 90° (angle de Brewster);

b) Pouvoir réflecteur des composantes *s* et *p*, selon l'angle *i* d'incidence (selon Berek).

(voir plus loin). Mais lorsque l'angle d'incidence *i* augmente progressivement, l'intensité lumineuse de la composante *s* augmente rapidement alors que celle de la composante *p* diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle soit nulle, pour augmenter ensuite et égaler l'intensité de la composante *s* sous une incidence rasante proche de 90°.

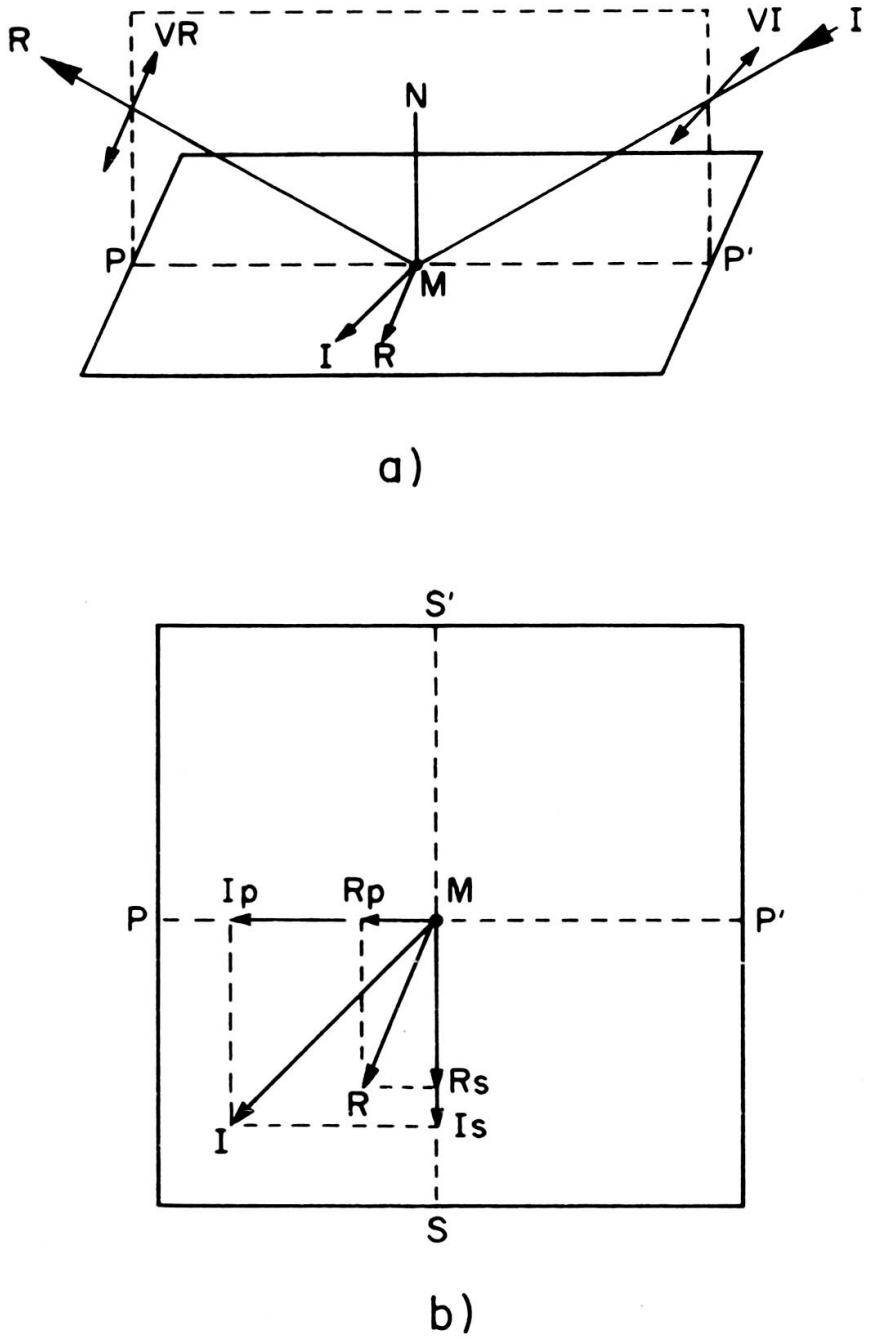


Fig. 2.

a) Réflexion d'un rayon incident polarisé dont la vibration est oblique par rapport au plan d'incidence.

b) Mécanisme de la rotation, par réflection, de la vibration incidente *MI*.

L'angle d'incidence qui amène la composante p à l'intensité nulle s'appelle « angle de Brewster », et dépend de l'indice de réfraction n du milieu, selon la relation tg. $i = n$. Cet angle correspond au moment où l'angle d'incidence i est tel que le rayon réfléchi fait avec le rayon réfracté un angle de 90°. La lumière réfléchie est alors entièrement polarisée selon la composante s.

Cas de la lumière incidente polarisée

Si la lumière incidente est polarisée et que sa vibration est orientée parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence, la lumière réfléchie par la surface, respectivement selon la composante p ou s, ne sera pas modifiée et sera arrêtée par l'analyseur en position croisée vis-à-vis du polariseur.

En revanche, si la vibration du rayon incident fait un angle quelconque avec le plan d'incidence (fig. 2), le rayon se partage en deux composantes I_p et I_s qui se réfléchissent selon les deux composantes R_p et R_s; celles-ci n'ont pas la même intensité et n'ont donc pas même amplitude, et elles se résolvent en une résultante R, qui est le rayon réfléchi, dont la direction de vibration a tourné d'un certain angle par rapport à celle du rayon incident I, et qui de ce fait ne sera pas arrêté par l'analyseur. Ceci montre, qu'en certaines conditions, une surface réfléchissante isotrope peut, sous incidence oblique, modifier par réflection l'état de polarisation de la lumière.

Cas d'un faisceau de lumière convergente

Considérons le cas où le simple rayon incident est remplacé par un faisceau de lumière convergente dont l'axe est constitué par la normale à la surface réfléchissante. On utilise pour cela un microscope pour la lumière incidente normale avec un objectif à court foyer; la lumière est polarisée au moyen d'un polariseur dont le plan de vibration est parallèle à un des réticules *EW* ou *NS* de l'oculaire.

Lors de l'incidence sur la surface, les rayons du faisceau dont le plan d'incidence est parallèle ou perpendiculaire à leur plan de vibration n'auront pas leur état de polarisation modifié et seront arrêtés par l'analyseur croisé, ce qui est le cas des rayons d'orientation *EW* et *NS* (fig. 3).

En revanche, les rayons dont les points d'incidence se trouvent dans les quatre cadrans ont des plans de vibration et d'incidence non parallèles et auront leur état de polarisation modifié par légère rotation de leur plan de vibration; ils ne seront ainsi pas arrêtés par l'analyseur.

En utilisant la lentille de Bertrand, ou en retirant l'oculaire, le champ visuel apparaît lumineux, avec une croix noire formée par les rayons d'orientation *EW* et *NS*, arrêtés par l'analyseur.

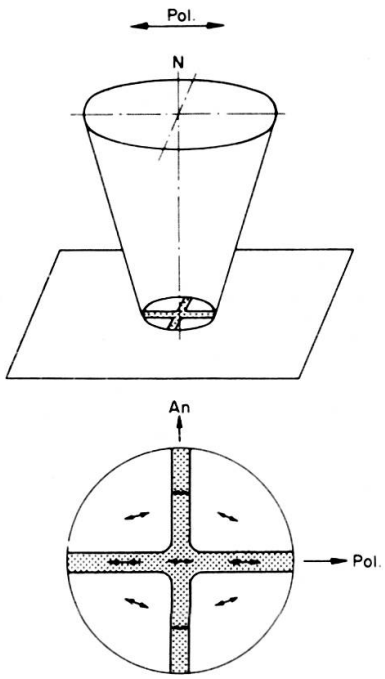


Fig. 3.
Effet d'un faisceau de lumière convergente polarisée sur un milieu isotrope.

LE MICROSCOPE A LUMIÈRE INCIDENTE NORMALE

Les éléments de l'équipement optique pour l'étude, en lumière réfléchie, des minéraux opaques sont représentés schématiquement à la figure 4.

Le faisceau lumineux, issu de la source *S*, traverse une lentille collimatrice *C* qui précède le diaphragme d'ouverture *Do*, permettant d'éliminer les rayons périphériques trop convergents de celle-ci; la lumière traverse ensuite le polariseur *P*, qui précède le diaphragme de champ *Dc*, puis atteint l'illuminateur *R* (prisme ou lamelle) sur lequel elle est réfléchie, à travers l'objectif *Ob*, sur la surface polie S_p. Cette dernière renvoie le faisceau lumineux qui traverse à nouveau l'objectif *Ob*, puis passe à travers la lamelle ou derrière le prisme de l'illuminateur, et passe par l'analyseur *A* et l'oculaire *Oc* pour arriver à l'œil de l'observateur.

Considérons quelques points importants concernant les diverses parties de cet équipement:

La source lumineuse

Celle-ci doit être beaucoup plus puissante que celle utilisée pour l'étude des coupes minces, car il y a plusieurs causes de pertes importantes de lumière. Lorsque l'illuminateur est un prisme, la moitié de la lumière provenant de la source est

utilisée, puisque le prisme n'occupe que la moitié du champ et de la section du microscope afin de permettre à la lumière réfléchie par la préparation de passer derrière lui en direction de l'oculaire. La perte est encore plus considérable lorsque l'illumina-

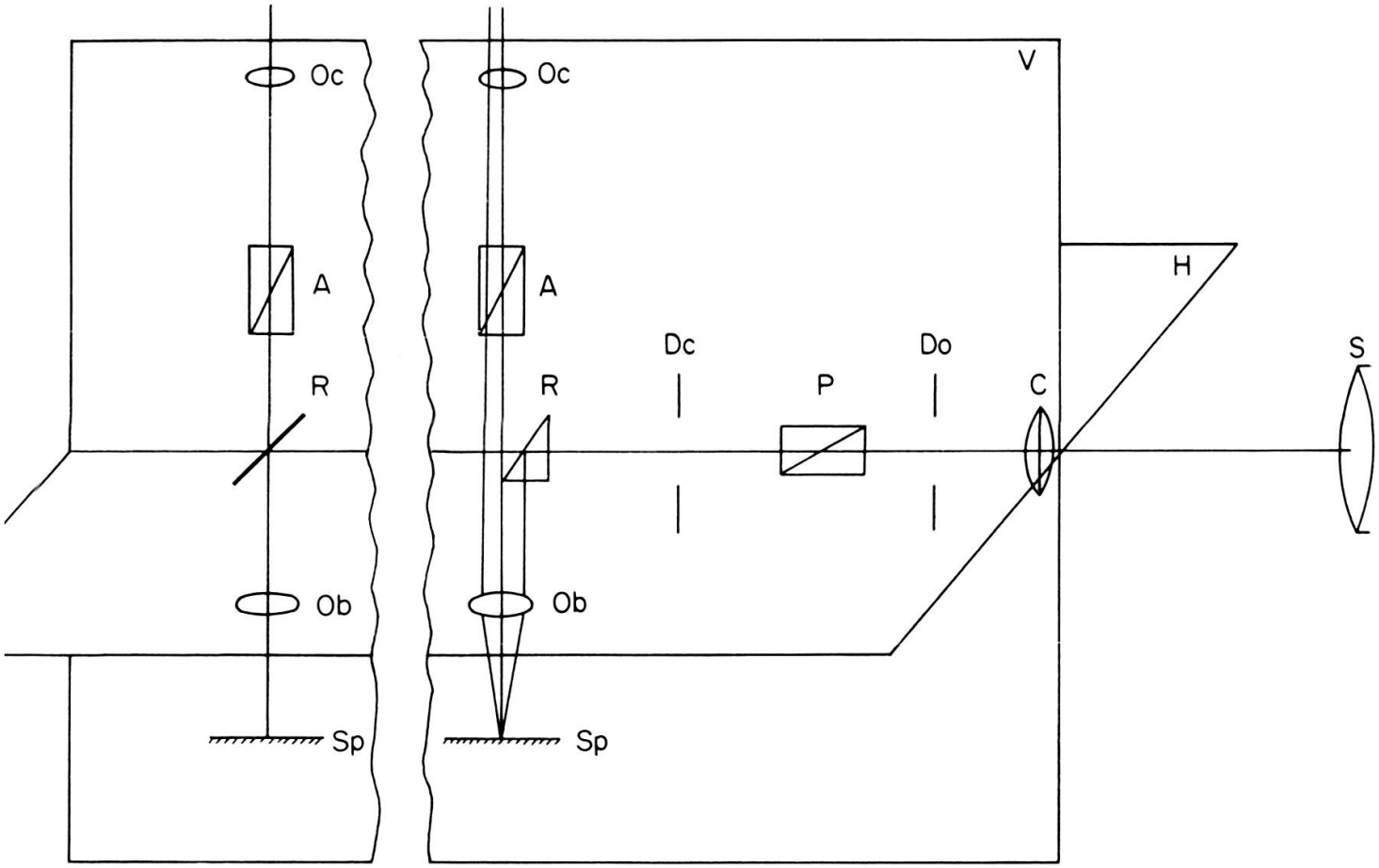


Fig. 4.
Schéma de l'équipement optique, avec un prisme ou une lamelle comme illuminateur.

teur est une lamelle de verre, car une partie de la lumière, venant du polariseur, la traverse et, au retour de la lumière réfléchie par la surface, est partiellement renvoyée en direction de la source.

