

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur(s)	Bertrand, Léon (1869-1947)
Auteur(s) secondaire(s)	Cellerier, F. (18..-19..), Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Exposé pratique des méthodes optiques pour l'étude microscopique des roches
Adresse	Paris : Imprimerie Chapelot, 1918
Collation	1 vol. (50 p.) : ill. ; 25 cm
Nombre de vues	68
Cote	CNAM-BIB 8 Ku 108 (7)
Sujet(s)	Génie industriel -- 20e siècle Optique
Thématique(s)	Histoire du Cnam Matériaux
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	10/04/2025
Notice complète	https://www.sudoc.fr/113063687
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8KU108.7

Ku
108

8° Ku 108 (7)

MINISTÈRE DE L'ARMEMENT ET DES FABRICATIONS DE GUERRE
Direction des Inventions, Études et Expériences techniques

Mission d'Essais, Vérifications et Expériences techniques

LABORATOIRE D'ESSAIS

du Conservatoire National des Arts et Métiers

Exposé pratique des Méthodes optiques
pour l'Étude microscopique
des Roches

PAR

LÉON BERTRAND

Professeur à l'École Normale Supérieure
Membre de la Commission des Produits Céramiques et Réfractaires

AVANT-PROPOS

DU

Chef d'Escadron F. CELLERIER

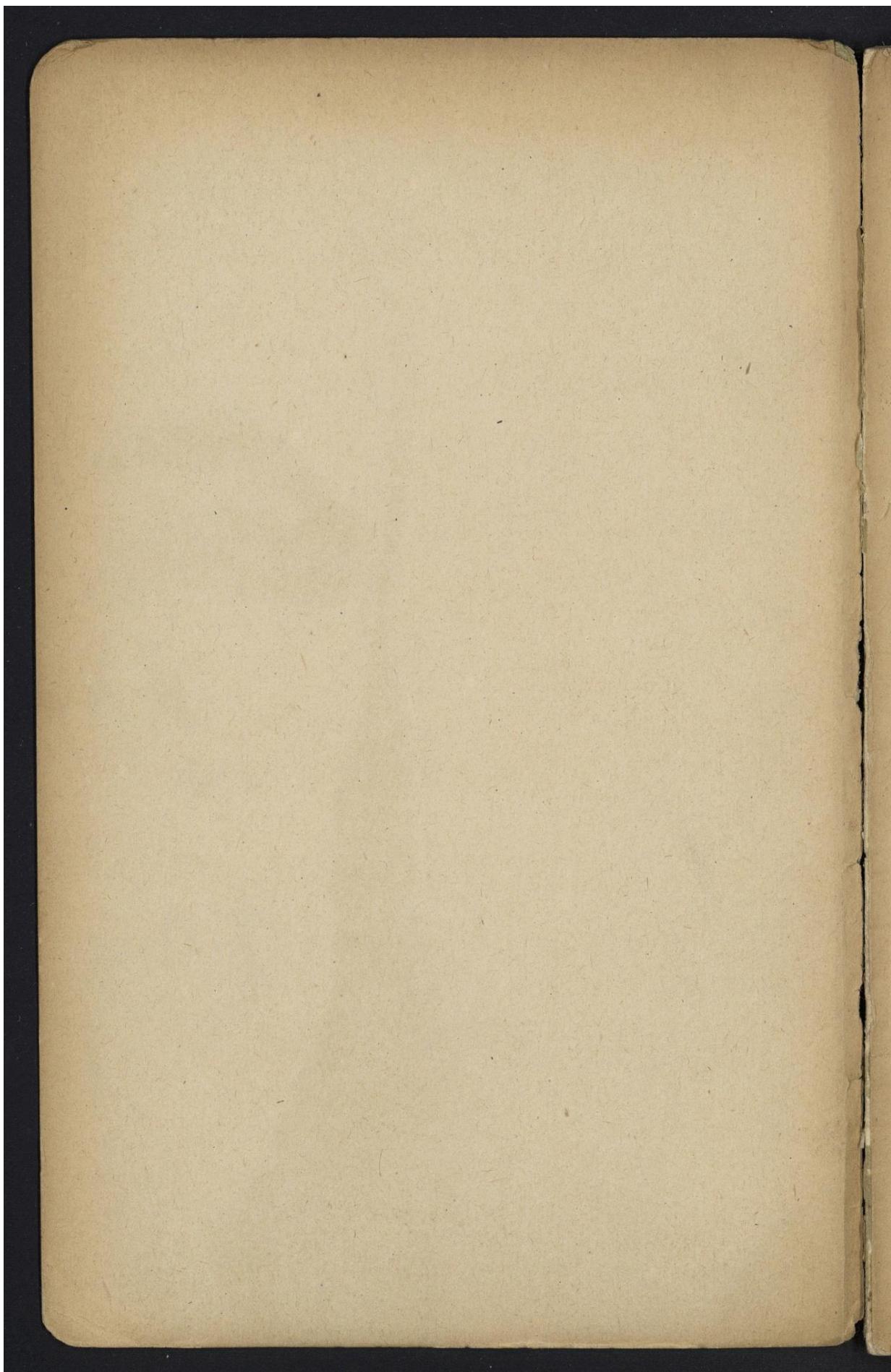
Président de la Commission des Produits Céramiques et Réfractaires



