L'éclat des minéraux et la mesure de leurs pouvoirs réflecteurs

au moyen du microscope photoélectrique

Par M. J. ORCEL,
Docteur ès sciences, sous-directeur du Laboratoire de Minéralogie.

Parmi les caractères extérieurs des minéraux, l'éclat est un de ceux qui attirent le plus l'attention de l'observateur le moins averti. Pour certains d'entre eux, il l'emporte nettement en importance sur la couleur. Et cependant on n'attribuait jusqu'à présent à cette propriété qu'une valeur qualitative. En effet, l'éclat correspond à l'impression visuelle que l'on ressent en dirigeant vers soi la lumière réfléchie par la surface naturelle ou la cassure d'un minéral ; si l'on essaie d'analyser cette impression, on s'aperçoit qu'elle est de nature très complexe et qu'il n'est pas aisé de la définir rigoureusement. Nous verrons, dans la suite de cet exposé, comment on peut lui donner une base précise dans la notion de pouvoir réflecteur et comment l'on parvient ainsi à débrouiller en grande partie sa complexité apparente. Ici, comme dans d'autres domaines, la pensée de lord KELVIN trouve son application immédiate : « Si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez, et l'exprimer par un nombre, vous savez quelque chose de votre sujet. »

I. — Histoire de la notion d'éclat.

Les anciens minéralogistes attachaient une grande importance à la notion d'éclat dans la description des caractères extérieurs des minéraux. Indépendamment de la couleur, ils distinguaient deux effets dans l'éclat (1) : son intensité et sa nature. Considéré par rapport

(1) HAÜY, Traité de minéralogie, 2e éd., 1822, p. 156-158. — WERNER, Letzte Mineralsystem, 1817. — MOHS (F.), Treatise on Mineralogy, vol. I, p. 277-284, Edinburgh, 1825. — BEUDANT, Traité de minéralogie, 2e éd., 1830, p. 281. — BREITHAUPT, *Handb. d. Miner.*, t. I, p. 37-43, 1836.

à son intensité, ils le désignaient par les mots de très vif, vif, médiocrement vif, subluisant, brillant ou tremblotant, terne. Relativement à sa nature (ou à ses qualités), l'éclat était appelé ordinaire (ou vitreux), adamantin, gras, nacré ou perlé, soyeux, métalloïde, submétalloïde, demi-métallique, métallique.

Ce dernier effet, qui dépend de la nature du corps et de sa texture, varie considérablement d'un corps à l'autre. BEUDANT remarquait qu'on pouvait l'isoler du premier en plaçant le minéral de telle manière que la lumière réfléchie régulièrement à sa surface ne puisse parvenir à l'œil. La plupart des qualificatifs de l'éclat sont encore employés aujourd'hui.

Quant à la couleur, la liaison qui existe entre cette impression et celle d'éclat avait été indiquée par HAÜY puis par MOHS. HAÜY comparait « les diverses teintes qu'un même minéral est susceptible de présenter aux différents sons que rend un instrument de musique, et l'éclat au timbre ou à la qualité du son, qui est mâle, ou perçant, ou gracieux ou velouté, suivant l'espèce d'instrument que l'on touche, quel que soit d'ailleurs le ton ou quelle que soit la phrase musicale qu'il fait entendre. »

D'autre part, MOHS et BREITHAUPT insistaient sur l'invariabilité des diverses colorations dans la cassure fraîche des minéraux doués de l'éclat métallique et faisaient remarquer que, pour ceux-ci, les notions d'éclat et de couleur étaient inséparables. Cependant la plupart des anciens minéralogistes n'envisageaient dans l'éclat qu'un effet global produit par la masse du minéral telle qu'elle se présente à la vue ; ils confondaient dans la même notion l'éclat des agrégats de cristaux et celui des faces cristallines planes ; et, pour ces dernières, ils n'ont pas tenu compte tout d'abord de leur orientation dans le réseau cristallin, ni du degré d'homogénéité de celui-ci. Aussi étaient-ils quelque peu embarrassés quand des éclats différents apparaissaient dans le même minéral. C'est pourquoi, dans son *Traité de Minéralogie*, HAÜY prévenait le lecteur qu'il citera seulement l'éclat « parmi les caractères spécifiques de certaines espèces où il conserve assez généralement la même qualité dans les divers individus ».

Ce furent BREITHAUPT et surtout HAIDINGER (1) qui précisèrent le plus à ce point de vue la notion d'éclat. BREITHAUPT entrevit l'influence de l'orientation et du poli et montra que l'éclat nacré d'une face d'un minéral transparent n'était pas la réflexion pure de la face, mais le résultat de réflexions sur un grand nombre de lamelles excessivement minces superposées. Il fit une remarque analogue pour les minéraux à éclat soyeux qui doivent cet aspect à leur texture fibreuse.

HAIDINGER fit observer que l'intensité de l'éclat sur une face cristalline dépendait de son degré de perfection et que la nature de l'éclat était en rapport avec les particularités des phénomènes de réflexion ou de polarisation dues à la substance elle-même. Les faces cristallines polies ne montrent que trois sortes d'éclat : vitreux, adamantin et métallique, tandis que l'éclat gras ou nacré ne se rencontre pas parmi les faces parfaitement polies des cristaux homogènes. L'éclat gras est toujours lié à une plus faible transparence ; il participe de l'éclat vitreux et de l'éclat adamantin.

(1) HAIDINGER, *Sitzungsber. d. k. k. Akad. d. Wiss.*, Wien, Bd. IV, 1848, p. 137.

HAIDINGER montra enfin que la nature de l'éclat était fonction du pouvoir réfringent du minéral ; par suite, les corps faiblement réfringents possèdent l'éclat vitreux ; ceux fortement réfringents, l'éclat adamantin, enfin ceux doués d'une très forte réfringence, l'éclat métallique. Bien que le mot ne soit pas employé par HAIDINGER, on voit nettement apparaître dans ses intéressantes remarques la notion de pouvoir réflecteur d'une face cristalline d'orientation déterminée, et sa liaison avec celle d'indice de réfraction.

L'importance prise à juste titre par cette dernière notion, qui permet de baser sur des données numériques précises la détermination des minéraux transparents monoréfringents ou biréfringents, a fait négliger l'étude directe de l'éclat des minéraux, mais il a été nécessaire d'y revenir lorsqu'on a entrepris d'examiner au microscope, en lumière réfléchie et sur des sections polies, les minéraux opaques entrant dans la constitution des minerais métalliques. Le pouvoir réflecteur est en effet, dans ce cas, la seule propriété optique directement accessible à la mesure. Nous voulons montrer ici comment on y parvient actuellement et combien sont importantes pour la détermination des espèces minérales opaques les données numériques obtenues, bien que celles-ci ne présentent peut-être pas encore un degré de précision suffisant au point de vue purement physique.

Cependant, si la définition de l'éclat est relativement aisée dans le cas envisagé d'une surface plane polie, on se heurte à de sérieuses difficultés pour définir avec précision l'éclat dans toute la généralité recherchée par les anciens minéralogistes, c'est-à-dire dans le cas des agrégats de cristaux ou des cassures irrégulières. Il faut faire intervenir alors, outre la notion de pouvoir réflecteur sous différentes incidences, celle de pouvoir diffusif des surfaces rugueuses. L'étude de cette dernière propriété, que nous n'aborderons pas ici, peut être commencée en utilisant des surfaces planes constituées par des poudres impalpables de minéraux. Les observations qualitatives effectuées jusqu'à présent dans cette voie sont intéressantes (1) et méritent d'être précisées par des mesures.

II. — Pouvoir réflecteur d'un minéral sous l'incidence normale.

1° EXPOSÉ DES PHÉNOMÈNES OBSERVÉS ; MINÉRAUX TRANSPARENTS.

Avant d'aborder la description du dispositif expérimental que nous utilisons pour la mesure du pouvoir réflecteur des minéraux, il nous paraît nécessaire de résumer brièvement les conséquences que l'on peut déduire de la connaissance de cette grandeur au point de vue minéralogique.

Définition du pouvoir réflecteur. — Le pouvoir réflecteur d'une surface plane polie d'un minéral est le rapport entre l'intensité du faisceau lumineux réfléchi I_r par cette surface et celle du faisceau incident I_0. Il dépend de l'indice de réfraction n et de l'indice d'absorption $\varkappa$ du minéral. Il s'exprime, pour l'incidence normale, la seule à envisager pratiquement dans le cas de l'examen microscopique, par la relation :

(1) Cf. ARSANDAUX (H.), Observations sur la couleur des minéraux à éclat métallique (*Bull. Soc. franç. min.*, t. LVII, 1934, p. 211-219).

(1) $$R = \frac{I}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + n^2\varkappa^2}{(n+1)^2 + n^2\varkappa^2}.$$

Les courbes représentant les variations de cette fonction ont été tracées par F. E. WRIGHT (**34**) (fig. 1).