A cela s'ajoutent les pertes inhérentes à la traversée des polars, et celles, bien entendu, produites par l'absorption des minéraux étudiés qui, pour la plupart, ne réfléchissent que de 20 à 50 % de la lumière reçue.

Durant l'observation microscopique, l'intensité de la lumière est constamment modifiée selon les besoins et il est nécessaire que la source soit munie d'une résistance réglable. Entre les polars croisés la lumière doit être parfois d'une grande intensité, et il faut toujours prendre garde de la diminuer avant de retirer l'analyseur ou alors d'introduire un filtre protecteur. La source est parfois indépendante du tube du microscope et est réglée face à l'ouverture de l'illuminateur; la mise au point se fait

alors au moyen de la crémaillère de la platine du microscope. Si la source est solidaire du tube du microscope, la mise au point se fait avec la crémaillère de celui-ci.

L'ILLUMINATEUR

L'illuminateur est la partie la plus délicate de tout l'équipement optique, car le faisceau lumineux qui se réfléchit sur lui, en direction de la surface polie, peut être en partie dépolarisé, et produire des anomalies qui sont attribuées faussement au minéral étudié.

Le plan d'incidence de la lumière sur l'illuminateur est parallèle au réticule *NS* de l'oculaire; si la vibration du polariseur est orientée rigoureusement dans ce plan, ou dans le plan perpendiculaire *EW*, les rayons polarisés compris dans le plan d'incidence seront réfléchis polarisés et seront arrêtés par l'analyseur: le diamètre *NS* du champ visuel montre alors une zone noire d'extinction. Mais les rayons, au fur et à mesure qu'ils se situent plus loin, de part et d'autre, de ce diamètre *NS*, subiront une légère et croissante dépolarisation, due à une inclinaison de leur plan d'incidence par le fait de la petite convergence du faisceau lumineux.

Un minéral isotrope, observé entre polars croisés, ne sera pas complètement obscur mais présentera une frange noire (frange de Capdecomme) qui va s'éclaircissant de part et d'autre du diamètre *NS*.

Ce processus de dépolarisation, sur lequel nous ne pouvons nous étendre ici, a été décrit et interprété par Berek (1927) et par Capdecomme et Orcel (1941).

Retenons seulement que ces rayons dépolarisés vibrent selon une ellipse très allongée et dont l'axe principal fait un petit angle avec le plan d'incidence *NS*. Le degré de dépolarisation dépend de la grandeur de l'angle d'incidence et de l'indice de réfraction du milieu constituant l'illuminateur; cette dépolarisation est causée par la différence d'amplitude, et de phase, entre les composantes p et s produites par réflexion (fig. 2).

De nombreux essais ont été faits pour atténuer la dépolarisation par réflexion sur le prisme et la lamelle des illuminateurs, et, sans entrer dans les détails, nous citerons ceux en usage actuellement.

Pour améliorar la qualité du prisme, Berek utilise le mal comme remède; pour un verre d'indice $n = \sqrt{3}$ une réflexion produit, sous une incidence de 45°, une différence de phase de 60° entre les composantes p et s, différence qui varie peu entre 40° et 50° d'incidence. Berek construit alors un prisme (fig. 5*a*) dans lequel la lumière est réfléchie à trois reprises qui produit ainsi entre les deux composantes une différence de phase de 180°, rétablissant de ce fait une lumière rectilignement polarisée.

La qualité de transmission de la lumière par la lamelle de verre a été grandement améliorée par Hallimond (1953) qui procède au traitement de la surface de la lamelle et qui, dans le tube du microscope, l'encadre par une lentille biconvexe, entre l'illu-

minateur et l'objectif, et une lentille biconcave, entre l'illuminateur et l'analyseur, afin de rendre le faisceau lumineux plus parallèle.

F. H. Smith (1964), dans un dispositif où il associe un miroir à la lamelle traitée (fig. 5*b*) abaisse à 22° 30′ l'angle d'incidence de la lumière sur cette dernière. Comme

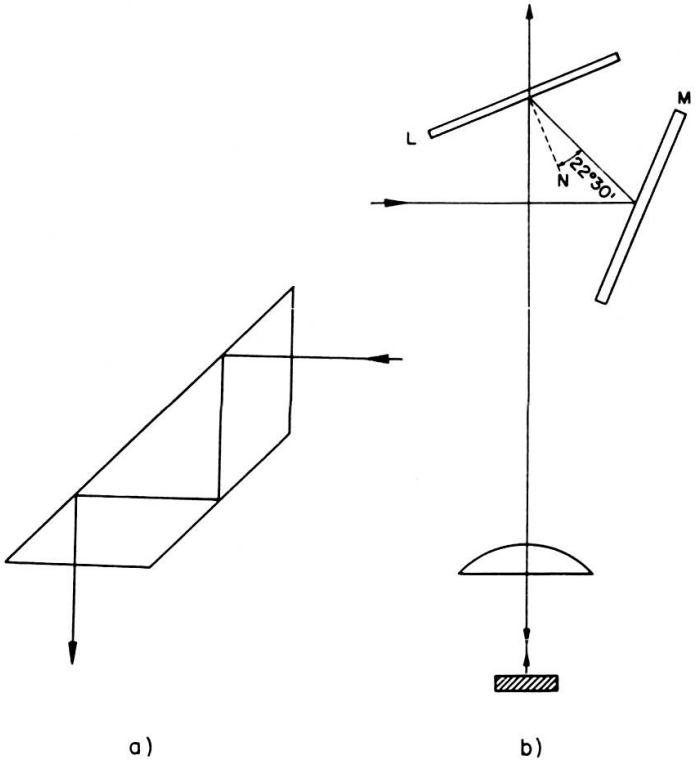


Fig. 5.
a) Prisme de Berek.
b) Illuminateur de Smith, avec miroir *M* et lamelle *L*.

la différence d'intensité est très petite au voisinage de l'incidence normale, en diminuant l'angle d'incidence à 22° 30′ on réduit au minimum la cause de la dépolarisation, et le champ visuel est pratiquement obscur entre les polars croisés.

Réglage de l'appareillage optique

Lorsque la source lumineuse est fixée au microscope, le réglage de l'appareillage est acquis par construction. Il n'est cependant pas superflu de rappeler les principes d'un réglage rigoureux dont dépend la qualité de la lumière réfléchie et l'exactitude des observations.

L'important est d'éviter l'obliquité du faisceau lumineux lors de son entrée dans le microscope par la lentille collimatrice et le diaphragme d'ouverture (fig. 4). Le faisceau lumineux, sortant de la lampe, doit être horizontal et parallèle à une ligne idéale passant par le centre de la lentille collimatrice, des diaphragmes et du polari-

seur; il atteindra ainsi l'illuminateur, dont la surface réfléchissante a sa normale orientée de façon à être, avec le rayon incident et réfléchi, dans un plan vertical contenant aussi l'axe du tube du microscope.

Ainsi il n'y a pas d'obliquité latérale ni longitudinale du rayon lumineux et la surface polie, qui doit être bien horizontale, recevra et réfléchira normalement la lumière en bon état de polarisation.

Quant au polariseur, il doit être orienté de façon à ce que sa vibration soit rigoureusement parallèle ou perpendiculaire au plan d'incidence de la lumière sur l'illuminateur, le plus petit angle pouvant produire les composantes s et p, cause de dépolarisation. Si l'illuminateur est une lamelle, dont le pouvoir réfléchissant est faible, la vibration du polariseur doit être orienté perpendiculairement au plan d'incidence, soit EW, car on sait que la composante s est plus lumineuse. Lorsque l'illuminateur est un prisme, sur lequel la lumière est réfléchie pratiquement sans perte, l'orientation du polariseur a moins d'importance, et elle est généralement NS, comme dans les microscopes de pétrographie. Insistons encore sur l'importance d'avoir un objectif absolument exempt de tension.

BASES THÉORIQUES DE LA LUMIÈRE RÉFLÉCHIE SOUS INCIDENCE NORMALE

Définition du milieu opaque

La lumière réfléchie, par un milieu opaque en surface polie, est influencée par l'indice de réfraction n et l'indice d'absorption κ, et la quantité de lumière réfléchie est dite *pouvoir réflecteur* du milieu.

Nous étudierons plus loin, et avec plus de détails, les rapports entre ces trois importantes constantes du milieu; il suffit de dire ici que le pouvoir réflecteur R est le rapport de l'intensité de la lumière réfléchie à celle de la lumière incidente, ou le rapport du carré de leur amplitude.

$$R = \frac{Ir}{Ii} = \frac{Ar^2}{Ai^2}$$ et que R dépend de n et κ selon la relation

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} + \frac{n^2\kappa^2}{n^2\kappa^2} \leqq 1 .$$

Le milieu parfaitement transparent n'a pas d'absorption ($\kappa = 0$), et son pouvoir réflecteur s'exprime par le premier membre de la relation. En revanche pour un milieu parfaitement opaque, l'indice κ prend toute son importance, et l'indice n diminue et n'a plus guère d'influence; R tend alors vers l'unité, c'est-à-dire vers la réflexion de toute la lumière incidente.

En considérant une série de milieux de plus en plus opaques, on voit diminuer la valeur de n et augmenter celle de κ, et de conclure que, théoriquement, il n'y a pas de limite définie entre les milieux transparents et les opaques. Cette limite a été pratiquement établie, en pétrographie, en considérant comme opaques les minéraux qui, en coupes minces, ne laissent pas passer assez de lumière pour être déterminables.

L'INFLUENCE DE L'INDICE κ SUR LE PROCESSUS DE LA LUMIÈRE RÉFLÉCHIE

La présence de l'indice κ entraîne dans le processus optique de la lumière réfléchie une complication qui peut être, selon Berek (1934), schématiquement représentée.

Il faut se rappeler que l'incidence des rayons n'est jamais rigoureusement normale, grâce à la convergence de l'objectif, si ce n'est pour celui passant par son centre. Sachons, d'autre part, que l'indice d'absorption agit tout au long du parcours du rayon lumineux dans le milieu, et pas à la manière de l'indice de réfraction qui en modifie la vitesse dès son entrée dans le milieu. La lumière, avant d'être réfléchie par le milieu, le pénètre plus ou moins profondément et subit l'action de l'absorption durant le parcours aller et retour.

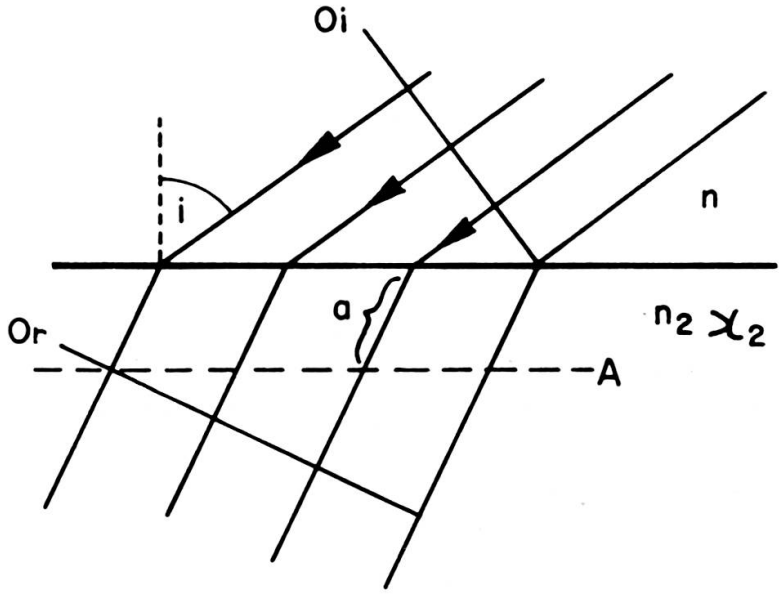


Fig. 6.
Onde inhomogène dans un milieu absorbant (d'après Berek).

Soit une onde plane *Oi* arrivant, sous un angle *i*, sur un milieu absorbant (fig. 6). En pénétrant elle se réfracte et donne l'onde plane *Or*, dont les rayons qui la composent sont restés en concordance de phases, puisque la diminution de vitesse se manifeste par une diminution de la longueur d'onde et non de la fréquence. Cependant les chemins parcourus par les rayons de l'onde *Or* ne sont pas les mêmes, et

l'absorption diminuera progressivement leur amplitude du rayon 1 au rayon 4. L'onde plane A, en revanche, groupe les rayons de même amplitude, puisqu'ils ont parcouru le même chemin a dans le milieu. On peut conclure de ces faits qu'un milieu absorbant réfracte puis réfléchit une *onde inhomogène* dans laquelle l'onde d'égales phases n'est pas confondue avec celles d'égales amplitudes.

Drude a étudié mathématiquement cet état complexe de la lumière et a pu utiliser les relations de la lumière transmise en remplaçant l'indice de réfraction n par une valeur complexe et imaginaire $n' = n(1 - \sqrt{-1}\,\kappa)$. Il établit, pour comprendre le processus optique dans un milieu absorbant, une combinaison de deux surfaces, celle des indices n et celle des indices κ, qui ne sont pas des ellipsoïdes,

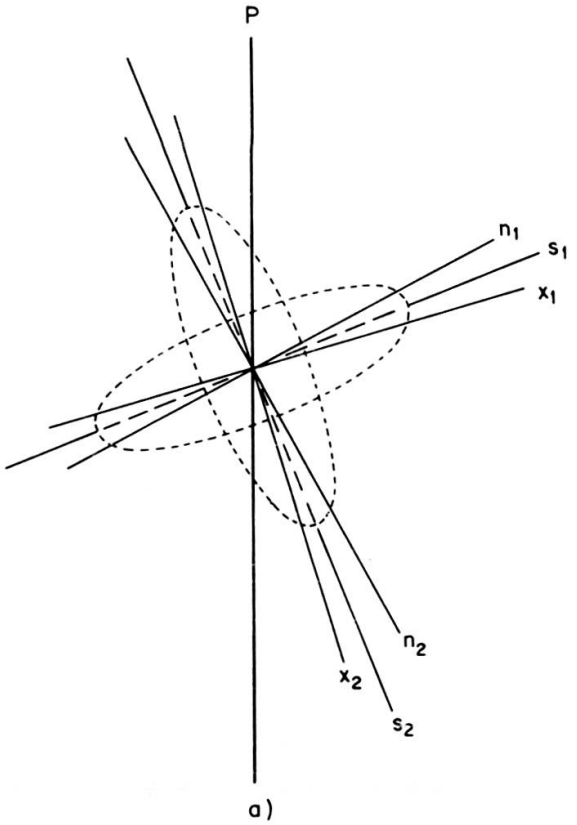


Fig. 7.

Schéma de l'ellipticité des rayons réfléchis, selon les indices n et κ, dans les sections de cristaux biaxes, non perpendiculaires à un plan de symétrie (ellipticité très exagérée).

comme en lumière transmise, mais des ovaloïdes irréguliers. Ces deux surfaces sont intimement liées et ne peuvent être considérées séparément; de plus ce sont des surfaces d'ordre supérieur qui ne peuvent être représentées graphiquement: elles sont dites *indicatrices complexes* et n'ont qu'un usage mathématique.

Il est cependant possible de se représenter la complexité des phénomènes au moyen de dessins purement graphiques, indiquant la position des indices n et κ dans le cristal, figures appelées *surfaces indicatrices*, mais qui n'ont pas la valeur réelle de celle intéressant la lumière transmise.

Ce qui importe ici, pour la compréhension de certaines observations pratiques, est de situer l'orientation des indices n et κ dans les cristaux des divers systèmes.

Dans le *système cubique* les deux indicatrices sont des sphères à centre commun, où dans toutes les orientations des sections les indices n et κ se superposent.

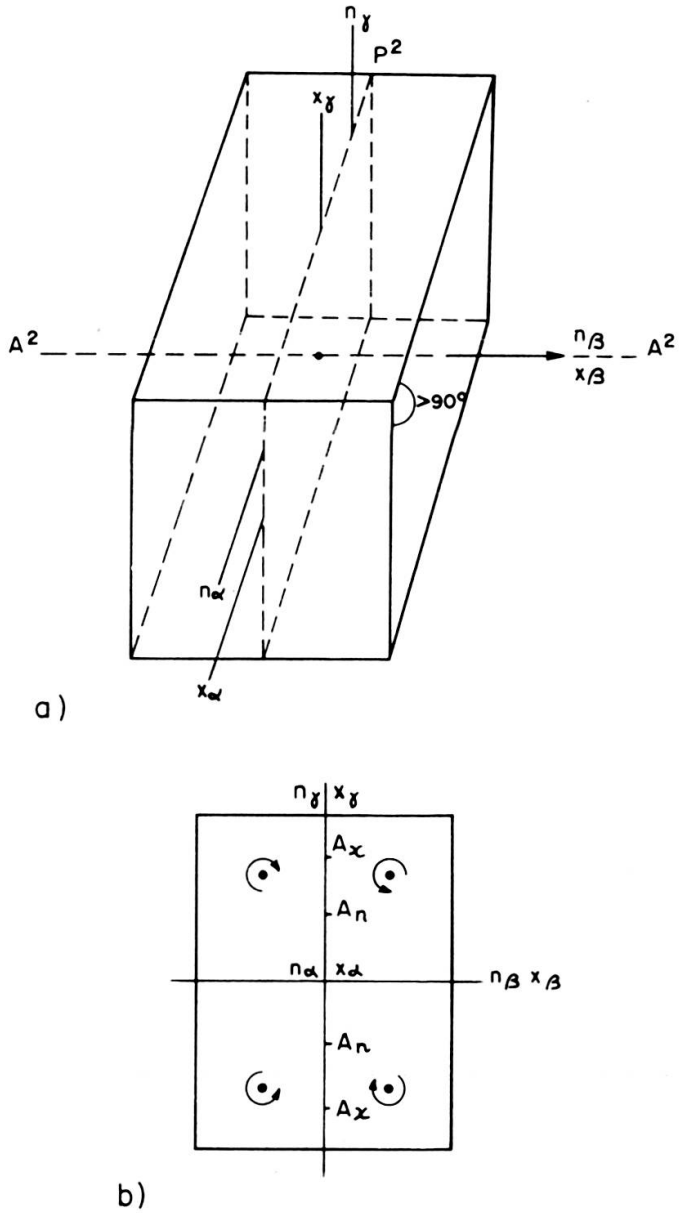


Fig. 8.

a) Positions des indices n et κ dans un cristal monoclinique.
b) Position des quatre axes de rotation dans un cristal orthorhombique.

Dans les *systèmes quadratique et hexagonal* (cristaux uniaxes), les indices $n_\alpha \kappa_\alpha$ et $n_\gamma \kappa_\gamma$ ont leur orientation fixée par les axes de symétrie du cristal, et dans toutes les sections les indices n et κ se superposent.

Dans le *système orthorhombique* les indices $n_\alpha\, n_\beta\, n_\gamma$ et $\kappa_\alpha\, \kappa_\beta\, \kappa_\gamma$ sont fixés par les trois axes de symétrie binaire du cristal. Dans les sections perpendiculaires aux

trois plans de symétrie binaire les indices n et κ se superposent, mais cela peut en plus être le cas pour les sections obliques où, vu la complexité des surfaces ovaloïdes, les indices n et κ forment entre eux un certain angle (fig. 7).

Dans le *système monoclinique* un des trois indices de n et de κ sont fixés par l'axe de symétrie binaire, alors que les deux autres sont dans une position quelconque dans le plan de symétrie binaire (fig. 8*a*). Seules les sections perpendiculaires au plan de symétrie auront leurs indices n et κ parallèles deux à deux ($n_1\ \kappa_1$ et $n_2\ \kappa_2$), selon le plan de symétrie et l'axe de symétrie perpendiculaire. Dans toutes les autres sections du cristal les indices n et κ feront un angle.

Dans le *système triclinique* les surfaces ne sont liées que par le centre commun et se situent indépendamment l'une de l'autre dans le cristal. A part certaines sections d'orientation particulière, elles auront des indices n et κ qui feront entre eux un certain angle.

Axes optiques

Les cristaux uniaxes ont, comme les minéraux transparents, une direction de monoréfringence parallèle à l'axe de plus grande symétrie.

Pour les minéraux biaxes le cas est plus compliqué. Dans le plan de symétrie perpendiculaire aux indices n_β et κ_β, dans un cristal orthorhombique, se trouvent, pour la surface des indices n, deux axes optiques An et, pour la surface des indices κ, deux axes optiques $A\kappa$. Mais les deux axes An n'ont pas un même κ, et les deux axes $A\kappa$ n'ont pas le même n. De part et d'autre du plan de symétrie se trouvent quatre directions de propagation de la lumière ayant même n et même κ: ce sont les axes de rotation (Windungsachsen de Cissarz) qui sont circulairement polarisés (fig. 8*b*).

L'OBSERVATION MICROSCOPIQUE

A ses débuts l'observation d'une surface polie n'est pas aisée car, mises à part les mesures quantitatives du pouvoir réflecteur et de la microdureté, ce sont surtout des estimations qualitatives des propriétés qu'il s'agit d'établir; pour cela la comparaison joue un grand rôle et ne gagne en précision qu'avec l'éducation de l'œil, acquise par la pratique. Certains caractères, surtout optiques, qui échappent au débutant deviennent facilement discernables par l'observateur expérimenté, chez lequel la capacité de comparer et d'estimer s'est développée.

En abordant l'étude d'une préparation, sans faire usage de l'analyseur, on procède au dénombrement des minéraux qui la constituent, et cela sans penser déjà à leur détermination, mais simplement en considérant les caractères qui les distinguent. Un examen préalable à la loupe de la surface polie est souvent très profitable avant de passer à l'emploi du microscope.

La distinction entre les minéraux se fait par l'observation des propriétés suivantes: la couleur, la dureté, l'anisotropie (nulle à forte), l'éclat (pouvoir réflecteur) et les caractères morphologiques. Le présent chapitre va procéder à l'étude de ces diverses propriétés, au point de vue théorique et pratique, et dans un ordre qui n'est pas forcément celui à adopter pour l'ordre des observations au cours d'une détermination.

La couleur

La lumière blanche incidente est réfléchie, plus ou moins colorée, par certains minéraux; ce fait est dû à la dispersion du pouvoir réflecteur (*PR*) du minéral dont la valeur est différente pour les diverses radiations. La couleur du minéral est produite par la teinte dominante de la radiation qui a le plus grand pouvoir réflecteur.

Il est reconnu que la dispersion du *PR* est surtout une conséquence de la dispersion de l'indice de réfraction n, et que celle-ci s'accentue au voisinage des bandes d'absorption. Ce seront donc les minéraux chez lesquels le *PR* est influencé par les indices n et κ qui verront ce dernier le plus dispersé et qui, de ce fait, seront le plus nettement colorés; la valeur de leur *PR* sera plutôt moyenne (R = de 20% à 50%). Pour les minéraux transparents à translucides, à faible *PR*, l'indice d'absorption κ est très petit à nul et celui de réfraction n n'est que peu ou pas dispersé; ces minéraux sont fort peu colorés (gris bleuté, gris jaunâtre...). Enfin chez les minéraux très absorbants (opaques) le *PR* est très élevé; celui-ci n'est plus guère influencé par l'indice de réfraction n mais surtout par l'indice d'absorption κ qui est toujours très peu dispersé. Les minéraux à fort *PR* sont donc peu colorés (blanc verdâtre, blanc rosé...). Cependant les exceptions ne sont pas rares, telles que l'or, nettement jaune et à fort *PR*, et l'umangite, nettement rouge violacé et à faible *PR*.

Estimer si un minéral n'est pas ou que peu coloré, et s'il est peu ou nettement coloré, n'est pas toujours facile, mais cela est utile pour l'usage des tables de détermination. Délicate aussi est la définition de la couleur car celle-ci est souvent la résultante de plusieurs radiations monochromatiques dont une ou plusieurs sont dominantes. La pyrrhotine, pourtant bien nettement colorée, a été définie, suivant les auteurs, comme crème, brun crème, bronze clair ou jaune rouge clair.

La teinte d'un minéral peut aussi varier en apparence suivant celle du minéral associé. Ainsi la chalcopyrite, dont la couleur jaune est si reconnaissable, apparaît jaune clair au contact de la blende, et jaune verdâtre terne à côté de l'or. L'arsénopyrite paraît blanche au contact de la cobaltine un peu rosée, mais jaune clair au voisinage de la safflorite incolore.