La plupart des minéraux sont optiquement anisotropes ; leurs propriétés optiques ne sont pas les mêmes suivant toutes les directions que l'on peut envisager dans leur réseau cristallin; leur pouvoir réflecteur variera donc avec les divers azimuts de la section polie

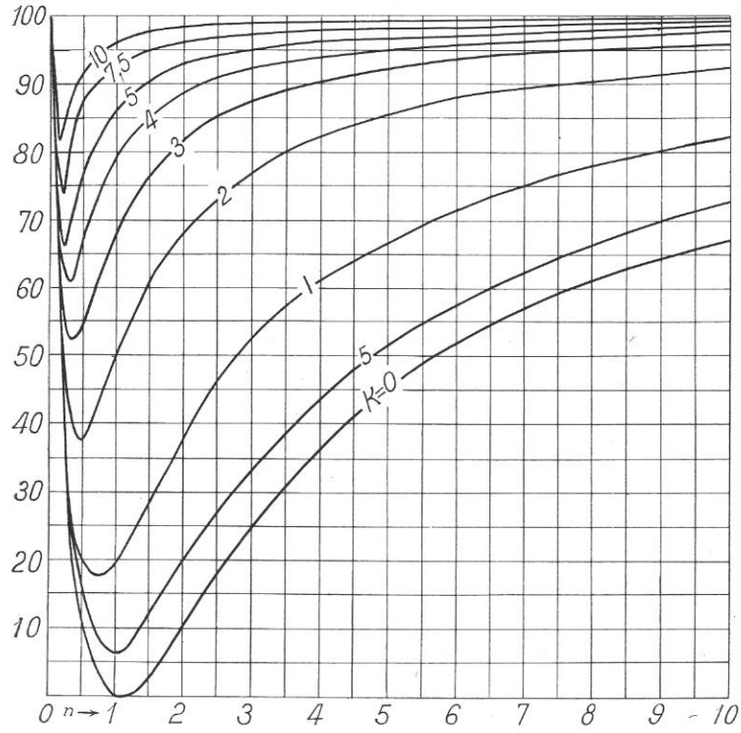

Fig. 1. — Pouvoirs réflecteurs sous l'incidence normale, en fonction des indices de réfraction n, pour diverses valeurs de l'indice d'absorption (d'après F. E. WRIGHT).
(Pour la deuxième courbe à partir du bas, lire K = 0,5 et non 5.)

étudiée et avec l'orientation de cette section dans le cristal. Sa mesure n'acquerra toute sa signification que si l'on utilise un faisceau incident polarisé rectilignement. Nous nous placerons donc de préférence dans ces conditions d'observation.

D'autre part, il faut remarquer que, dans le cas des minéraux opaques (à éclat métallique), l'indice d'absorption est rarement aussi élevé que pour les métaux. Le pouvoir réflecteur dépend donc beaucoup plus de l'indice de réfraction que de l'indice d'absorption, à tel point que l'effet de ce dernier est négligeable. La plupart des minéraux dits opaques peuvent donc être considérés comme transparents sous une très faible épaisseur (de l'ordre de 1/1000 de millimètre), qui est encore relativement grande vis-à-vis des longueurs d'onde de la lumière ; dans la relation précédente, on peut alors négliger le terme $n^2\varkappa^2$, et on retrouve la relation de FRESNEL :

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

qui est rigoureusement applicable dans le cas des minéraux isotropes transparents. Nous décrirons donc d'abord l'effet de la réflexion sur les minéraux transparents. Enfin, le pouvoir réflecteur étant fonction des indices de réfraction variera comme eux avec la longueur d'onde de la lumière incidente. Pour simplifier, nous nous placerons en premier lieu dans le cas de la lumière monochromatique.

Minéral anisotrope transparent. — Soit OP le vecteur représentant l'amplitude de la vibration incidente issue du polariseur (fig. 2), OA et OB ses deux composantes suivant les directions principales de polarisation de la section polie d'indices n_1 et n_2. Nous poserons $n_2 > n_1$. Soit α l'angle de la direction d'indice n_1 avec celle de la vibration incidente OP. Après réflexion, les deux composantes OA et OB donnent naissance à deux autres plus petites OA′ et OB′, et, si l'on désigne par R_1 et R_2 les pouvoirs réflecteurs qui leur correspondent, on aura :

$$R_1 = \left(\frac{OA'}{OA}\right)^2, \qquad R_2 = \left(\frac{OB'}{OB}\right)^2, \tag{3}$$

puisque les intensités sont proportionnelles aux carrés des amplitudes des vibrations.

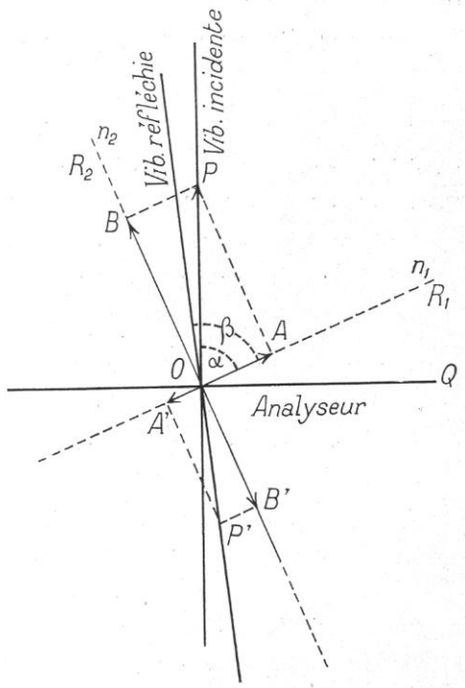

Fig. 2. — Rotation du plan de polarisation de la vibration incidente après réflexion sur un minéral anisotrope.

D'autre part, par suite des conventions de signes faites dans la théorie de la réflexion, les deux composantes OA′ et OB′ sont décalées de 180° par rapport à OA et OB. En composant ces deux vibrations, on obtient OP′, qui représente en grandeur et direction la vibration réfléchie. Soit β l'angle que fait cette vibration avec la direction de polarisation d'indice n_1 ; on voit que tout se passe comme si la vibration avait tourné d'un angle β-α après réflexion. Si l'on exprime β en fonction de α en formant le rapport des équations (3), on obtient la relation :

$$\operatorname{tg}\beta = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\operatorname{tg}\alpha. \tag{4}$$

La rotation du plan de polarisation de la lumière incidente est donc nulle quand les directions d'indice maximum et d'indice minimum de la section coïncident avec la direction de la vibration incidente OP et avec celle qui lui est perpendiculaire, OQ. Si l'on place un analyseur sur le trajet du rayon réfléchi, de façon à faire coïncider sa section principale avec OQ, il y aura à ce moment extinction. Pour toutes valeurs de α différentes de 0° ou 90°, la lumière réapparaît avec plus ou moins d'intensité, et l'on peut rétablir l'extinction en tournant l'analyseur d'un angle égal à β-α.

La relation (4) montre aussi que si $n_2 > n_1$, $R_2 > R_1$ et $\beta > \alpha$. La rotation de OP s'effectue donc vers la direction de plus grand indice de la section.

Désignons par $\omega = \beta_m - \alpha_m$ l'angle de rotation maximum de OP et posons pour simplifier : $\rho = \frac{R_2}{R_1}$. Il résulte de ce qui précède que l'angle ω peut être mesuré directement (**30**, **35**), mais on peut aussi le calculer à partir de ρ. En effet si, considérant la relation (4), on exprime β-α par sa tangente en fonction de tg α, on constate que cette fonction passe par un maximum pour

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \rho^{-\frac{1}{4}}.$$

en désignant par α_m l'angle α pour lequel β-α est maximum entre 0° et 90° (et en comptant les angles à partir de OP, dans le sens des aiguilles d'une montre).

Entre 90° et 180°, ω passe encore par un maximum pour une valeur de α égale à 180° - α. La vibration réfléchie est alors symétrique de OP′ par rapport à OP.

Anisotropie (ou polychroïsme) de réflexion. — On calcule aisément, d'après la construction géométrique précédente, que, pour une position de la section polie définie par l'angle α, le pouvoir réflecteur de cette section a pour valeur :

$$R = \frac{(OP')^2}{(OP)^2} = R_1 \operatorname{Cos}^2 \alpha + R_2 \operatorname{Sin}^2 \alpha.$$

On voit donc que, pour $\alpha = 0$ et 180°, $R = R_1$ et pour $\alpha = 90°$ et 270°, $R = R_2$. Par suite, en faisant tourner la section polie dans son plan devant le nicol polariseur, la quantité de lumière réfléchie passera successivement par un maximum et par un minimum quand la vibration incidente OP coïncidera avec l'une ou l'autre des directions principales de polarisation de la section. Mais la différence d'éclat offerte par la section dans ces deux positions ne sera sensible à l'œil que si les valeurs de R_1 et R_2 sont très différentes, ou bien si le minéral se présente en agrégats de cristaux d'orientations diverses. Dans ce cas, pour une position de la platine du microscope, certains cristaux seront au maximum d'éclairement, tandis que d'autres seront au minimum ou dans une position intermédiaire. On peut donner à cette propriété le nom de polychroïsme (ou d'anisotropie) de réflexion. Certains minéraux la possèdent avec une intensité remarquable (Voir la planche hors texte). Il en est ainsi pour la graphite, la molybdénite et la chalcophanite. Pour d'autres, comme la stibine et les sulfo-antimoniures de plomb, l'intensité du phénomène est moins grande, mais cependant bien visible. Enfin, pour un petit nombre, tels que la covellite et la umangite, il s'accompagne en lumière blanche de phénomènes chromatiques.