L'éducation de l'œil, par la pratique, a raison de ces difficultés, ainsi que la familiarisation avec l'aspect des minéraux les plus courants, qui servent alors de termes de comparaison pour la détermination de ceux moins communs.

La dureté

L'établissement du degré de dureté du minéral est aussi utile pour l'emploi des tables de détermination. Sa mesure quantitative au moyen du microdurimètre n'a pas supprimé l'intérêt de son estimation relative dans l'étude microscopique d'une surface polie.

La dureté relative des minéraux s'observe sous trois aspects: par la résistance à l'arrachement (Ritzhärte) qui est la faculté plus ou moins grande à être rayé; par la résistance à l'usure (Schleifhärte) qui est la faculté plus ou moins grande à être poli; par la résistance à la rupture qui est la plus ou moins grande facilité de pénétration et d'effet de l'aiguille du microdurimètre. Ce troisième aspect, intéressant la dureté, ne sera pas traité ici.

C'est au cours du polissage de l'échantillon que les différences de dureté des minéraux se manifestent par les qualités inégales du poli. Ainsi parmi les minéraux en présence, qui ont subi le même traitement, les uns seront parfaitement polis alors que les autres conserveront une surface rugueuse ou terne et des raies de polissage. C'est cette constatation qui permet d'établir une dureté relative entre les minéraux.

Mettons que le minéral *A* est plus dur que le minéral *B*. Deux cas peuvent se présenter: le minéral *A* est exempt de raies de polissage alors que le minéral *B* en conserve de nombreuses, fines et entrecroisées, laissées par le dernier poli; ou alors c'est le minéral *B* qui est bien poli et le minéral *A* qui conserve des raies assez larges, interrompues ou en pointillés, laissées par une opération précédente de polissage. Ajoutons encore que, lors du dernier poli, un petit éclat d'un minéral se détache parfois et fait sur le minéral *A* une fine raie qui se prolonge, large et profonde, dans le minéral *B*.

La différence de résistance à l'arrachement produit entre les minéraux une différence de niveau. Par rapport à un minéral de dureté moyenne, le minéral dur reste en relief et le minéral mou est surcreusé; à leur contact une mince bande de matière est inclinée vers le minéral le plus mou et la lumière, réfléchie sur ce plan incliné, se propage dans la direction de la dépression du minéral mou. En diaphragmant, ou en utilisant un objectif un peu convergent, on remarque au contact de deux minéraux de dureté différente une frange lumineuse, semblable à la frange de Becke qui, lorsqu'on éloigne la préparation de l'objectif, émigre dans la direction du minéral mou; c'est la frange de Kalb.

Quant à la résistance à l'usure des minéraux, elle déterminera la qualité du poli, c'est-à-dire non seulement la persistance de raies plus ou moins nombreuses mais aussi celle de petits trous, fendillements, pointements et granulosités. Il n'y a pas parallélisme entre ces deux natures de dureté, car deux minéraux de même dureté au trait peuvent avoir une qualité de poli très inégale.

Généralement cependant, les minéraux mi-durs (entre 2,5 et 5 de l'échelle de Mohs) se polissent bien; parmi les minéraux mous (dureté inférieure à 2,5), un bon

poli s'obtient sur la bismuthine, la stibine et la covelline, mais non sur l'argentite, la molybdénite et le graphite; parmi les minéraux durs (plus durs que 5), le polissage est de bonne qualité pour la magnétite, la marcasite et la skuterrudite mais est difficile, et reste souvent imparfait, pour la pyrite, la cobaltine et l'arsénopyrite. La qualité du poli peut être donc un caractère spécifique et distinctif des minéraux qui ont subi, dans une même préparation, une action identique de polissage.

Le perfectionnement des méthodes de polissage en vue d'obtenir des surfaces aussi parfaites que possible, pour la mesure quantitative du pouvoir réflecteur, n'est pas favorable à l'observation des reliefs et des défauts du poli. On peut alors repolir la préparation, sur drap, avec un abrasif pas trop fin, pour altérer légèrement la qualité du poli dans le sens désiré.

Quelques principes ont été établis pour classer, dans les tables de détermination, les minéraux selon leur dureté relative. Short (1940) considère comme mou le minéral facilement rayé avec une pointe d'acier, et comme dur celui qui ne l'est pas ou que difficilement. Schneiderhöhn et Ramdhor classent dans les minéraux mous ceux qui ont une dureté égale ou inférieure à la galène, parmi les mi-durs ceux dont la dureté est entre celle de la galène et de la pyrrhotine, et parmi les durs les minéraux dont la dureté dépasse celle de la pyrrhotine. En connaissant la dureté des minéraux les plus communs, et qu'on rencontre fréquemment dans les surfaces étudiées, il est aisé, par comparaison, d'établir avec assez de précision la dureté du minéral inconnu.

LA RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE SOUS INCIDENCE NORMALE

PROCESSUS ET OBSERVATIONS

LE POUVOIR RÉFLECTEUR ET LES FACTEURS DONT IL DÉPEND.

Le pouvoir réflecteur s'exprime pour la formule

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{A_r^2}{A_o^2} \leqq 1$$

où A_o est l'amplitude du rayon incident d'intensité I_o et A_r l'amplitude du rayon réfléchi d'intensité I_r.

L'intensité d'un rayon réfléchi par rapport à celle d'un rayon incident s'exprime par la formule

$$I_r = I_0 e^{-\alpha d}$$

où α est le module d'absorption, d est le parcours du rayon dans le milieu.

Durant le parcours, aller et retour, dans le milieu du rayon, avant sa réflexion, le facteur α agit constamment sur lui dans le sens d'une diminution de son amplitude, donc de son intensité. Examinons cette action durant ce parcours.

On nomme *indice d'absorption* κ du milieu le facteur d'abaissement de l'amplitude durant l'unité de phase.

L'absorption durant une période est donc $e^{-2\pi\kappa}$, puisqu'ici l'unité de phase est une période de la vibration lumineuse.

La progression d'une période est donnée par la longueur d'onde λ de la lumière dans le milieu; ainsi λ devient l'échelle de mesure pour la distance d.

L'absorption durant l'unité de mesure, qui est l'ångström, s'exprime par

$$e^{-\frac{2\pi\kappa}{\lambda}}$$

Mais λ n'est pas connu mais bien l'λ_o de la lumière incidente employée, qui se transforme en λ_o dans le milieu d'indice de réfraction n. Rappelons que l'indice de réfraction d'un milieu est le rapport de la vitesse de la lumière dans l'air à celle dans ce milieu, d'où

$$n = \frac{V\,air}{V\,milieu} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

En remplaçant dans la formule précédente λ par $\frac{\lambda_o}{n}$, on exprime l'absorption pour l'unité de mesure dans un milieu d'indice n et κ.

$$e^{-\frac{2\pi n\kappa}{\lambda_o}}$$

L'absorption durant le chemin parcouru dans le milieu par le rayon lumineux, avant sa réflexion, s'exprime par

$$e^{-\frac{2\pi n\kappa d}{\lambda_o}}$$

d'où l'intensité du rayon réfléchi

$$I_r = I_0\, e^{-\frac{2\pi n\kappa d}{\lambda_o}}$$

formule dans laquelle $n\kappa$ peut être remplacé par k, appelé *coefficient d'absorption.*

Ainsi la valeur du pouvoir réflecteur d'un milieu est influencé par les indices n et κ de celui-ci, ainsi que par la longueur d'onde de la lumière utilisée et la distance parcourue par celle-ci dans le milieu.

Réflexion sur un minéral isotrope transparent.

La nature de la lumière n'est pas modifiée par la réflexion, et les lumières naturelle et polarisée sont réfléchies respectivement naturelle et polarisée. Le pouvoir réflecteur R s'exprime par la formule de Fresnel

$$R = \frac{(n-N)^2}{(n+N)^2} \leqq 1$$

où n est l'indice de réfraction du minéral et N celui du milieu; si ce dernier est l'air N = 1 d'où

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

ainsi pour le quartz, d'indice $n = 1{,}54$

$$R = \frac{(1{,}54-1)^2}{(1{,}54+1)^2} = \frac{(0{,}54)^2}{(2{,}54)^2} = \frac{0{,}2916}{6{,}4516} = 0{,}045 \text{ soit } 4{,}5\%.$$

Considérons le pouvoir réflecteur de la blende dans divers milieux N

	N	R
Air	1	16,5%
Eau	1,33	7,8%
Huile de cèdre	1,57	4,9%
Monobromnaphtaline	1,66	3%

Lorsque $N = n$, le R est à 0%, ce qui est un moyen de déterminer l'indice n du minéral, lorsqu'on connaît l'indice N du milieu dans lequel le minéral ne réfléchit plus de lumière.

Examinons la variation de R pour diverses valeurs de N et n

air (N=1)	mineral	huile (N=1,5)
25%	$n = 3$	11%
18%	$n = 2{,}5$	6%
4%	$n = 1{,}5$	0%

F. E. Wright (1919) a étudié la variation de R pour des valeurs de $n = 0$ à 10. Les valeurs inférieures à 1 ne concernent pas les radiations visibles dans les milieux transparents. R est nul pour $n = 1$, et croît progressivement pour atteindre 65% lorsque $n = 10$. Ces valeurs ne sont jamais atteintes par les minéraux transparents, dont l'indice n varie entre les limites de celle de la mallardrite ($Na_2\ SiF_6$) avec $n = 1{,}3$ et $R = 1\%$, et de celle de la radiation bleue du rutile synthétique (TiO_2) avec $n = 3{,}18$ et $R = 27\%$.

Réflexion sur un minéral isotrope absorbant

Le pouvoir réflecteur est influencé par l'indice de réfraction n et par l'indice d'absorption κ du minéral réfléchissant

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} + \frac{n^2\kappa^2}{n^2\kappa^2} = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} + \frac{k^2}{k^2}.$$

F. E. Wright (1919) a étudié les différences d'influence sur R des indices n et κ pour leurs valeurs croissantes et a établi des courbes, dont quelques remarques générales peuvent être tirées.

Dans les milieux absorbants, l'indice n peut être inférieur à 1; c'est le cas de l'argent dont $n = 0{,}18$ et dont κ agit essentiellement sur R.

Les courbes de Wright montrent que pour $n = 0{,}9$ et $\kappa = 0{,}5$ le $R = 17\%$ et que pour $n = 0{,}4$ et $\kappa = 10$ le $R = 82\%$.

En considérant les milieux transparents sous une épaisseur de plus en plus faible, c'est-à-dire progressivement plus absorbants, on constate que l'indice n devient plus grand que l'unité et qu'il agit de moins en moins sur R au fur et à mesure que κ croît.

Donnons les valeurs du pouvoir réflecteur R pour $n = 1{,}5$ et $n = 3$ avec κ croissant

κ	n=1,5	n=3
00	3%	25%
0,5	12%	33%
1,0	27%	52%
2,0	65%	77%
4,0	85%	92%
7,5	95%	97%

En considérant ces chiffres, on constate que les pouvoirs réflecteurs inférieurs sont plus influencés par l'augmentation de la valeur de n. Pour les pouvoirs réflecteurs moyens, l'augmentation des valeurs de n et κ ont une influence notable sur R et qu'enfin pour les pouvoirs réflecteurs élevés, c'est essentiellement l'augmentation de la valeur de κ qui détermine celle de R.

Les minéraux peuvent être groupés approximativement en trois classes:

1) Les minéraux à R inférieur ($\leqq 20\%$) sur lequel l'action de n est prédominante;
2) Les minéraux à R moyen ($\geqq 20\%$ à $\leqq 60\%$) sur lequel n et κ agissent ensemble;
3) Les minéraux à R supérieur ($\geqq 60\%$) sur lequel l'action de κ est prédominante.

Rappelons que les minéraux à R moyen pourront être les plus colorés, puisque. la dispersion de R est déterminée par l'influence combinée de n et de κ.

Citons quelques exemples:

	n	$n\kappa$	R
Quartz	1,54	00	4,5%
Diamant	2,42	00	17%
Blende jaune	2,38	0,01	18%
Grenat noir	1,94	0,058	22%
Hématite, rayon 0	3,1	0,42	27%
Galène	4,3	1,7	42%
Fer	2,36	3,21	56%
Aluminium	1,44	5,18	82%
Argent	0,18	3,63	95%

RÉFLEXION SUR UN MINÉRAL ANISOTROPE.

a) *Minéral transparent.*

La lumière incidente polarisée est réfléchie en deux composantes R_2 et R_1 qui forment ensemble la résultante R, selon la formule

$$R = R_2 + R_1 = \frac{(n_2 - 1)^2}{(n_2 + 1)^2} + \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2}$$

où, par convention, n_2 et R_2 sont plus grands que n_1 et R_1.

En tournant la platine du microscope R_2 puis R_1 peuvent être successivement amenés parallèlement à la vibration du polariseur et transmettre successivement le plus grand puis le plus petit pouvoir réflecteur du minéral. Cette variation d'intensité a été appelée *pléochroïsme de réflexion*, par analogie avec le pléochroïsme des minéraux transparents. Mais la cause du phénomène est tout autre et puisqu'en lumière réfléchie ce changement d'intensité n'est pas lié nécessairement à de la couleur, il est préférable de le nommer *biréflexion*.

Tous les minéraux anisotropes ont de la biréflexion mais elle n'est pas toujours perceptible à l'œil.

La calcite, qui n'est pas pléochroïque en transparence, a une nette biréflexion en surface polie

$$\text{pour } n_2 = 1{,}66, \quad R_2 = \frac{(1{,}66 - 1)^2}{(1{,}66 + 1)^2} = 0{,}064 = 6{,}4\,\% \quad \text{et}$$

$$\text{pour } n_1 = 1{,}48, \quad R_1 = \frac{(1{,}48 - 1)^2}{(1{,}48 + 1)^2} = 0{,}036 = 3{,}6\,\%$$

$R_2 - R_1$ est appelé la biréflectance du minéral, mais il est préférable de considérer le rapport $\frac{R_1}{R_2}$ dit *anisotropie de réflexion* ou *degré d'anisotropie* qui peut être estimé, sinon mesuré avec précision (voir plus loin).

b) *Minéral absorbant.*

Un rayon incident polarisé tombant normalement sur la surface d'un minéral absorbant est réfléchi en une résultante R de deux composantes vibrant dans le minéral selon les indices $n_2\,\kappa_2$ et $n_1\,\kappa_1$. Cette résultante s'exprime par une relation très complexe pour une orientation quelconque de la section du minéral. (Berek, 1934.)

$$R = \sqrt{\left\{\frac{(n_2 - 1)^2}{(n_2 + 1)^2} + \frac{n_2^2\,\kappa_2^2}{n_2^2\,\kappa_2^2}\sin^2\alpha + \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} + \frac{n_1^2\,\kappa_1^2}{n_1^2\,\kappa_1^2}\cos^2\alpha\right\}^2 - sin^2\,2\alpha\,X^2}$$

α = angle entre n_1 et la vibration du polariseur,
X = relation complexe entre n_2, n_1, κ_2 et κ_1.

Mais en tournant la platine du microscope pour amener successivement la direction des indices parallèle à la vibration du polariseur, on obtient

$$\text{Pour } \alpha = 0^\circ \text{ et } 180^\circ \quad R = R_1 = \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} + \frac{n_1^2 \kappa_1^2}{n_1^2 \kappa_1^2} \quad \text{et}$$

$$\text{pour } \alpha = 90^\circ \text{ et } 270^\circ \quad R = R_2 = \frac{(n_2 - 1)^2}{(n_2 + 1)^2} + \frac{n_2^2 \kappa_2^2}{n_2^2 \kappa_2^2}$$

C'est durant cette rotation qu'on observe la différence d'intensité lumineuse qu'est la biréflexion. Si le minéral possède une dispersion du pouvoir réflecteur, la biréflexion peut être accentuée par les effets chromatiques, mais il n'y a pas, entre R_2 et R_1, de différence nette de couleur car il ne s'agit que de variations de nuances et d'intensité de la teinte.

Tout minéral anisotrope est biréflecteur, mais ce n'est pas toujours discernable à l'œil. Ainsi trois degrés de biréflexion peuvent être considérés:

1) Biréflexion non discernable à l'œil; c'est le cas de la chalcopyrite ($R = 43{,}2\,\% \pm 1{,}3$) de l'argentite ($R = 33\,\%$), de la cobaltine ($R = 52\,\%$);
2) Biréflexion faible, observable, par contraste, au contact de deux sections diversement orientées; c'est le cas de l'arsénopyrite ($R_2 = 54{,}5\,\% - R_1 = 51{,}3\,\%$), de la nickéline ($R_2 = 58\,\% - R_1 = 52\,\%$) et de l'énargite ($R_2 = 28\,\% - R_1 = 25\,\%$);
3) Biréflexion nette à très forte, visible aisément sur un cristal isolé; c'est le cas de la stibine ($R_2 = 40\,\% - R_1 = 30\,\%$), de la molybdénite ($R_2 = 37\,\% - R_1 = 15\,\%$) et de la sylvanite ($R_2 = 60\,\% - R_1 = 48\,\%$).

Ce groupement en trois degrés n'a rien d'absolu, car un débutant ne jugera pas de la même manière qu'un observateur expérimenté, cependant il permet d'estimer le degré de biréflexion d'un minéral et de le comparer à d'autres. Ajoutons que les observations doivent se faire sur les sections de plus grande anisotropie si l'on veut attribuer au minéral, pour sa détermination, un certain degré de biréflexion.

6 OBSERVATION ENTRE POLARS CROISÉS

Il est utile, pour commencer, de vérifier si la vibration du polariseur est bien parallèle ou perpendiculaire au plan d'incidence sur l'illuminateur; si l'analyseur est mobile il faut l'amener en position croisée avec le polariseur en obtenant, par sa rotation, une bonne extinction d'un minéral isotrope (blende, magnétite), puis noter le chiffre de la graduation correspondant à cette position.

a) RÉFLEXION SUR UN MINÉRAL ISOTROPE.

Le minéral isotrope n'influence pas la nature de la lumière incidente, et une lumière rectilignement polarisée est réfléchie de même, puis est arrêtée par l'analyseur; le minéral est à l'extinction et le reste durant une rotation complète de la platine du microscope. Cette observation n'est souvent pas possible chez des minéraux transparents ou translucides à cause des réflexions internes (voir plus loin).

Parfois l'extinction n'est pas complète, même entre polars bien croisés; il reste une certaine luminosité due à de la lumière elliptique produite par un fort pouvoir réflecteur du minéral, par la convergence d'un objectif ou par un défaut de réglage de l'appareillage. Cependant si cette luminosité reste constante, durant la rotation de la platine, le minéral est bien isotrope. Un minéral de faible anisotropie ne rétablissant que très peu de lumière peut, par erreur, être considéré comme isotrope (voir plus loin).

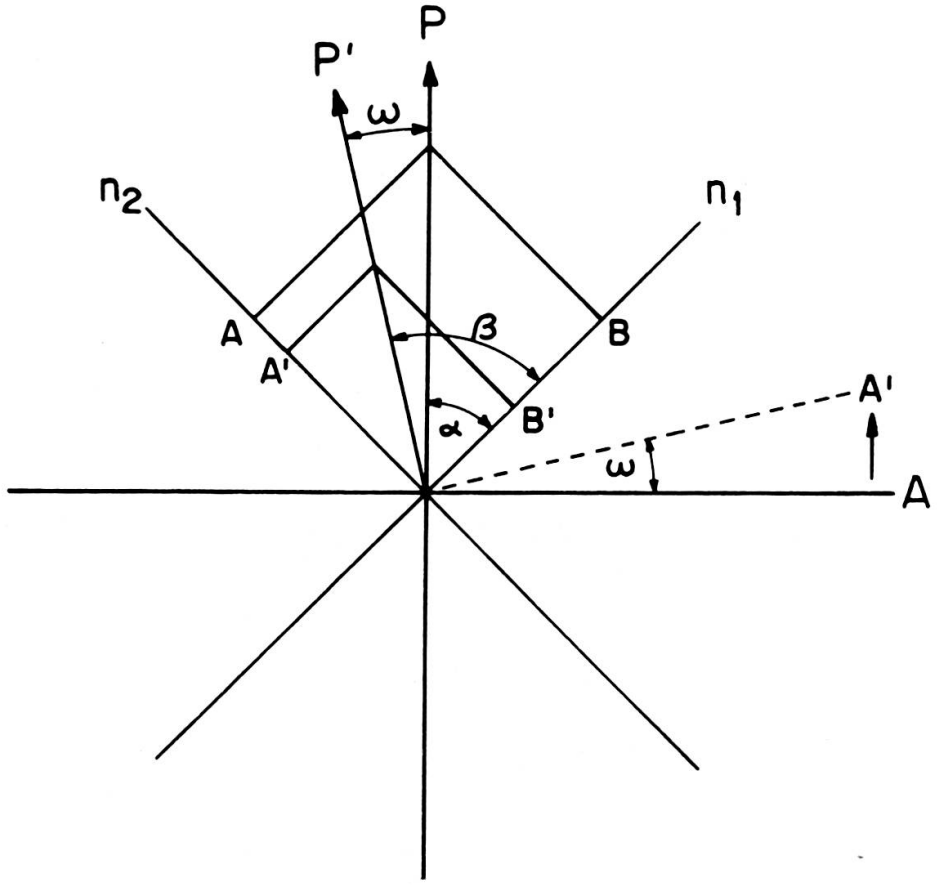


Fig. 9.

Processus de rotation du plan de vibration d'un rayon réfléchi, sous incidence normale, sur un minéral anisotrope.

b) Réflexion sur un minéral anisotrope.

Le processus général est le même pour les minéraux transparents et opaques mais, pour ces derniers, il devient plus complexe sous l'influence de l'indice d'absorption.

Posons $n_2 > n_1$ et (fig. 9) $\alpha = n_1\ OP$ et $\beta = n_1\ OP'$.

Le rayon OP venant du polariseur se partage en deux composantes OA et OB, selon l'orientation des indices n_2 et n_1. Ces deux rayons subissent, durant le parcours dans le minéral, une certaine perte d'amplitude par absorption différente pour chacun d'eux, soit OA' et OB'; ces deux composantes réfléchies se résolvent en la résultante OP' dont la direction de vibration a tourné, par rapport à celle de OP, d'un angle ω.

Exprimons le pouvoir réflecteur de chaque indice par:

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

$$\text{et les angles } \alpha \text{ et } \beta \text{ par } \mathrm{tg}\alpha = \frac{\mathrm{OA}}{\mathrm{OB}} \text{ et } \mathrm{tg}\beta = \frac{\mathrm{OA}'}{\mathrm{OB}'}$$

Le degré d'anisotropie $\frac{R_2}{R_1}$ d'une section peut s'exprimer par la relation

$$\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = \frac{\dfrac{OA'}{OA}}{\dfrac{OB'}{OB}} \text{ ou } \frac{OA'}{OB'} = \frac{OA}{OB}\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \text{ soit } \mathrm{tg}\beta = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\ \mathrm{tg}\alpha$$

Cette relation montre que $\beta > \alpha$, c'est-à-dire que la rotation du plan de vibration du rayon réfléchi OP' se fait dans la direction du plus grand indice n_2, et que l'angle de rotation ω, égal à $\beta - \alpha$, est d'autant plus grand que le degré d'anisotropie est plus élevé.

Etablissons le pouvoir réflecteur d'une section quelconque en position d'éclairement et entre polars croisés (α entre 0° et 90°).

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

$$\text{mais } (OA')^2 = R_2\,(OA)^2 \text{ et où } (OA) = OP \sin\alpha$$
$$\text{soit } (OA')^2 = R_2\,(OP)^2 \sin^2\alpha\,,$$
$$\text{de même } (OB')^2 = R_1\,(OB)^2 \text{ et où } OB = OP\cos\alpha$$
$$\text{soit } (OB')^2 = R_1\,(OP)^2\cos^2\alpha\,.$$

En remplaçant $(OA')^2$ et $(OB')^2$ par leurs nouvelles expressions, dans la première formule, on obtient

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

Cette formule n'est valable que pour les minéraux dont l'indice d'absorption est très petit ou nul. Pour les milieux absorbants R s'exprime par une formule contenant un membre fort complexe, citée plus haut.

Rétablissement de l'extinction par rotation de l'analyseur

Si le minéral est placé en position d'éclairement ($\alpha \neq 0°$ et $90°$) et que l'analyseur est tourné, dans le sens convenable, d'un angle ω, il devient en position croisée avec OP' et rétablit ainsi l'extinction (fig. 10*a*). Comme la rotation de OP' se fait dans la direction de R_2, le sens de la rotation de l'analyseur indique dans quel cadran du champ visuel se trouve R_2 (cadran NW de la fig. 10).