Ellipsoïde des pouvoirs réflecteurs. — Les pouvoirs réflecteurs R_1 et R_2 correspondant aux indices principaux n_1 et n_2 d'une section peuvent être désignés (**20**, **22**) sous le nom de pouvoirs réflecteurs principaux de la face considérée. Si on possède une section parallèle à deux axes d'élasticité optique du minéral et une deuxième section parallèle au troisième axe, on voit que l'on pourra déterminer les trois pouvoirs réflecteurs principaux du cristal, R_g, R_m, R_p, correspondant aux trois axes de l'ellipsoïde des indices. En d'autres

termes, on définit ainsi un ellipsoïde des pouvoirs réflecteurs qui est fonction de l'ellipsoïde des indices. Il s'ensuit que l'ellipsoïde des pouvoirs réflecteurs permettra d'orienter dans le cristal l'ellipsoïde des indices. Dans le cas particulier d'un minéral uniaxe, on déterminera même de cette façon son signe optique, si l'on peut repérer la position de l'axe cristallographique principal par rapport à un clivage ou à une autre direction remarquable du cristal.

Biréflectence. — On voit que la différence des pouvoirs réflecteurs principaux d'une section est une constante intéressante qui peut servir à la détermination du minéral. Elle joue un rôle analogue à celui de la biréfringence, et j'ai proposé de la désigner sous le nom de biréflectence. Certains auteurs étrangers ont adopté le mot de biréflexion (**1**).

2. — Cas d'un minéral dont l'indice d'absorption n'est pas négligeable.

Lorsque l'indice d'absorption ne peut être négligé, les pouvoirs réflecteurs correspondant à chacun des indices principaux de la section sont donnés par les relations :

$$R_1 = \frac{(n_1 - 1)^2 + n^2\varkappa^2}{(n_1 + 1)^2 + n^2\varkappa^2} \qquad R_2 = \frac{(n_2 - 1)^2 + n^2\varkappa^2}{(n_2 + 1)^2 + n^2\varkappa^2}.$$

Dans le cas des minéraux isotropes $n_1 = n_2$, $\varkappa_1 = \varkappa_2$, et les pouvoirs réflecteurs sont les mêmes dans tous les azimuts de la face réfléchissante.

Ellipticité de la vibration réfléchie. — Quand l'indice d'absorption n'est plus négligeable, chacune des deux composantes de la vibration réfléchie n'est plus en concordance de phase avec les composantes correspondantes de la vibration incidente, et la différence n'est pas la même pour chacune d'elles, puisque leurs indices d'absorption n'ont pas la même valeur. La lumière réfléchie sera donc polarisée elliptiquement ; mais, si l'on calcule cette différence de phase (F. E. Wright, **35**) pour diverses valeurs des indices de réfraction et d'absorption, on voit que, pour les substances présentant des indices de réfraction élevés associés à des indices d'absorption faibles ou élevées, elle est seulement de quelques degrés, et les caractères de la lumière réfléchie se rapprochent tellement de ceux de la lumière polarisée rectilignement que les phénomènes observés sont encore des différences d'intensités lumineuses dans les divers azimuts de la section et une rotation du plan de polarisation de la vibration incidente. Les métaux natifs mis à part, la plupart des minéraux opaques se trouvent dans ce cas, et en réalité peu d'entre eux présentent les véritables caractères de la réflexion métallique correspondant à des indices d'absorption très élevés accompagnés d'indices de réfraction très faibles et à la production par réflexion de vibrations elliptiques dont l'ellipticité soit notable. Le plus souvent, la détermination des pouvoirs réflecteurs principaux et de la biréflectence offrira donc encore une grande signification physique.

On trouvera dans d'autres publications (**22**, **35**) l'expression de la biréflectence, du

rapport ρ en fonction des indices de réfraction et d'absorption, ainsi que des considérations et des calculs concernant l'influence du milieu d'immersion sur le pouvoir réflecteur.

Surface des pouvoirs réflecteurs. — On connaît les difficultés qui ont été rencontrées par les physiciens pour étendre aux corps absorbants la notion des surfaces représentatives des phénomènes lumineux si féconde dans l'étude des corps transparents.

Comme l'a fait remarquer récemment encore M. BEREK (**32**), la source de ces difficultés tient à ce que, dans les cristaux absorbants, l'onde réfractée n'est pas homogène, et que, le long d'un même front d'ondes, les amplitudes sont variables d'un point à un autre.

Autrement dit, la surface d'égale amplitude ne coïncide pas avec celle des phases égales. Il ne peut être question de développer ici, même en raccourci, la théorie de la réflexion cristalline dans les corps opaques. Rappelons seulement que, pour parvenir à une généralisation mathématique satisfaisante, P. DRUDE a montré que l'on pouvait écrire les équations de base pour les mouvements lumineux dans les cristaux absorbants sous la même forme que pour les cristaux transparents, à condition d'introduire des grandeurs complexes à la place des grandeurs réelles. En particulier, à la place de l'indice de réfraction n, on introduit dans les calculs l'indice imaginaire :

$$n' = n\,(1 - i\varkappa).$$

Grâce à cet artifice, P. DRUDE et VOIGT ont constaté que les équations calculées conduisaient à un ellipsoïde complexe à trois axes qui pouvait être considéré comme la juxtaposition de deux ellipsoïdes ayant même centre, mais dont les axes principaux diffèrent en grandeur et direction. Ils ont été appelés, par DRUDE, axes principaux de polarisation et axes principaux d'absorption. Mais on ne peut en déduire que les rayons vecteurs de ces ellipsoïdes mesurent les indices de réfraction d'une part, les coefficients d'absorption d'autre part, puisque l'on a, en réalité, affaire à des fonctions complexes de ces grandeurs.

Au point de vue pratique, on est donc conduit à envisager provisoirement des surfaces de référence dont les rayons vecteurs représentent réellement soit les indices de réfraction, soit ceux d'absorption, et à déterminer expérimentalement l'écart entre ces surfaces et celle d'un ellipsoïde.

On pourra établir aussi une surface des pouvoirs réflecteurs (ou indicatrice) qui sera fonction des surfaces des indices de réfraction et d'absorption. Ces surfaces n'admettront les mêmes axes de symétrie que dans le cas des cristaux quadratiques, hexagonaux, rhomboédriques ou rhombiques. Pour les cristaux monocliniques ou tricliniques, il n'y a aucun rapport de symétrie imposé entre les trois surfaces, en dehors d'un axe et d'un centre.

3. — CAS DE LA LUMIÈRE BLANCHE. DISPERSION DU POUVOIR RÉFLECTEUR.

Si l'on éclaire la préparation avec de la lumière blanche, les phénomènes précédemment décrits sont modifiés par suite de la dispersion des indices de réfraction et d'absorption. Le

pouvoir réflecteur variera avec la longueur d'onde, et il y aura une surface des pouvoirs réflecteurs pour chaque longueur d'onde.

D'autre part, dans le cas des minéraux monocliniques et tricliniques, il pourra y avoir dispersion des directions de polarisation. Mais ce cas de dispersion est assez rare, et c'est le phénomène de dispersion des pouvoirs réflecteurs principaux R_1 et R_2 de la section étudiée qui est le plus important. Si, pour une longueur d'onde λ, le pouvoir réflecteur est nettement plus grand que pour les autres longueurs d'onde, le minéral possède la couleur de longueur d'onde λ. Et, s'il est anisotrope, il pourra ne posséder cette couleur franche que dans une direction déterminée. Ainsi une section de covellite parallèle à l'axe optique est bleu intense, quand le plan de la vibration incidente est perpendiculaire à cet axe, et blanche à peine teintée de bleu quand elle lui est parallèle.

Il existe deux cas de dispersion du pouvoir réflecteur correspondant aux cas de dispersion des indices de réfraction.

Dans le premier cas, le pouvoir réflecteur décroît quand la longueur d'onde augmente On dit que la dispersion est normale. Il en est ainsi des minéraux dont l'indice d'absorption est très faible ou nul, par exemple pour la blende ou le diamant.

Dans le second cas, dit de la dispersion anormale, le pouvoir réflecteur croît en même temps que la longueur d'onde. C'est le cas des métaux et celui des minéraux à indices d'absorption élevés.

III. — Mesure des pouvoirs réflecteurs.

L'exposé précédent montre l'intérêt que présente pour la définition de l'éclat des minéraux une détermination même approximative des pouvoirs réflecteurs en sections polies. L'importance de cette détermination est surtout très grande pour l'étude des minéraux opaques qui constituent les minerais métalliques. Les recherches poursuivies jusqu'à présent dans ce but ont eu surtout pour base des comparaisons photométriques oculaires, réalisées avec beaucoup d'ingéniosité et d'exactitude, mais dans lesquelles le facteur personnel de l'observateur joue toujours un rôle plus ou moins grand (**1**, **2**, **13**).

C'est pourquoi, il y a quelques années (**20**), j'ai pensé utiliser les propriétés des cellules photoélectriques, qui permettent de réaliser une mesure du pouvoir réflecteur indépendante de l'œil et sont mises en œuvre aujourd'hui avec succès dans les divers domaines de la photométrie.