Cependant il faut savoir si la vibration du polariseur est NS ou WE, et ceci peut être facilement vérifié au moyen d'un minéral très biréflecteur. Ainsi la covelline, par exemple, forme souvent des paillettes aplaties selon la base, avec un clivage 001. La section de biréflexion maxima a une forme rectangulaire allongée avec traces de clivages parallèles à cet allongement et R_2 est dans une position perpendiculaire à celui-ci. En plaçant une section dans une position où le pouvoir réflecteur est le plus élevé, c'est-à-dire lorsque la lumière est réfléchie selon R_2, et cela sans l'analyseur,

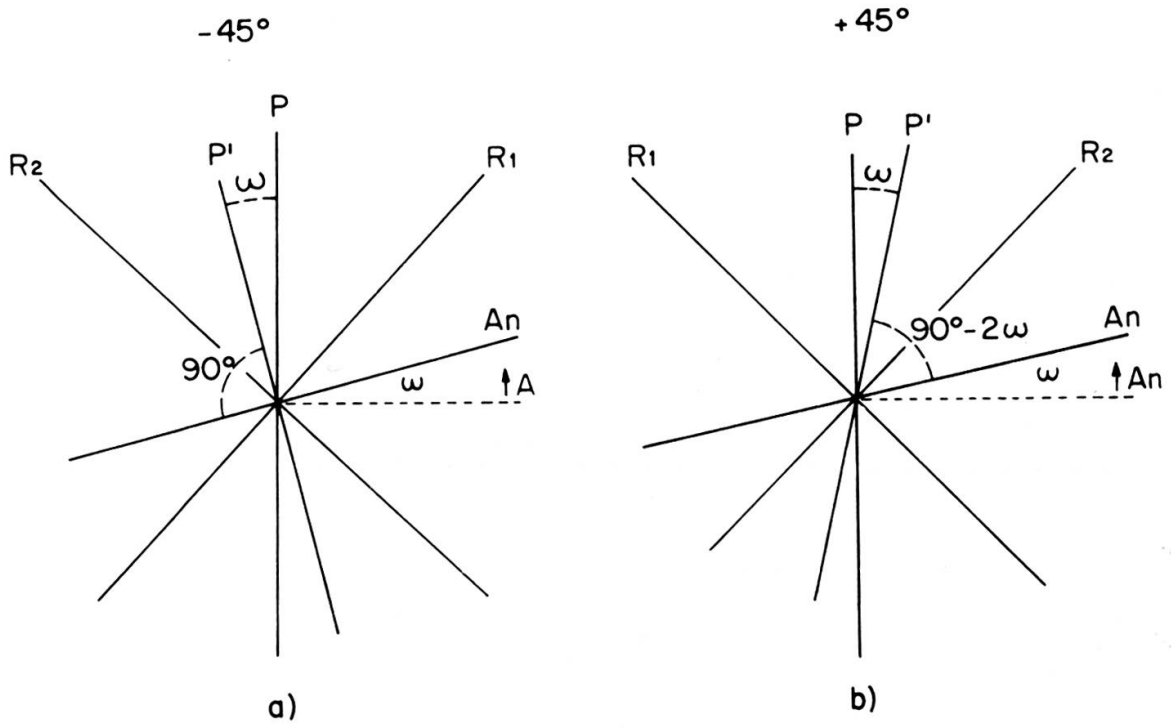


Fig. 10.
Rétablissement de l'extinction par rotation de l'analyseur.

la direction de vibration du polariseur est indiquée par la direction perpendiculaire au clivage. La molybdénite et le graphite peuvent aussi être usilisés dans ce but,

mais c'est la direction parallèle au clivage et à R_2 qui indique celle de la vibration du polariseur.

Détermination de la position de R_2

Il est parfois utile de déterminer la position de R_2 et de la rapporter à un caractère morphologique (allongement, clivage, plan de macle...)

Cela est aisé lorsque la biréflexion est nettement visible à l'œil car il suffit de placer le cristal, par rotation de la platine et sans analyseur, dans la position de plus grande intensité lumineuse et alors l'orientation de R_2 est celle de la vibration du polariseur.

Mais si la biréflexion est trop faible pour être sensible à l'œil, le minéral est mis, entre polars croisés, en position d'éclairement par rotation de la platine, à partir d'une position d'extinction, dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre ($+ 45°$) ou dans le sens inverse ($- 45°$). Afin de rétablir l'extinction, l'analyseur est tourné dans un sens ou dans l'autre et la direction de la rotation qui rétablit l'extinction est celle de la position de R_2. Dans la figure 10*a* la rotation de l'analyseur se fait dans le sens antihoraire ($- 45°$) pour tourner d'un angle ω et rétablir l'extinction en position croisée avec OP'; ce sens du mouvement indique que R_2 se trouve dans le cadran NW du champ.

Croisement plus précis des polars

Les polars ont été croisés précédemment par rotation de l'analyseur, jusqu'à bonne extinction d'un minéral isotrope; il est possible de les croiser avec plus de précision en utilisant un minéral anisotrope.

A la figure 10*a* où le minéral est en position $- 45°$, l'analyseur est croisé avec OP' et il y a extinction, mais à la figure 10*b* le minéral est en position $+ 45°$ et OP' fait un angle de $90° + 2\omega$ avec l'analyseur et il n'y a pas extinction; celle-ci se reproduira lorsque le minéral sera en position $- 45° \mp 180°$; ainsi pour une rotation de 360° de la platine, le minéral ne se trouve que deux fois à l'extinction et en deux positions à 180° l'une de l'autre.

Si l'analyseur n'est décroisé que d'une petite fraction de l'angle ω, il se produit bien quatre extinctions durant un tour complet de la platine, mais ces extinctions ne sont plus perpendiculaires les unes aux autres, étant respectivement, par exemple, à 75° et 105°. Ce fait est l'indication d'un croisement imparfait des polars et si, en modifiant très délicatement la position de l'analyseur, on obtient de nouveau des extinctions rigoureusement à 90°, un croisement très précis des polars a été acquis.

LUMIÈRE ELLIPTIQUE SIMPLE ET COMPLEXE

Dans le cas des minéraux absorbants, il n'est pas rare que la rotation de l'analyseur ne rétablisse qu'une extinction incomplète lorsqu'il est croisé avec le rayon réfléchi *OP'* et seul un minimum de luminosité est obtenu, parfois encadré de colorations dont on examinera plus loin l'origine.

Cette mauvaise extinction est due à une vibration légèrement elliptique de *OP'* produite par une différence de phase qui s'ajoute à la différence d'amplitude des deux composantes *OA'* et *OB'*. Cette ellipticité simple peut être aisément supprimée au moyen d'un compensateur elliptique ou avec un mica quart d'onde et ainsi le rétablissement d'une bonne extinction est obtenue.

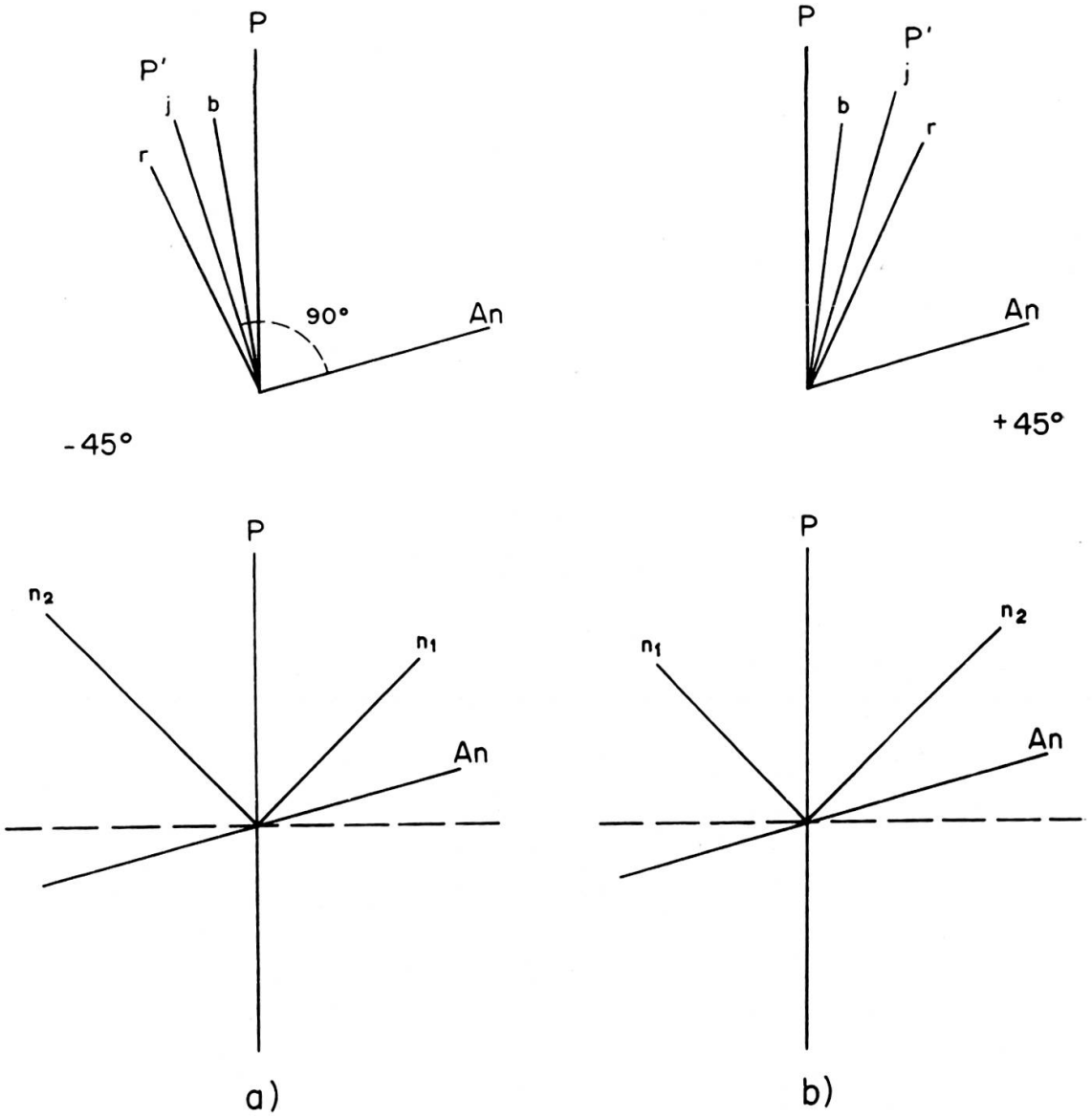


Fig. 11.
Schéma de la production de teintes asymétriques avec analyseur décroisé.

L'ellipticité complexe, en revanche, due à diverses causes se manifeste sous plusieurs aspects que nous ne considérerons ici que pour leur utilité à l'observation microcopique, et sans nous étendre sur des interprétations théoriques.

En considérant plus haut la position des indices n et κ dans les minéraux biaxes, il a été établi que, dans toutes les sections non perpendiculaires à un plan de symétrie, les indices n et κ n'étaient ni confondues ni parallèles et que de ce fait, les vibrations réfléchies selon R_2 et R_1 étaient des vibrations elliptiques S_2 et S_1 (fig. 8).

Si, entre polars croisés, le minéral est placé en position d'extinction, la lumière réfléchie n'est pas entièrement arrêtée par l'analyseur, parce qu'elliptique (fig. 12*a*); l'extinction est incomplète et parfois encadrée de teintes (voir plus loin).

Si maintenant le minéral est placé en position d'éclairement ($\pm$ 45°) le rayon réfléchi OP' va présenter une ellipticité complexe puisqu'en plus d'une différence de phase entre OA' et OB', ces deux composantes vibrent déjà elliptiquement. La rotation de l'analyseur ne peut rétablir qu'une extinction incomplète et souvent qu'un minimum de luminosité, parfois imperceptiblement.

Teintes entre polars croisés

Alors que la couleur d'un minéral, vu sans analyseur, est la conséquence de la dispersion du pouvoir réflecteur, les couleurs de la lumière rétablie par le minéral entre les polars croisés, dans les positions à + et − 45°, sont dues à la dispersion de l'angle ω de rotation de OP'; cet angle n'est pas le même pour les diverses radiations monochromatiques.

Posons que ω est croissant du violet au rouge (fig. 11). Lorsque les polars sont bien croisés, la teinte dominante est celle de la radiation dont ω est le plus grand, ici le rouge, mais les autres teintes ne restent pas sans effet et c'est ce qui produit non des couleurs franches mais des teintes nuancées.

Que le minéral soit placé à + 45° ou à − 45°, la couleur sera la même dans les deux positions encadrant celle d'extinction; les teintes sont symétriques. Mais en tournant l'analyseur d'un angle ω égal à celui du jaune (fig. 11*a*) lorsque le minéral est à − 45°, l'analyseur arrête le jaune et la teinte est alors la résultante des teintes réfléchies, soit ici rouge violet. Si maintenant, sans toucher à l'analyseur, le minéral est placé en position + 45° (fig. 11*b*) les vibrations des diverses radiations se rapprochent du parallélisme avec celle de l'analyseur et le minéral rétablit une lumière plus vive et colorée par les radiations au plus grand ω, ici rouge orangé. Ainsi, lorsque les polars ne sont pas bien croisés, les teintes des deux positions symétriques de celle d'extinction ne sont plus symétriques mais différentes.

Ce phénomène est le fait des minéraux uniaxes et des sections des minéraux biaxes qui n'ont pas d'ellipticité complexe.

Si la dispersion est très faible, avec ou sans ellipticité simple, la rotation de l'analyseur produit un minimum de luminosité, sinon une extinction, encadrée de

faibles teintes; si la dispersion est très forte, la rotation de l'analyseur fait apparaître une succession de teintes produites par les radiations complémentaires de celles successivement arrêtées par celui-ci.

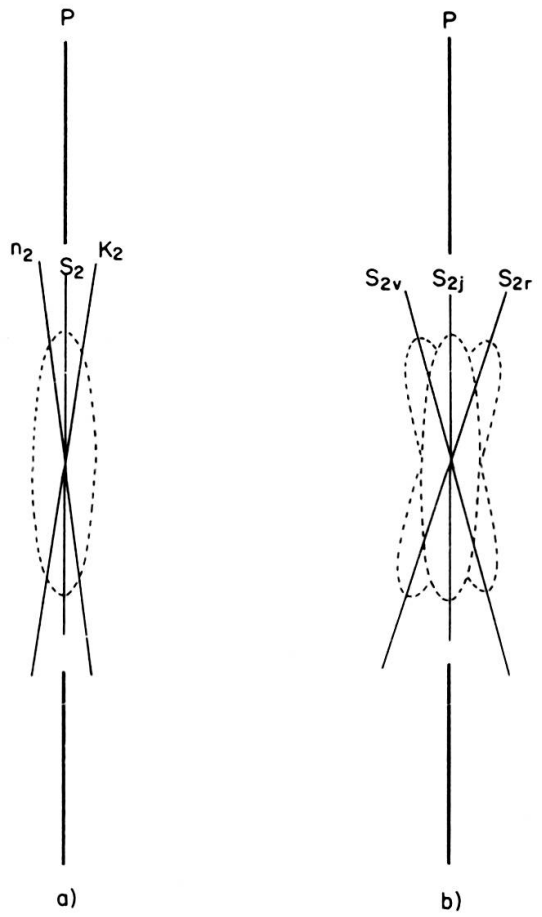


Fig. 12.

a) Ellipticité du rayon réfléchi d'une section en position d'extinction mais dont les indices n et κ ne sont pas parallèles (extinction incomplète);
b) Dispersion de cette ellipticité (en violet, jaune et rouge).

Dans le cas des minéraux produisant de la lumière elliptique complexe, la dispersion de OP' s'ajoute à la dispersion des indices elliptiques complexes S_2 ou S_1. En position d'extinction, chez certains minéraux biaxes, la lumière réfléchie est elliptique et dispersée. A la figure 12*b*, si l'analyseur est bien croisé, il arrêtera la radiation jaune et l'extinction sera incomplète, à cause de l'ellipticité, et bordée à gauche de violet et à droite de rouge, à cause de la dispersion. En plaçant maintenant le minéral à $-45°$, la lumière rétablie sera dominée par le violet qui a un ω plus grand, et lorsque le minéral est dans la position $+45°$ c'est le rouge qui a sa position la plus éloignée de OP et qui colorera la lumière établie: chez les minéraux à ellipticité complexe et dispersée, les couleurs dans les deux positions encadrant celle d'extinction ne sont pas les mêmes entre polars bien croisés, elles sont asymétriques. La rotation

de l'analyseur produit une succession de teintes mais guère de minimum de lumière. Pour mesurer ω il faut employer un compensateur elliptique et de la lumière monochromatique.

Réglage plus précis du croisement des polars par les teintes de dispersion.

Nous avons vu que pour les minéraux uniaxes les teintes entre polars croisés sont symétriques de part et d'autre des positions d'extinction, mais qu'une petite rotation de l'analyseur produit une différence de teinte entre les positions à $+ 45°$ et $- 45°$. En prenant un minéral peu dispersif, comme l'ilménite, on observe lorsque l'analyseur n'est pas bien croisé, que d'une part la teinte est gris jaunâtre et de l'autre gris bleuté. En passant alternativement, et à plusieurs reprises, de la position $- 45°$ et $+ 45°$, en modifiant imperceptiblement la position de l'analyseur, l'égalité de teinte dans les deux positions est obtenue lorsque les polars sont rigoureusement croisés. C'est par ce moyen que le but est atteint avec le plus de rigueur. Un minéral très dispersif comme la covelline peut être aussi utilisé.

Estimation des degrés d'anisotropie, de dispersion et d'extinction

Divers degrés d'anisotropie

Il a été constaté que l'angle ω de rotation de OP' croît avec le degré d'anisotropie $\frac{R_2}{R_1}$ mais, dans la pratique courante de l'observation microscopique, la mesure de cet angle n'est pas d'un grand apport comme donnée de détermination. En effet, pour la majorité des minéraux, les valeurs de cet angle ne varient guère qu'entre 2° et 8°. De plus, pour que l'angle ω fournisse une donnée déterminante, il faut connaître sa valeur maxima dans le minéral; or la lumière réfléchie ne dispose pas de moyen de trouver la section d'anisotropie maxima comme la lumière transmise le fait par l'emploi de la lumière convergente et la section de plus grande anisotropie sur une surface polie n'est pas nécessairement celle de plus grande anisotropie du minéral. Certes il est possible de la trouver au moyen de la cellule photo-électrique, mais encore faut-il que les valeurs de R_2 et R_1 soient connues.

Pour la détermination approchée et l'usage des tables, il suffit d'apprécier si le degré d'anisotropie est faible, moyen ou fort.

a) *Minéraux de faible anisotropie.*

Ce sont ceux qui, entre polars croisés, ne rétablissent que peu ou pas de lumière et qui peuvent être jugés comme isotrope. L'analyseur doit être alors un peu décroisé et le minéral présente une plus nette luminosité qui s'éteint en deux positions à 180° l'une de l'autre; si le minéral est dispersif, la teinte n'est pas la même à $-$ et $+ 45°$.

C'est ce qui distingue le minéral anisotrope de l'isotrope dont la faible lumière rétablie reste constante durant la rotation de la platine. La chalcopyrite, la cobaltine et l'argentite ont une faible anisotropie.

b) *Minéraux d'anisotropie moyenne à forte.*

Entre les polars croisés, ces minéraux rétablissent une lumière qui permet de constater, par rotation de la platine, les quatre positions d'extinction à 90° les unes des autres et, d'autre part, d'observer les teintes de dispersion, symétriques ou asymétriques.

L'intensité de la lumière rétablie est variable selon les minéraux. Lorsqu'en décroisant un peu l'analyseur, l'anisotropie devient nettement plus apparente, le minéral peut être considéré comme moyennement anisotrope et si l'intensité lumineuse ne se modifie guère ou pas du tout, il est jugé comme fortement anisotrope. Comme cela est une question d'appréciation, la limite n'est pas tranchée entre ces deux degrés d'anisotropie.

La bournonite peut être considérée comme faiblement ou moyennement anisotrope. Les minéraux comme la pyrargyrite, la chalcosine, l'hématite et l'ilménite sont moyennement anisotropes, alors qu'à des degrés croissants l'arsénopyrite, la pyrrhotine, la nickéline, la molybdénite, la covelline et la chalcophanite sont fortement anisotropes.

Rappelons le parallélisme qu'il y a entre ces observations et celles sur la biréflexion et qui n'ont de valeur que faites sur des sections de plus grande anisotropie, puisque les sections perpendiculaires à un axe optique ou proche de celui-ci apparaissent comme isotropes ou faiblement anisotropes.

Divers degrés de dispersion

Une étude systématique de la dispersion n'est pas sans profit pour la détermination des minéraux, mais elle demande une assez longue pratique du microscope et un œil bien éduqué. Il existe deux procédés pour une telle étude: la méthode conoscopique (Cameron (1961)) et celle orthoscopique (Galopin (1947)).

Rappelons qu'un faisceau de lumière convergente tombant sur la surface d'un minéral isotrope, sous incidence normale, produit une croix d'extinction visible avec la lentille de Bertrand. Il en est de même sur un minéral anisotrope, placé en position d'extinction, mais en tournant la platine du microscope le minéral rétablit la lumière et son anisotropie s'ajoute ou respectivement compense l'ellipticité de la lumière due à sa réflexion, dans les deux paires de cadrans opposés au centre du champ; la croix noire se disloque à la manière de celle des minéraux biaxes en lumière transmise. Cameron et ses collaborateurs étudient la dispersion d'un minéral en considérant la nature des teintes et leurs répartitions aux abords et dans cette croix en dislocation.

La méthode orthoscopique étudie la succession des teintes et leur nature, produites par la rotation de l'analyseur et qui encadrent le rétablissement d'une extinction plus ou moins marquée.

Il n'y a pas lieu ici de nous étendre sur le détail de ces observations, mais qu'il suffise de signaler quelques faits pouvant, par comparaison, faciliter une détermination:

1) La dispersion est peu accentuée si la lumière, entre polars croisés, est peu colorée (gris jaunâtre, blanc bleuté) comme chez le graphite, l'ilménite ou la boulangérite. La dispersion est forte si la lumière rétablie est nettement colorée (orange, bleu ciel, vert-jaune...) comme chez la nickéline, la safflorite, la pyrrhotine et la chalcopyrite;
2) Les teintes varient beaucoup selon l'orientation des sections d'un minéral, lorsque la dispersion est très forte, comme chez l'énargite et la marcasite; elle est nulle, lorsqu'il n'y a pas de teinte, comme chez la chalcophanite;
3) Les teintes sont symétriques par rapport à la position d'extinction et avec les polars *rigoureusement* croisés, comme chez la covelline, ou elles sont asymétriques (différentes à + et − 45°), comme pour la sylvanite;
4) Par rotation de l'analyseur on obtient un bon rétablissement de l'extinction, comme pour la chalcophanite; l'extinction est encadrée de faibles teintes comme chez la molybdénite; seul un minimum de luminosité s'obtient parmi une succession de teintes, comme chez la stibine et la berthiérite; il n'y a ni rétablissement d'extinction, ni minimum de luminosité, comme pour la marcacite.

Notons que ces défauts d'extinction peuvent être aussi dus à l'ellipticité de la lumière, et que seul l'emploi de la lumière monochromatique peut établir les rôles respectifs de la dispersion et de l'ellipticité. Mais l'observation du fait en lui-même reste un caractère spécifique du minéral et qui contribue à sa détermination.

Insistons aussi sur le fait que ces observations, purement qualitatives, n'ont qu'une utilité comparative. Lors de la détermination d'un minéral il n'est pas rare qu'on hésite à l'identifier à deux ou trois minéraux; une comparaison entre les propriétés de dispersion du minéral inconnu et des minéraux auxquels il peut être identifié, contribue souvent à la solution du problème.

Divers degrés d'extinction

La nature des extinctions entre polars bien croisés, qui peuvent être complètes ou incomplètes, non dispersées ou plus ou moins dispersées, est parfois utile à considérer; elle peut donner une indication sur l'uniaxie (bonnes extinctions) ou la biaxie (mauvaises extinctions) du minéral.

EMPLOI DE L'IMMERSION

De même que pour l'étude en coupes minces, on utilise l'immersion lorsque, en surface polie, la dimension des minéraux ou de leurs inclusions nécessite un fort grossissement pour leur étude.

Mais ce n'est pas là le seul avantage de l'immersion car en remplaçant l'air ($N = 1$) par un milieu d'immersion ($N \neq 1$) la relation entre l'indice n du minéral et celui du milieu est modifié, ce qui entraînera un changement du pouvoir réflecteur et de la dispersion. La couleur d'un minéral peut ainsi changer et sa biréflexion être accentuée ou atténuée. La covelline, très dispersive, offre un exemple démonstratif: bleue à l'air, elle devient bleu-violet dans l'eau ($N = 1{,}33$), rouge-violet dans l'huile de cèdre ($N = 1{,}51$) et orange-rouge dans le iodure de méthylène (N = 1,71).

Entre polars croisés, la dispersion d'ω peut aussi être plus ou moins modifiée, ce qui influence le degré d'anisotropie et les teintes de dispersion.

Les effets de l'immersion sont d'autant plus sensibles que le minéral est plus dispersif, que son pouvoir réflecteur est moins élevé et qu'un de ses indices n *est plus proche de celui* N *du milieu d'immersion.*

L'immersion ne modifie pas, à chaque minéral, tous ses caractères optiques. Chez l'un ce sera la biréflexion et la couleur, chez l'autre le *PR* et le degré d'anisotropie, et ces changements se font soit dans le sens d'un renforcement soit dans celui d'atténuation du caractère. L'intérêt réside dans le fait que deux minéraux très semblables à l'air peuvent devenir plus facilement distingable dans un milieu d'immersion, et que c'est une particularité pour un minéral d'avoir telle ou telle propriété modifiée, dans un sens ou dans l'autre, à l'immersion.