Cellule photoélectrique. — Parmi les nombreux modèles de cellules existant actuellement, celui qui me paraît le plus conforme aux besoins de la Minéralogie est une cellule à gaz au potassium, d'un modèle de grande sensibilité établi par la SCAD pour le cinéma parlant (**11**).

C'est une ampoule de verre remplie d'argon à basse pression et dont la paroi intérieure est recouverte, d'un côté, d'une couche de potassium hydrurée déposée sur une couche d'argent, et constituant la cathode d'un circuit renfermant une batterie de piles et un galvanomètre ; l'anode est un fil de tungstène placé à faible distance du potassium. Lorsque la

couche de potassium est illuminée, elle émet des électrons, et le courant passe dans le circuit ; il est d'autant plus intense que la quantité de lumière reçue par la cellule est plus grande, et, en lui appliquant un potentiel accélérateur convenable, on peut faire en sorte qu'il y ait proportionnalité entre l'intensité de la lumière reçue par la cellule et celle du courant photoélectrique qu'elle provoque. D'ailleurs, pour les petits flux utilisés (inférieurs au 1-50e de lumen), cette proportionnalité est rigoureuse (**3**). Le potentiel accélérateur appliqué à la cellule est de l'ordre de 160 volts. Il peut être fourni par une batterie de piles sèches d'usage courant en T. S. F. Un galvanomètre à cadre mobile est placé dans le circuit, et l'on mesure la rotation de son miroir d'après le déplacement d'un index lumineux sur une règle graduée.

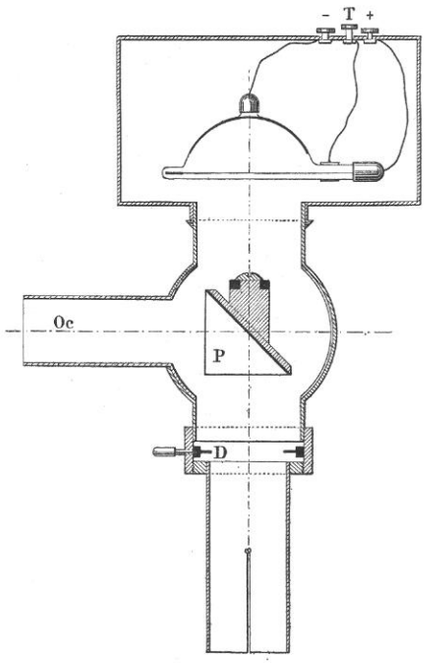

Fig. 3. — Schéma de l'oculaire photoélectrique. — P, prisme à réflexion totale réglable autour de trois axes rectangulaires ; D, diaphragme iris ; Oc, tube supportant l'oculaire au point sur le diaphragme iris. La cellule est placée dans l'axe du microscope.

Comme toutes les cellules, la cellule au potassium est sélective, c'est-à-dire que sa sensibilité varie beaucoup avec la longueur d'onde de la lumière qu'elle reçoit. Dans le modèle que j'utilise, le maximum de sensibilité se place vers 465 $\mu\mu$; on peut donc choisir cette région du spectre comme lumière monochromatique de référence analogue à la lumière du sodium pour les corps transparents, et on la produit aisément à l'aide d'écrans que l'on fabrique couramment aujourd'hui.

Oculaire photoélectrique. — J'ai adapté la cellule photoélectrique sur le tube oculaire du microscope métallographique polarisant (1) par l'intermédiaire d'un dispositif comprenant un prisme à réflexion totale P mobile latéralement ; celui-ci permet de diriger le faisceau lumineux réfléchi par la section polie tantôt vers l'oculaire O placé en avant, tantôt vers la cellule placée dans l'axe du microscope. Pour centrer convenablement, dans l'oculaire latéral, l'image fournie par l'objectif du microscope, le prisme peut être déplacé à volonté autour de trois axes rectangulaires dont l'un passe par l'axe optique de l'oculaire. Un diaphragme iris D centrable permet d'isoler dans le champ la portion de la section dont on veut mesurer le pouvoir réflecteur (fig. 3).

Principe de la mesure. — La détermination directe du pouvoir réflecteur absolu d'un minéral n'est pas réalisable dans les conditions de l'examen microscopique. On le déterminera donc indirectement par comparaison avec un étalon (minéral ou métal) dont on connaît le pouvoir réflecteur absolu par d'autres méthodes. Le rapport des déviations galvanométriques obtenues en mettant successivement au point la surface polie étudiée et la surface de l'étalon donne le pouvoir réflecteur de cette surface par rapport à l'étalon.

(1) Je n'ai pas cru nécessaire de décrire ici ce microscope, dont l'usage se répand de plus en plus dans les laboratoires. Plusieurs publications citées dans la bibliographie en donnent d'ailleurs des descriptions détaillées (**19**, **22**, **24**, **32**).

En multipliant cette valeur par le pouvoir réflecteur absolu de l'étalon, on obtient le pouvoir réflecteur absolu de la surface, pour une somme d'incidences définie par l'ouverture numérique de l'objectif utilisé.

Emploi de la lumière monochromatique. Amplification du courant photoélectrique. — La plupart des minéraux possédant une dispersion plus ou moins accentuée des pouvoirs réflecteurs, la mesure de ces derniers pour toute une série de longueurs d'onde du spectre visible permettra d'asseoir sur des bases précises la notion de couleur du minéral. Mais alors la réalisation de cette mesure est plus délicate, en raison de la faible quantité de lumière dont on dispose en général, et de la sélectivité de la cellule. Pour accroître la sensibilité de la méthode, on peut ou bien remplacer le galvanomètre par un électromètre, ou bien amplifier le courant photoélectrique. Cette dernière solution paraît la meilleure, car elle permet d'atteindre des coefficients d'amplification de l'ordre de 600 à 800. Sa réalisation présente toutefois des difficultés, mais la réussite dépend surtout du soin avec lequel sont effectués les montages. Le dispositif auquel j'ai fait appel est le même que celui imaginé par MM. CHALONGE et LAMBERT dans leur microphotomètre enregistreur et réalisé par Ed. BOUTY (**4**). J'en ai donné ailleurs la description et je n'y reviendrai pas ici (**22**). J'ajouterai seulement que, sur l'indication de M. CHALONGE, l'ancienne tétrode utilisée a été remplacée par une tétrode (Gecovalve B. G. 4) de caractéristiques très voisines, qui nous donne six fois plus de sensibilité et nous a permis de réduire beaucoup l'éclat de la source nécessaire auparavant. Le seul inconvénient que présente ce nouveau montage est de nécessiter une protection rigoureuse contre les perturbations électriques extérieures.

Source de lumière. — Comme source de lumière monochromatique, il est préférable d'utiliser un monochromateur comportant un prisme de BROCA à déviation constante et non des écrans. Cet appareil est éclairé par une lampe à filament métallique de dimensions très réduites, fonctionnant sous 18 volts 5 ampères, sur une batterie d'accumulateurs. C'est seulement ainsi que l'on peut réaliser une source lumineuse suffisamment constante. Nous avons renoncé à l'emploi du courant fourni par le secteur, même en tempérant ses irrégularités à l'aide de régulateurs de tension.

Choix des étalons. — Pour effectuer la comparaison photométrique, on utilisera de préférence un étalon dont le pouvoir réflecteur est voisin de celui du minéral étudié, afin d'obtenir des déviations galvanométriques qui ne soient pas trop éloignées l'une de l'autre. Il sera donc nécessaire de disposer d'une série d'étalons bien comparés entre eux pour plusieurs longueurs d'onde et constituant une échelle de pouvoirs réflecteurs croissants. Comme étalon de base, on peut prendre le *diamant* dont on calcule le pouvoir réflecteur en fonction de l'indice à l'aide de la formule de FRESNEL. On peut utiliser aussi comme étalon un clivage poli de *blende* jaune-miel. Les variétés transparentes de ce minéral, exemptes de fer, possèdent en effet le même pouvoir réflecteur, quel que soit l'échantillon envisagé, et celui-ci peut être calculé à partir de l'indice de réfraction seul, l'indice d'absorption étant tout à fait négligeable. Enfin, pour les minéraux de pouvoir réflecteur élevé, le *silicium*, que l'on pré-

pare aujourd'hui industriellement dans un état de pureté satisfaisant, est un excellent étalon que j'utilise maintenant de préférence à la galène en raison de sa plus grande dureté. Comme autres étalons que l'on comparera aux précédents, on se servira avec avantage de la galène, du cuivre gris, du fer. Je donne ci-dessous (fig. 4) les courbes de dispersion du silicium, du cuivre gris et de la blende. On trouvera dans le tableau ci-après, les pouvoirs

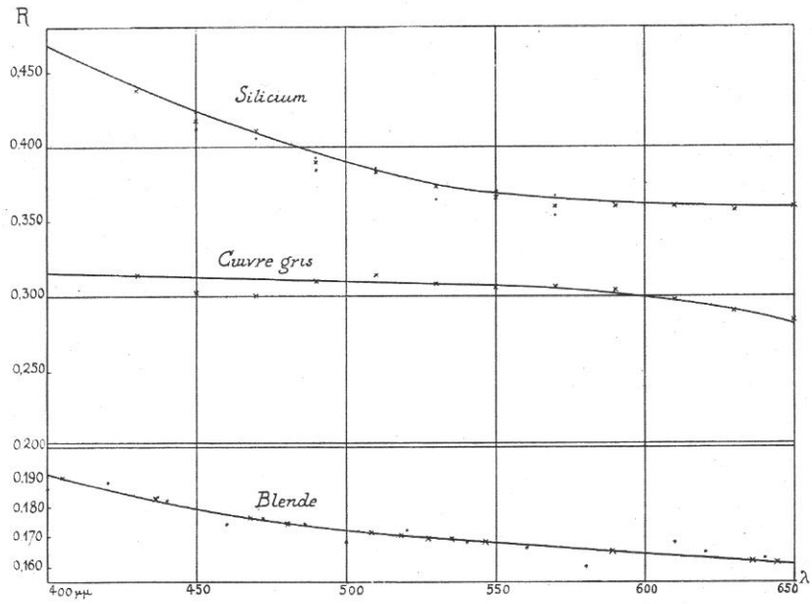

Fig. 4. — Courbe de dispersion du pouvoir réflecteur de la blende, du cuivre gris et du silicium.
Pour la blende, les croix indiquent les valeurs calculées à partir des indices de réfraction; les points représentent les valeurs mesurées par comparaison avec le diamant.

réflecteurs donnés par ces courbes pour plusieurs longueurs d'onde. Les valeurs expérimentales concordent avec celles fournies par les courbes à ± 0,01 près. Très souvent même, on obtient la précision de ± 0,005. Il est à noter que le cuivre gris est remarquablement peu dispersif. Son pouvoir réflecteur ne commence à faiblir notablement que vers l'orangé à partir de 590 μμ. Pour le silicium, la courbe de dispersion met en évidence sa couleur bleutée. Ces deux corps possèdent la dispersion normale des corps transparents, et leur indice d'absorption est vraisemblablement très faible par rapport à leur indice de réfraction.

Conditions expérimentales de la mesure. — Les conditions expérimentales imposées par l'emploi du microscope polarisant dans la mesure des pouvoirs réflecteurs entraînent un certain nombre de conséquences au point de vue de la signification physique du résultat. Nous ne pouvons ici les examiner en détails, mais nous indiquerons sommairement les plus importantes :

1° Tout d'abord, il faut remarquer que le pouvoir réflecteur ainsi obtenu n'est pas rigoureusement celui qui correspond à l'incidence normale. En effet, les faisceaux lumineux fournies par les illuminateurs à glace et à prisme sont convergents, puisque l'objectif interposé entre eux et la section polie doit jouer le rôle de condensateur. Les rayons inclinés sur la normale à la section ne sont donc pas modifiés de la même façon après réflexion

que les rayons rigoureusement normaux. La convergence du faisceau incident dépend de l'ouverture numérique des objectifs employés. Si l'on veut se rapprocher de l'incidence normale, on aura donc avantage à effectuer, autant que possible, la mesure à l'aide d'objectifs peu grossissants.

COURBES DE DISPERSION DU POUVOIR RÉFLECTEUR DES ÉTALONS UTILISÉS ET DE QUELQUES MINÉRAUX.

λ(μμ)	INDICES DE RÉFRACTION.		λ(μμ)	POUVOIRS RÉFLECTEURS.						
	DIAMANT.	BLENDE.		DIAMANT.	BLENDE.	CUIVRE GRIS.	SILICIUM. (à 97%)	STIBINE. R_g.	STIBINE. R_m.	CHALCOPYRITE.
404,7		2,544								
422,6	2,4592	»	410	0,178	0,187	0,315	0,454	»	»	»
430,7	2,4512	»	430	0,177	0,182	0,314	0,440	0,560	0,466	0,230
435,8	»	2,492	450	0,176	0,178	0,312	0,422	0,546	0,456	0,276
467,8	»	2,452	470	0,175	0,175	0,311	0,410	0,534	0,446	0,324
468,0	»	2,451	490	0,1745	0,173	0,310	0,394	0,523	0,440	0,364
472,2	»	2,446	510	0,1735	0,170	0,306	0,384	0,512	0,432	0,402
481,0	»	2,438	530	0,173	0,169	0,305	0,374	0,500	0,428	0,434
486,1	2,435	2,432	550	0,1725	0,167	0,304	0,368	0,492	0,425	0,452
508,6	»	2,414	570	0,172	0,166	0,303	0,364	0,482	0,423	0,460
518,3	»	2,407	590	0,172	0,165	0,302	0,362	0,474	0,422	0,454
527,0	2,4270	2,400	610	0,1715	0,164	0,298	0,361	0,466	0,421	0,440
535,0	»	2,397	630	0,171	0,163	0,290	0,360	0,462	0,420	0,420
546,1	»	2,388	650	0,171	0,162	0,284	0,360	0,460	0,420	0,396
589,6	2,4174	2,369								
589,0	»									
636,3	»	2,350								
643,9	»	2,348								
656,3	2,4101	2,345								
670,8	»	2,340								
686,7	2,4074	»								

La courbe de dispersion du diamant a été construite d'après les valeurs bien concordantes des indices mesurés pour plusieurs longueurs d'onde par DES CLOIZEAUX (**8**), WALTER (**34**) et WÜLFING (**36**); celle de la blende d'après les nombreuses valeurs données par A. BRUN (*Bull. Soc. franç. M.n.*, t. LIII, 1930, p. 41), et quelque valeurs de DES CLOIZEAUX (**8**) et de G. HORN (**14**). Ces valeurs figurent dans les deux premières colonnes. Le pouvoir réflecteur R_p de la stibine est sensiblement le même pour toutes les longueurs d'onde et voisin de 0,306 ± 0,01.

2° Lorsqu'on détermine le polychroïsme de réflexion d'un minéral, il faut orienter convenablement le polariseur. Son plan de polarisation doit être placé dans le plan d'incidence du prisme de l'illuminateur ou perpendiculairement à ce plan. Si l'on effectue les observations avec un objectif tel que l'incidence des rayons réfléchis sur la section polie ne dépasse pas 10°, on obtient les valeurs très voisines pour ces deux positions du polariseur. Si la convergence des rayons est très grande, ces valeurs présentent entre elles une différence plus ou moins accusée, car les pouvoirs réflecteurs correspondant aux vibrations rectilignes situées dans le plan d'incidence de la section et perpendiculaires à ce plan ne sont pas les mêmes. On montre, d'après les courbes exprimant le pouvoir réflecteur en fonction de l'angle d'incidence, que la moyenne arithmétique de ces deux valeurs se rapproche beaucoup du pouvoir réflecteur sous l'incidence normale jusqu'à $i = 60°$ environ, inférieur à l'angle de BREWSTER pour la substance envisagée.

3° La mise au point de la préparation présente une grande importance, et il faut la réaliser exactement à l'aide du réticule de l'oculaire, pour le minéral étudié, puis pour l'étalon, de façon à se placer chaque fois dans les mêmes conditions d'éclairement.

4° Enfin il faut que les surfaces étudiées soient disposées normalement à l'axe optique du microscope. On y parvient, dans la pratique, en les montant dans la cire, au moyen d'une petite presse à main fabriquée par les divers fournisseurs de microscopes métallographiques

On peut parfaire ce montage en se servant du diaphragme placé au foyer de la lentille de l'illuminateur à prisme. Son image dans la surface polie doit rester immobile, quand on fait subir à cette surface, à l'aide de la platine du microscope, un mouvement de rotation dans son plan.

5° Il est bien évident que toutes ces mesures, pour avoir une signification au point de vue de la détermination des espèces, doivent être effectuées sur des plages suffisamment bien polies. Dans la plupart des cas, il est toujours possible de trouver de telles plages, surtout en employant un grossissement un peu élevé ou en diaphragmant la portion utilisée dans la préparation. La méthode permet d'ailleurs d'étudier l'influence du poli sur le pouvoir réflecteur. On trouve ainsi qu'une surface fraîche de clivage possède un pouvoir réflecteur nettement plus élevé que la même surface après polissage, quel que soit le soin apporté à cette opération.

IV. — Quelques résultats.

J'ai énuméré ailleurs (**22**) les diverses questions que la mesure des pouvoirs réflecteurs permettait d'aborder en minéralogie. Je donnerai ci-après les résultats auxquels je suis par-

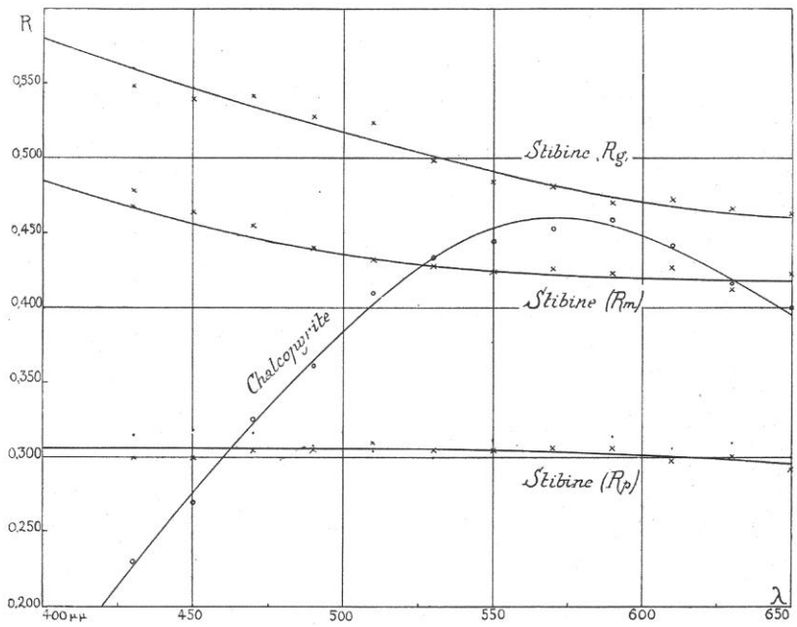

Fig. 5. — Courbes de dispersion des pouvoirs réflecteurs de la stibine pour ses trois directions principales (R_g, R_m et R_p), et de la chalcopyrite, parallèlement à l'axe quaternaire.