Ce n'est pas sans raison que P. Ramdhor (1960) insiste sur l'intérêt et l'utilité de l'usage de l'immersion et disant qu'en le négligeant on se prive d'un important moyen d'investigation et qu'on ne pourra constater nombre de faits cités dans les publications.

Dans la pratique, deux minéraux sont comparés à l'air, puis à l'immersion, et souvent les différences apparaissent mieux dans le second milieu que dans le premier. Mais lorsqu'on se propose d'étudier, sur un minéral, l'effet d'une immersion, il se pose le problème du changement de conditions qu'entraîne celui de l'objectif; en effet, en passant à l'immersion, l'emploi d'un objectif à court foyer est nécessaire, ce qui fait que l'équipement optique et les conditions d'observation ne sont pas les mêmes pour l'étude dans les deux milieux.

Le remède à cet inconvénient est d'utiliser comme Capdecomme (communication personnelle) un couvre objet qui recouvre la goutte du liquide d'immersion; ainsi, dans les deux milieux, l'observation se fait avec le même grossissement et le même éclairage. Signalons que certains milieux d'immersion, utilisés pour la lumière transmise, sont corrosifs pour les minéraux métalliques polis.

LES CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES

L'examen des caractères morphologiques représente souvent une utile contribution à la détermination d'un minéral. L'observation de formes cristallines, de zones, de macles, de clivages... qui sont typiques de certains minéraux facilite leur identification. Il en est de même en rapportant une propriété optique (P.R. extinction, biréflexion...) à un élément cristallographique (allongement, clivage, plan de macle...).

Idiomorphie et xénomorphie

La formation et la mise en place des minéraux métalliques (sulfures, sulfosels et certains oxydes) sont beaucoup plus sujets que ce n'est le cas chez les silicates à des phénomènes de résorption, de remplacement et de séparation. Les cristaux idiomorphes et idioblatiques sont très fréquents et peuvent être typiques de certains minéraux.

Les minéraux ayant une nette tendance à l'idiomorphie sont la pyrite, la magnétite et la cobaltine dont les formes sont courtes, carrées, pentagonales ou hexagonales. La safflorite et l'arsénopyrite sont souvent en losange et la berthiérite, la bismuthine, la millérite, la stibine et l'hématite forment des cristaux allongés ou en aiguilles.

En revanche, d'autres minéraux ont tendance à la xénomorphie et ne cristallisent généralement pas en cristaux isolés mais entourent, de leur masse grenue et irrégulière, les minéraux idiomorphes. C'est le cas de la blende, de la galène, du fahlerz, de la bournonite, de la chalcosine, de la nichéline et de la chalcopyrite. La forme de leurs grains se révèle par l'anisotropie ou par attaque chimique.

Les zones de croissance

Les cristaux isolés, de même que les masses xénomorphes, peuvent être zonés; il peut s'agir d'un minéral dont les zones ont une petite différence de composition chimique (smaltine, chloanthite, bravoïte) ou dont les zones sont formées de minéraux différents (*Schalenblende* avec blende, galène, marcasite).

Les zones apparaissent parfois au cours du polissage grâce à leur différence de dureté ou bien par leur anisotropie ou enfin par attaque chimique.

Les minéraux tels que l'hétérogénite, le psilomélane, la cobaltine. la malachite, la gœthite, etc. peuvent être en zones concentriques, anguleuses, rubanées, etc.

Les macles

La présence et la forme des macles sont souvent attachées à certaines espèces minérales et aident à leur identification. Elles sont souvent invisibles sans analyseur mais, si la biréflexion est assez forte, elles peuvent être déjà apparentes comme chez la stibine, la bismuthine et, parfois, la bournonite. Ailleurs elles favorisent la cons-

tatation d'une faible anisotropie, entre polars croisés, lorsqu'à des différences d'orientation des lamelles correspondent des différences de teintes, comme c'est le cas pour la chalcopyrite et la cobaltine.

La forme des macles caractérise aussi le minéral; ainsi les macles polysynthétiques de la bournonite, les macles lamellaires de la sylvanite, les macles de recristallisation de la stibine et les macles multiples de la stibioluzonite.

Les clivages

Les clivages sont plus ou moins facilement visibles et peuvent être selon un, deux ou trois plans. Ils ressortent parfois bien au cours du polissage, comme le clivage basal de la covelline, le clivage parallèle à l'allongement de la stibine et les clivages prismatiques de la linnéite et de la gersdoffite. Le clivage cubique, fin et facile, de la galène est peu visible mais il est mis en évidence, sur les sections parallèles à l'octaèdre ou proches de celles-ci, par les triangles d'arrachement dus au polissage et qui sont si caractéristiques de ce minéral. D'autres clivages n'apparaissent que par une attaque chimique.

Le clivage peut aussi être une voie de pénétration pour le remplacement ou l'altération d'un minéral et sa trace est alors soulignée par les fines inclusions du nouveau minéral (covelline dans chalcosine, hématite dans magnétite, chalcopyrite dans blende). Certaines exsolutions marquent les directions de clivages (ilménite dans magnétite, chalcopyrite dans bornite).

Les réflexions internes

Lorsque la lumière pénètre en profondeur sous la surface polie d'un minéral, elle peut être réfléchie sur un clivage, une inclusion ou une cassure, puis est renvoyée vers l'objectif: c'est ce qu'on appelle une *réflexion interne*.

Ce rayon réfléchi est dépolarisé et a la couleur du minéral vu par transparence; ainsi il est rouge écarlate dans la cuprite alors que le rayon réfléchi en surface est blanc bleuté, et il est vert dans la malachite, celui réfléchi en surface étant gris.

Comme la réflexion interne est dépolarisée, elle apparaît plus vivement entre les polars croisés, l'analyseur arrêtant le rayon réfléchi en surface. Les minéraux auront d'autant plus facilement des réflexions internes qu'ils sont moins absorbants puisque la lumière les pénètre plus profondément. Leur teinte est presque exclusivement limitée aux jaune-rouge-brun, et ce ne sera pas la couleur qui sera la plus déterminante mais les conditions dans lesquelles ces réflexions apparaissent.

Les réflexions internes sont parfois perceptibles sans l'analyseur, comme chez la blende et le rutile. Ailleurs, ils sont nettement visibles à l'air et entre polars croisés et intenses sous l'immersion, comme chez le cinabre, la proustite, la myargyrite et

la cuprite (en divers rouges). En d'autres cas, ils sont rarement visibles à l'air mais fréquents sous l'immersion, comme chez l'hématite (rouge), la wolframite (rouge sang), la chromite (brun rouge) et l'ilménite (brun foncé). Enfin ils sont généralement invisibles à l'air et rarement sous l'immersion, comme chez la tétraédrite, la plagionite et l'uraninite.

Les réflexions internes peuvent être si vives et nombreuses, chez les minéraux transparents et translucides, qu'elles voilent le rayon réfléchi en surface et empêchent d'établir les propriétés optiques telles que la biréflexion et l'anisotropie du minéral.

Autres observations

Un complément utile et parfois nécessaire, l'établissement des propriétés d'un minéral en vue de sa détermination, est l'examen des structures, des inclusions et des paragénèses. En effet les minéraux se groupent, au cours de leur formation, dans des conditions physico-chimiques déterminées et sous des formes structurales souvent bien définies. C'est ainsi que certains minéraux s'associent en certaines structures et que la coexistence de plusieurs minéraux est compatible ou incompatible avec d'autres.

L'importance et l'intérêt de l'étude des structures et des paragénèses pour la connaissance des minéraux opaques ont été mis en évidence par P. Ramdohr (1960), H. Schneiderhöhn (1952), A. B. Edwards (1954) et Ölsner (1961). Ces sujets sont trop vastes pour entrer dans le cadre de cet article et seront traités ailleurs avec les méthodes de mesures quantitatives et les méthodes chimiques.

CONCLUSIONS

Le but du présent article n'est autre que de servir de guide pour l'étude microscopique des minéraux opaques. Les diverses propriétés ont été passées en revue en les expliquant théoriquement et en indiquant quelques principes sur la façon de les apprécier et de les utiliser pour une détermination.

Certains sujets, comme la lumière convergente, la dispersion et la lumière elliptique, n'ont été abordés que du point de vue pratique car une étude théorique aurait exigé un développement beaucoup plus étendu.

L'ordre dans lequel les diverses propriétés ont été considérées n'est pas nécessairement celui adopté au cours d'un travail de détermination. Dans ce cas, c'est la conception des tables de détermination en usage qui fait loi. Généralement ce sont la dureté, la couleur et l'anisotropie qui sont appréciées en premier, puis l'attention se porte sur le pouvoir réflecteur et les degrés de biréflexion et de dispersion d'ω. Ces observations limitent déjà beaucoup le nombre de minéraux à envisager et c'est alors le moment de tenir compte des caractères morphologiques. Enfin, si le problème

n'est pas encore résolu, il faut faire cas de la nature des structures et des conditions des paragénèses, ce qui permet d'exclure ou de confirmer l'hypothèse envisagée.

Rappelons que les méthodes microchimiques sont souvent d'un grand secours en permettant l'analyse de l'échantillon brut qui indiquera les ions présents dans la préparation; mieux encore, en prélevant directement sur la surface polie, et sous le microscope, une petite parcelle du minéral inconnu, des réactions microchimiques révéleront certains éléments de sa composition qui peuvent le différencier d'un autre minéral chimiquement autre mais très proche optiquement.

Enfin, citons encore les méthodes de mesures quantitatives du pouvoir réflecteur et de la microdureté; elles peuvent se faire après l'étude microscopique pour infirmer ou confirmer le résultat d'une détermination ou pour lever les derniers doutes. Mais elles peuvent aussi, avec grand profit, se faire avant l'examen microscopique et réduire ainsi considérablement le nombre des minéraux possibles, si elles n'amènent pas de suite la solution. Cependant, nous l'avons dit, l'étude microscopique, en dehors de son but de détermination, reste indispensable pour éclaircir, par l'étude des structures et des paragénèses, l'origine et le processus de formation du gisement.

Institut de Minéralogie
de l'Université.
Genève, août 1966.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

BEREK, M. Optische Messmethoden im polarisierten Aufllicht. *Fort. der Min. Krist. und Petrog.*, Teil 1 (1937).

CAMERON, E. *Ore microscopy.* J. Wiley and Sons (1961).

CAPDECOMME, L. et J. ORCEL. Détermination des propriétés optiques des cristaux à l'aide du microscope métallographique polarisant. *Rev. optique théor. et instrum.*, vol. 20 (1941).

EDWARDS, A. B. *Textures of the ore minerals.* Melbourne (1954).

GALOPIN, R. Observations sur la dispersion du plan de polarisation après réflexion normale sur les minéraux métalliques anisotropes. *Bull. suisse de min. et pétr.*, t. 27 (1947).

HALLIMOND, A. F. *The polarizing microscope.* Cooke, Troughton & Simms LTD. (1953).

—— New polarizing microscope. *Mining Mag.*, vol. 3 (1964).

ÖLSNER, O. *Atlas der wichtigsten mineralparagenesen im mikroskopischen Bild.* Freiberg (1961). Editions anglaise et française (1965).

ORCEL, J. La mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques à l'aide de la cellule photo-électrique et ses applications. *Livre jubilaire Soc. franç. Min.* (1930).

—— L'examen microscopique des minéraux opaques des roches et des minerais métalliques. Complément dans F. Rinne. *La Science des Roches*, 3e éd. franç. (1949).

RAMDOHR, P. *Die Erzmineralien und ihre Verwachsungen.* Berlin Akad. Verl. (1960).

SAMPSON, E. The determination of anisotropism in metallic minerals. *Econ. Geol.*, v. 24 (1929).

SCHNEIDERHÖHN H. *Erzmikroskopisches Praktikum.* Stuttgart (1952).

—— und R. RAMDOHR. *Lehrbuch der Erzmikroskopie*, Band 1, Teil 1 (1934) und *Erzmikroskopische Bestimmungstafeln* (1931).

SCHOUTEN, C. *Determination Tables for ore microscopy*. Elsevier Pub. Cy. (1962).

SHORT, M. N. Microscopic determination of the ore minerals. *U.S. geol. Survey Bull.*, 914 (1940).

SMITH, F. H. A new incident illuminator for polarizing microscopes. *Min. Mag.*, vol. 33, n° 264 (1964).

WRIGHT, F. E. Polarized light in the study of ores and metals. *Proc. Amer. Phil. Soc.*, vol. 58 (1919).

Manuscrit reçu le 30 août 1966.