Pour la stibine, les mesures ont été faites sur h^1 et sur p. On obtient donc pour R_p deux groupes de valeurs. Elles sont représentées par des croix pour h^1, par des points pour p.

La biréflectence de la chalcopyrite étant extrêmement faible, on obtient dans une direction perpendiculaire à l'axe quaternaire des valeurs très voisines des précédentes.

venu jusqu'à présent ; j'y joindrai ceux obtenus par d'autres minéralogistes à l'aide de la même méthode.

1° *Pouvoirs réflecteurs de quelques espèces minérales* (1). — Le tableau ci-contre résume

(1) Je tiens à remercier vivement ici mon ami S. Pavlovitch de son aide précieuse et dévouée dans la préparation des sections polies et dans la mesure de certains pouvoirs réflecteurs.

POUVOIRS RÉFLECTEURS DE QUELQUES MINÉRAUX OPAQUES OU TRANSPARENTS RÉFRINGENTS

1° Minéraux anisotropes.

NOMS	R_g	R_m	R_p	$R_g - R_p$	$\lambda\mu\mu$
Stibine	0,534	0,446	0,306	0,088	470
Bismuthinite (S. P.)	0,51	?	0,45	0,06	
Molybdénite	0,42		0,20	0,22	460
Pyrrhotite	0,38		0,32	0,06	
Breithauptite (P. P.)	0,457		0,383	0,074	460
	0,464		0,358	0,106	527
	0,515		0,410	0,105	589
Marcasite	0,531		0,515	0,016	460
Mispickel	0,525	0,504	0,495	0,030	460
Safflorite (P. P.)		0,575			460
Chalcocite		0,30			lum. bl.
Stromeyerite		0,33			
Covellite	0,310		0,150	0,160	460
Érubercite (S. P.)	0,215	?	0,195	0,020	460
Chalcostibite	0,478		0,401	0,077	460
Berthiérite (P. P.)	0,474		0,387	0,087	465
	0,432		0,354	0,078	527
	0,423		0,355	0,068	589
Cosalite (F. P.)	0,411		0,311	0,10	lum. bl.
Rezbanyite	0,445		0,348	0,097	lum. bl.
Boulangérite	0,42		0,33		lum. bl.
Bournonite	0,40	0,39	0,38	0,02	460
Proustite	0,346		0,323		460
Pyrargyrite	0,368		0,346		460
Dognacskaïte	0,279		0,204	0,075	lum. bl.
Enargite	0,310	0,277	0,266	0,033	460
Famatinite		0,24			lum. bl.
Stannite		0,24			460
					lum. bl.
					460

NOMS	R_g	R_m	R_p	$R_g - R_p$	$\lambda\mu\mu$
Tellurures (P. F.).					
Nagyagite	0,476		0,426	0,060	460
	0,461		0,410	0,051	527
	0,415		0,388	0,027	589
Sylvanite	0,584		0,535		604
	0,60		0,55		527
	0,61		0,57		589
Calaverite	0,620		0,554		460
	0,66		0,58		527
	0,65		0,59		589
Krennerite	0,70		0,632		460
	0,70		0,632		527
	0,76		0,69		589
Hessite		0,410			400
		0,388			527
		0,378			589
Oxydes divers et minerais oxydés de manganèse.					
Ténorite (S. P.)		0,195			460
Hématite	0,320				460
Gœthite		0,16			lum. bl.
Cassitérite	0,124		0,11	0,014	
Rutile	0,25		0,21	0,04	lum. bl.
Crichtonite	0,186		0,172	0,014	
Polianite	0,397		0,295	0,102	
Manganite	0,210	0,175	0,152	0,058	
Hausmannite	0,189	0,175	0,164	0,025	
Braunite	0,217		0,204	0,013	
Hollandite	0,348		0,296	0,052	465
Romanéchite	0,306		0,250	0,056	
Coronadite	0,344		0,306	0,038	
Chalcophanite	0,297		0,106	0,191	
Hétærolite	0,170		0,147	0,023	

2° Minéraux isotropes.

NOMS	R	$\lambda\mu\mu$
Cuivre	0,395	460
Argent	0,865	460
Platine	0,70	lum. bl.
Blende	0,177	460
Pentlandite	0,42	
Pyrite	0,43	460
	0,54	589
Smaltite (P. P.)	0,58	460
Skutterudite	0,605	460
	0,619	589

NOMS	R	$\lambda\mu\mu$
Galène	0,480	460
	0,425	589
Argyrite	0,336	
Altaïte (P. F.)	0,72	460
	0,70	527
	0,64	589
Petzite (P. F.)	0,415	460
	0,394	527
	0,385	589

NOMS		$\lambda\mu\mu$
Coloradoïte (P. F.)	0,371	460
	0,364	527
	0,376	589
Linnéite	0,462	0μ,460
Polydymite	0,482	460
Panabase	0,310	470
Magnétite	0,225	460
Cuprite (S. P.)	0,305	460
Manganosite	0,144	460
Jacobsite	0,193	460

S. P. — S. Pavlovitch (**27**).
F. P. — F. Papp (**26**).
P. F. — P. Fastré (**12**).
P. P. — P. Piepoli (**28**).

Les mesures des deux derniers groupes (P. F., P. P.) ont été recalculées en prenant pour pouvoir réflecteur du silicium la valeur de 0,415 donnée par la courbe de dispersion pour 0 μ, 460.

les valeurs trouvées pour la lumière bleue (0 μ, 460) sous l'incidence fournie par les objectifs faiblement grossissants (nos 2 ou 3 de LEITZ ou de REICHERT). Ces chiffres sont encore valables pratiquement pour les objectifs 5 (grossissement propre 35 environ). Dans le cas des minéraux anisotropes, la section principale du polariseur était placée dans le plan d'incidence du prisme de l'illuminateur. Le pouvoir réflecteur ainsi mesuré sera donc, en général, un peu supérieur au pouvoir réflecteur sous l'incidence normale.

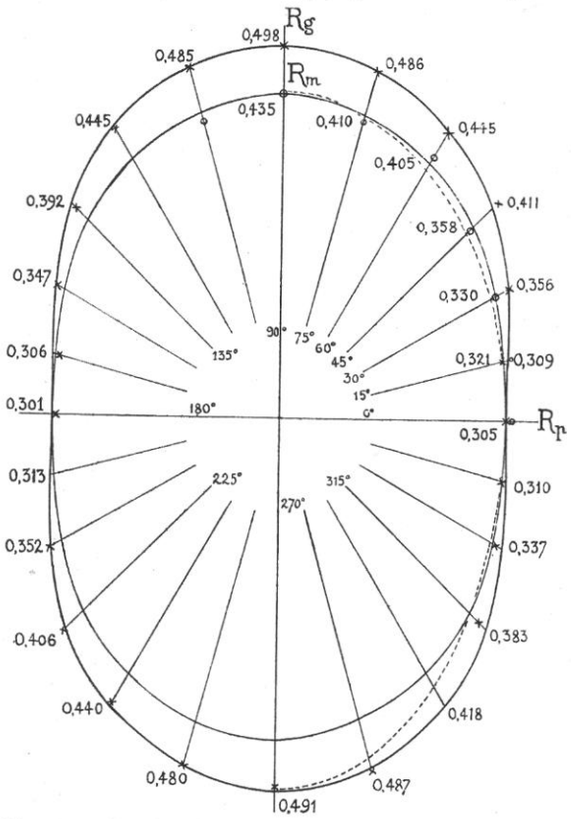

Fig. 6. — Courbes des pouvoirs réflecteurs sur les faces h^1(100) et p(001) de la stibine. Le plan h^1 correspond à R_g et R_p; le plan p, à R_m et R_p.

2° *Dispersion du pouvoir réflecteur.* — Outre les courbes des étalons dont il a été question précédemment, j'ai construit celles de la stibine et de la chalcopyrite. Les valeurs expérimentales concordent avec celles fournies par les courbes à ± 0,01 ou ± 0,005 près. Ces courbes montrent que la stibine est douée de la dispersion normale, comme les corps transparents, et que son plus petit pouvoir réflecteur n'est pas dispersé et est très voisin de 0,306-0,310 pour toutes les longueurs d'onde. Il se comporte comme celui du cuivre gris. De plus, on remarque que la dispersion de biréflectence décroît quand λ augmente. D'autre part, la chalcopyrite possède la dispersion anormale des corps à indice d'absorption élevé, et la courbe présente un maximum très net dans le jaune pour 0 μ, 570 (fig. 5).

3° *Surface des pouvoirs réflecteurs.* — J'ai commencé l'étude de cette surface pour la stibine. La figure ci-jointe condense les résultats obtenus, pour λ = 0 μ, 530, dans les faces h_1 (100) et p (001) et dans les azimuts faisant entre eux des angles de 15°. Dans le plan $h_1(R_g, R_p)$, la courbe s'écarte sensiblement d'une ellipse (tracée en pointillés dans le quart Sud-Est de la figure 6). Dans le plan $p(R_m, R_p)$, la courbe est très voisine d'une ellipse (pointillé du quart Nord-Est de la figure) ; les écarts observés sont de l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales. Ces résultats complètent ceux que j'ai donnés en 1930 pour la lumière blanche et diffèrent légèrement de ceux obtenus par A. CISSARZ (**6, 7**) avec la méthode oculaire de BEREK, car le renflement présenté par la courbe R_gR_p n'est pas aussi accentué que ne l'indique cet auteur.

J'espère avoir montré, au cours de cet exposé, comment la mesure des pouvoirs réflecteurs en sections polies permet de comprendre en grande partie la notion d'éclat des minéraux et aide à en disséquer la complexité. Elle est, dans le cas des minéraux opaques, un élément important sinon primordial de leur détermination au microscope, et rien qu'à ce titre déjà il est nécessaire de s'attacher à son étude.

BIBLIOGRAPHIE

1. BEREK (M.), Das Problem der quantitativen Mikroskopie der Erzmineralien und seine Lösung. Zugleich ein Beitrag zu den Erscheinungen der Reflexion des Lichtes an anisotropen absorbierenden Kristallen (*Zeitschr. f. Krist.*, Bd. LXXVI, 1931, p. 396-430 ; Bd LXXVII, 1931, p. 1-22).
2. BEREK (M.), Elementare Einführung in die Optik absorbierenden Kristalle und in die Methodik ihrer Bestimmung im reflektierten Licht (*Centralb. f. Miner.*, 1931, A, p. 198-209).
3. BOUTRY (G.-A.) et ORCEL (J.), Remarques sur la comparaison des propriétés des cellules à vide et des cellules à atmosphère gazeuse (*C. R. Acad. Sc.*, 26 février 1934, t. CXCVIII, p. 808).
4. BOUTY (E.), Microphotomètre enregistreur à cellule photoélectrique de MM. P. Lambert et D. Chalonge (*Revue d'Optique*, t. V, 1926, p. 404-420).
5. CISSARZ (A.), Beitrage zur Kenntnis der komplexen Indikatrix von Antimonglanz (*Zeit. f. Krist.*, Bd. LXXVIII, 1931, p. 445-461).
6. CISSARZ (A.), Optische Messungen an Antimonglanz (*Neues Jahr. f. Miner.*, Beil. Bd. LXIV, A, 1931, p. 137-162).
7. CISSARZ (A.), Reflexionsmessungen an absorbierenden Kristallen, mit besonderer Berücksichtigung der Erzmineralien (*Zeit. f. Krist.*, t. LXXXII, 1932, p. 438-450).
8. DES CLOIZEAUX, Nouvelles recherches sur les propriétés optiques des cristaux (*Mém. de l'Acad. Sc.*, t. XVIII, 1867, p. 515-517).
9. DRUDE (P.), Lehrbuch der Optik ; Handbuch der Physik (de Winckelmann), 6.
10. DRUDE (P.), Beobachtung über die Reflexion des Lichtes am Antimonglanz (*Wied. Ann.*, t. XXXIV, 1888, p. 483).
11. DUNOYER (L.), La cellule photoélectrique et ses applications (*La Technique moderne*, t. XXII, n° 4, p. 137, n° 5, p. 179, n° 6, p. 212, 1930) ; *Comptes Rendus du Congrès international d'Électricité*, Paris, 1932, 1re sect., p. 169-201.
12. FASTRÉ (P.), Mesure des pouvoirs réflecteurs de quelques tellurures naturels par la méthode photoélectrique (*C. R. Acad. Sc.*, t. CXCVI, 1933, p. 630-632).
13. FRICK (M.), Reflexionsmessungen an Erz- und Metallanschliffen mit Hilfe eines Reflexions-Photometer Okulars (*N. Jahrb. f. Min.*, Beil. Bd. LXI, A, 1930, p. 31-86).
14. HORN (G.), Beiträge zur Kenntnis der Dispersion des Lichtes in absorbierenden Krystallen (Inaug. Diss.) (*Neues Jahrb. f. Miner.*, 1898, Beil. Bd. XII, p. 269-342).
15. HUTCHINSON (A.), Die optischen Eigenschaften des Antimonits (*Zeitschr. f. Kryst.*, t. XLIII, 1907, p. 464).
16. KŒNIGSBERGER (J.), Ueber einen Apparat zur Erkennung und Messung optischer Anisotropie undurchsichtiger Substanzen und dessen Verwendung (*Zentralb. f. Miner.*, 1901, p. 195 ; 1908, p. 565-597 ; 1909 p. 245 ; 1910, p. 712).
17. KŒNIGSBERGER (J.), Ueber Messungen des Reflexionsvermögens und Bestimmung der optischen Konstanten (*Ann. d. Phys.*, t. XLIII, 1914, p. 1205).
18. MULLER (ERICH C.), Optische Studien am Antimonglanz (*Neues Jahrb. f. Miner.*, Beil. Bd. XVII, 1903 p. 187-251).
19. ORCEL (J.), Les méthodes d'examen microscopique des minerais métalliques (*Bull. Soc. Fr. Min.*, t. XLVIII, 1925, p. 272-361 5, planches hors texte) ; *Revue de Métallurgie*, t. XXXIII, 1926, p. 537-551, 1 planche en couleurs, et 618-626 ; *Bull. Soc. d'Encour. pour l'Industr. nat.*, juin 1928, p. 503-527 ; *La Technique moderne*, t. XXI, 1929, p. 727-741 ; 781-786 ; t. XXII, 1930, p. 233-237, 649-654 ; t. XXXIII, 1931, p. 549-544 ; *in* Introduction aux Études minières coloniales, Paris, 1934, p. 209-253, 5 planches (*Publ. du Bur. d'Ét. géol. et min. coloniales*).

20. Orcel (J.), Sur l'emploi de la pile photoélectrique pour la mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques (*C. R. Acad. Sc.*, t. CXXXV, 1927, p. 1055-1057).

21. Orcel (J.), Remarques sur la mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques et des minéraux transparents très réfringents (*C. R. Acad. Sc.*, t. CLXXXVII, 1928, p. 1141).

22. Orcel (J.), La mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques à l'aide de la cellule photoélectrique et ses applications (*Bull. Soc. fr. Min.*, t. LIII, 1930, p. 301-349).

23. Orcel (J.), Sur l'existence de la coronadite dans les minerais de manganèse de Bou Tazoult (région de l'Imini, Maroc) (*C. R. Acad. Sc.*, t. CXCIV, 1932, p. 1956).

24. Orcel (J.) et Berthelot (C.), Les Minerais, étude, préparation mécanique, marché. Paris, Baillière, 1930, 544 pages, 24 planches hors texte, 156 figures.

25. Orcel (J.) et Pavlovitch (S.), Les caractères microscopiques des oxydes de manganèse et des manganites naturels (*Bull. Soc. Fr. Min.*, t. LIV, 1931, p. 108-179).

25bis. Orcel (J.) et Fastré (P.), Courbes de dispersion de quelques étalons de pouvoirs réflecteurs utilisables dans l'étude microscopique des minerais métalliques (*C. R. Acad. Sc.*, t. CC, 1935, p. 1485-1488).

26. Papp (F.), Neuere Angaben über ungarische Erze (*Földtani Kozlöny*, t. LXII, 1932, p. 57-64, Budapest, 1933).

27. Pavlovitch (S.), Étude microscopique de quelques minerais métalliques de Yougoslavie (*Bull. Soc. franç. Min.*, t. LV, 1932, p. 125-138, 6 planches hors texte).

28. Piepoli (P.), Étude microscopique de quelques minerais des filons argentifères du Sarrabus (Sardaigne) (*Bull. Soc. franç. Min.*, t. LVI, 1933, p. 277-302).

29. Piepoli (P.), Studio micrografico di minerali complessi delle vecchie miniere di cobalto di Usseglio (Valle di Viiù) (*Periodico di Mineralogia*, t. V, 1934, p. 141-153).

30. Sampson (Ed.), The determination of anisotropism in metallic minerals (*Econ. Geol.*, vol. XVIII, 1923, p. 775-777 ; vol. XXIV, 1929, p. 415).

31. Schneiderhoehn (H.), Ein neues Photometerokular zur Messung des Reflexionsvermögens in Erzanschliffen (*Zentralb. f. Min.*, 1928-A, p. 394-396).

32. Schneiderhoehn (H.) et Ramdohr (P.), *Lehrbuch der Erzmikroskopie*, Bd. II, 714 pages, 1 planche en couleurs, 242 figures ; Berlin (Borntræger), 1931, Bd. I, H. I, 312 pages, 2 planches en couleurs, 145 figures, Berlin, 1934 ; *Bestimmungstabellen*, p. 1-47, Berlin, 1931.

Le tome I est consacré aux méthodes ; le tome II, aux caractères microscopiques de toutes les espèces minérales opaques.

33. Voigt (H.), *Göttinger Nachrichten*, 1902, p. 1, d'après Pockels, *Lehrbuch der Kristalloptik*, Berlin, 1906.

34. Walter, *Wied. Ann.*, t. LXII, 1891, p. 510.

35. Wright (F. E.), Polarized Light in the study of ores and metals (*Proceedings of Amer. Phil. Soc.*, t. LVIII, n° 7, 1919, p. 401-447).

36. Wülfing, Apparate zur optischen Untersuchung der Mineralien und neue optische Bestimmungen am Diamant und Eisenglanz (*Tschermak's Miner. u. Petr. Mitt.*, t. XV, 1896, p. 49-76).

Explication de la planche hors texte

Cette planche est destinée à donner une idée approchée du pouvoir réflecteur de quelques minéraux et du polychroïsme de réflexion que présentent certains d'entre eux. Les photographies ont été faites en lumière polarisée rectilignement, au grossissement de 72. Les pouvoirs réflecteurs indiqués sont ceux de la lumière bleue.

Polychroïsme de réflexion dans les minéraux opaques.

Fig. I. — Stibine d'Ersa (Cap Corse). La biréflectence maximum de la stibine étant de l'ordre de 0,24, le polychroïsme de réflexion est nettement visible au microscope dans un agrégat de cristaux d'orientations différentes et dévoile sa structure. Dans l'exemple choisi, celle-ci est grenue.

Fig. II. — Covellite de Bor (Serbie). Comme pour la stibine, un agrégat de cristaux de covellite met en évidence d'une façon remarquable le polychroïsme intense du minéral. Les plages grises sur la photographie sont en réalité bleu plus ou moins intense. Ici, la structure est lamellaire.

Différences de pouvoirs réflecteurs entre les constituants d'un minerai métallique.

Fig. III. — Minerai plombo-zincifère et argentifère de Rudnik (Serbie). Plages blanches ; galène (P. R. 0,480), plages grises : panabase argentifère (P. R. 0,30). Plages gris foncé : blende (P. R. 0,177). En haut à droite, cerclée d'un liséré noir, plage de pyrite de fer en relief (couleur crème, P. R. 0,47 pour le jaune).

Fig. IV. — Constituants de pouvoirs réflecteurs élevés dans un minerai cobalto-argentifère de Hayleyburg (Ontario). Plages blanches d'argent natif (P. R. 0,865). Plages grises de smaltite (P. R. 0,58).

Polychroïsme de réflexion dans les minéraux transparents.

Fig. V. — Rutile, région de Dschang, Cameroun. Les macles polysynthétiques que présentent ce minéral sont mises en évidence avec beaucoup de netteté (P. R. 0,25 et 0,21).

Fig. VI. — Cipolin de la région de Midongy de l'Ouest (Madagascar). La calcite, très biréfringente, est aussi très biréflectente, mais ses pouvoirs réflecteurs sont faibles. Cette figure montre un agrégat de cristaux maclés dont la structure est nettement dévoilée (P. R. 0,060 et 0,038).

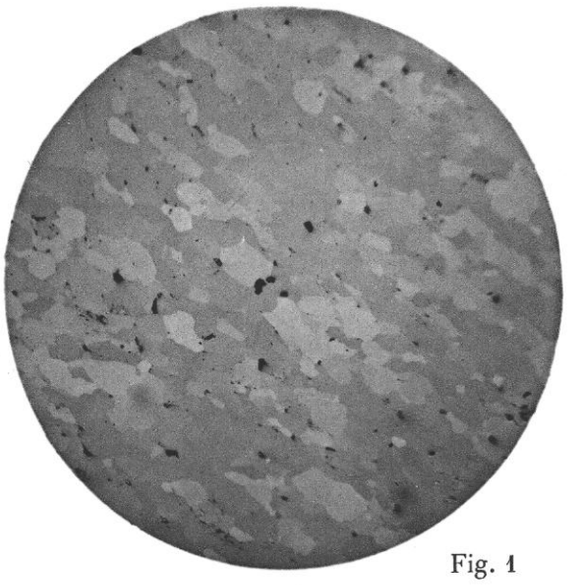

Fig. 1

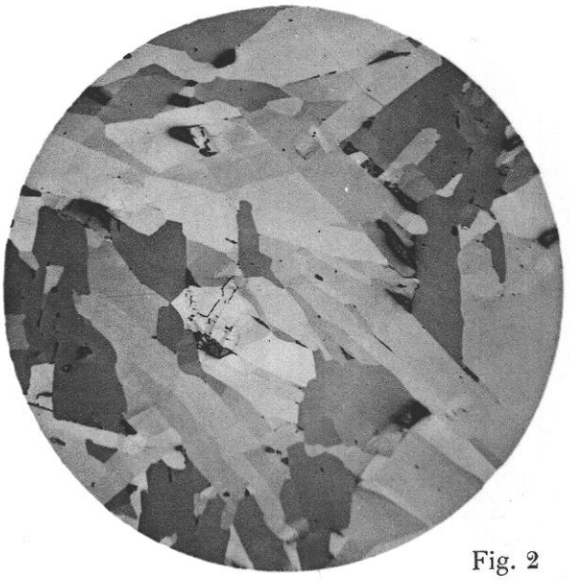

Fig. 2

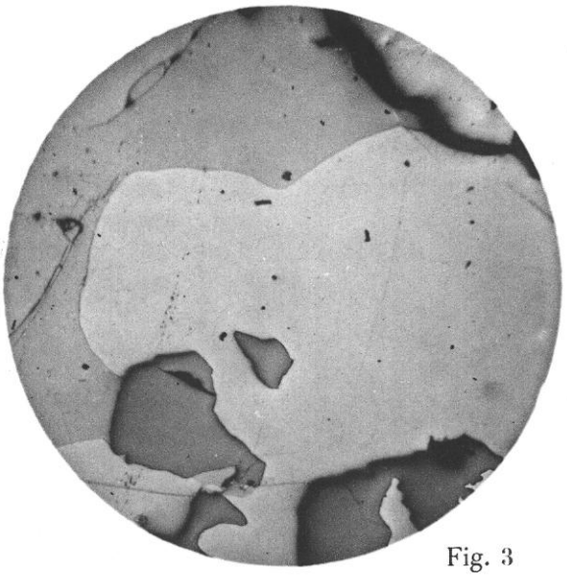

Fig. 3

Fig. 4

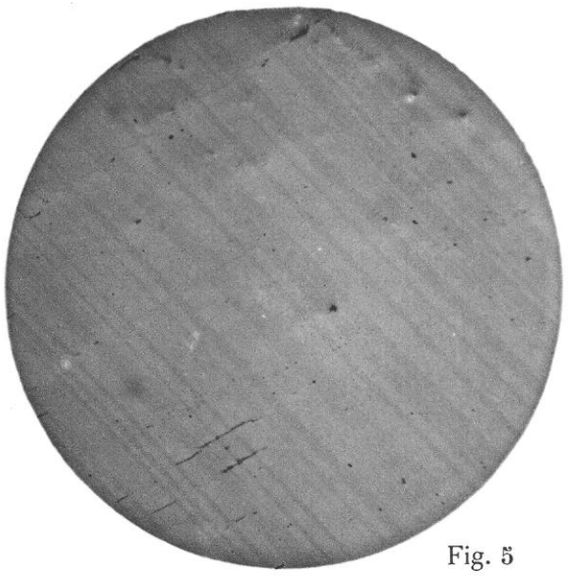

Fig. 5

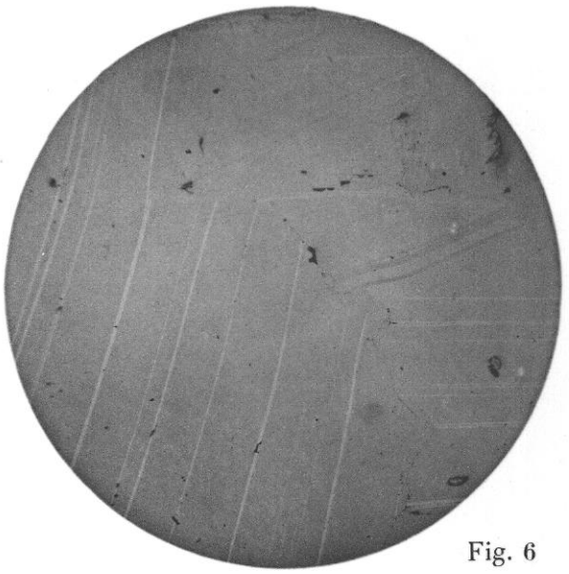

Fig. 6

Clichés Pavlovitch.

Pouvoirs réflecteurs de quelques minéraux
en sections polies.

IMP. H. BIENAIMÉ - ASNIÈRES