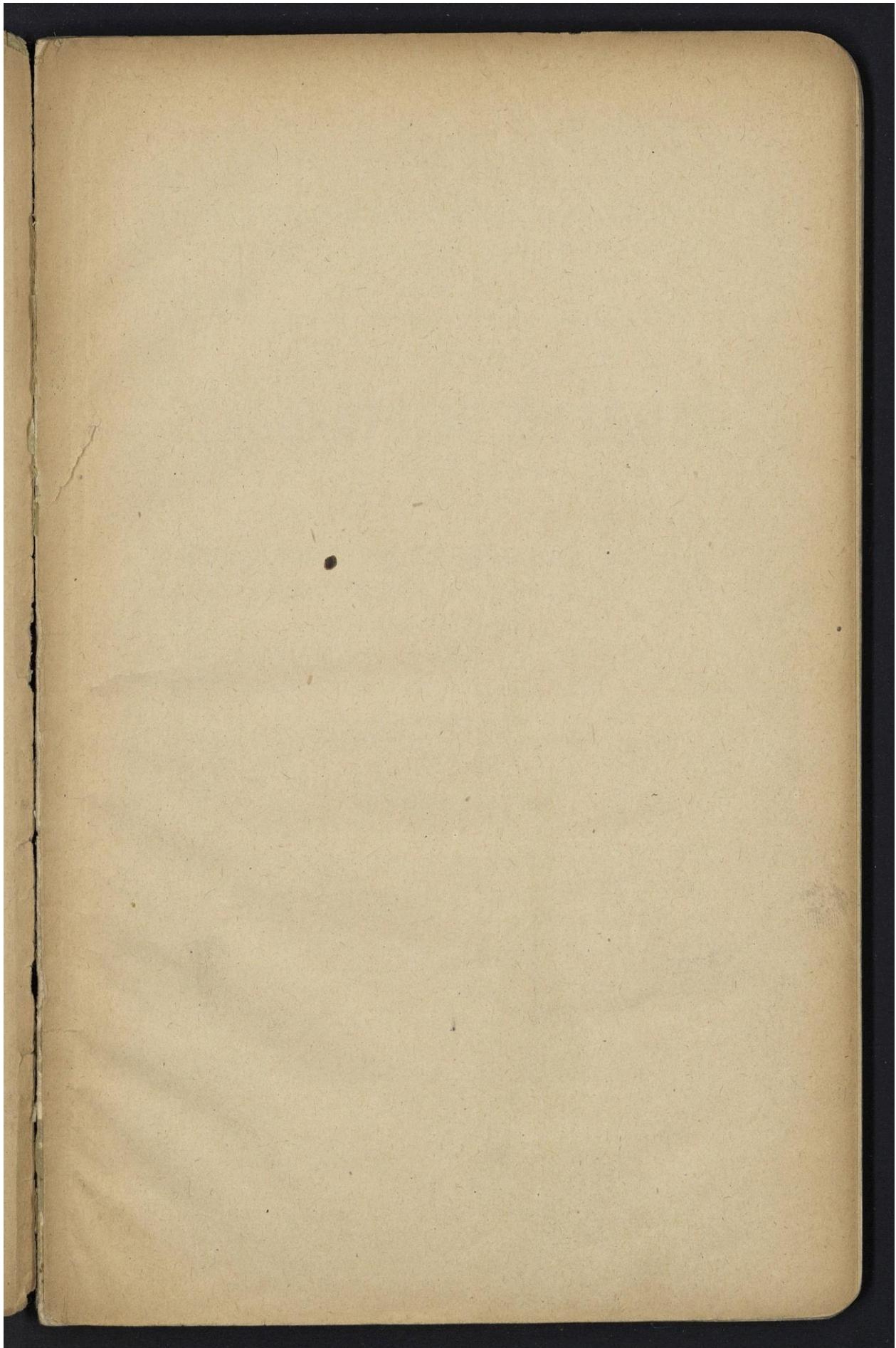
IMPRIMERIE CHAPELOT
PARIS - NANCY

1918

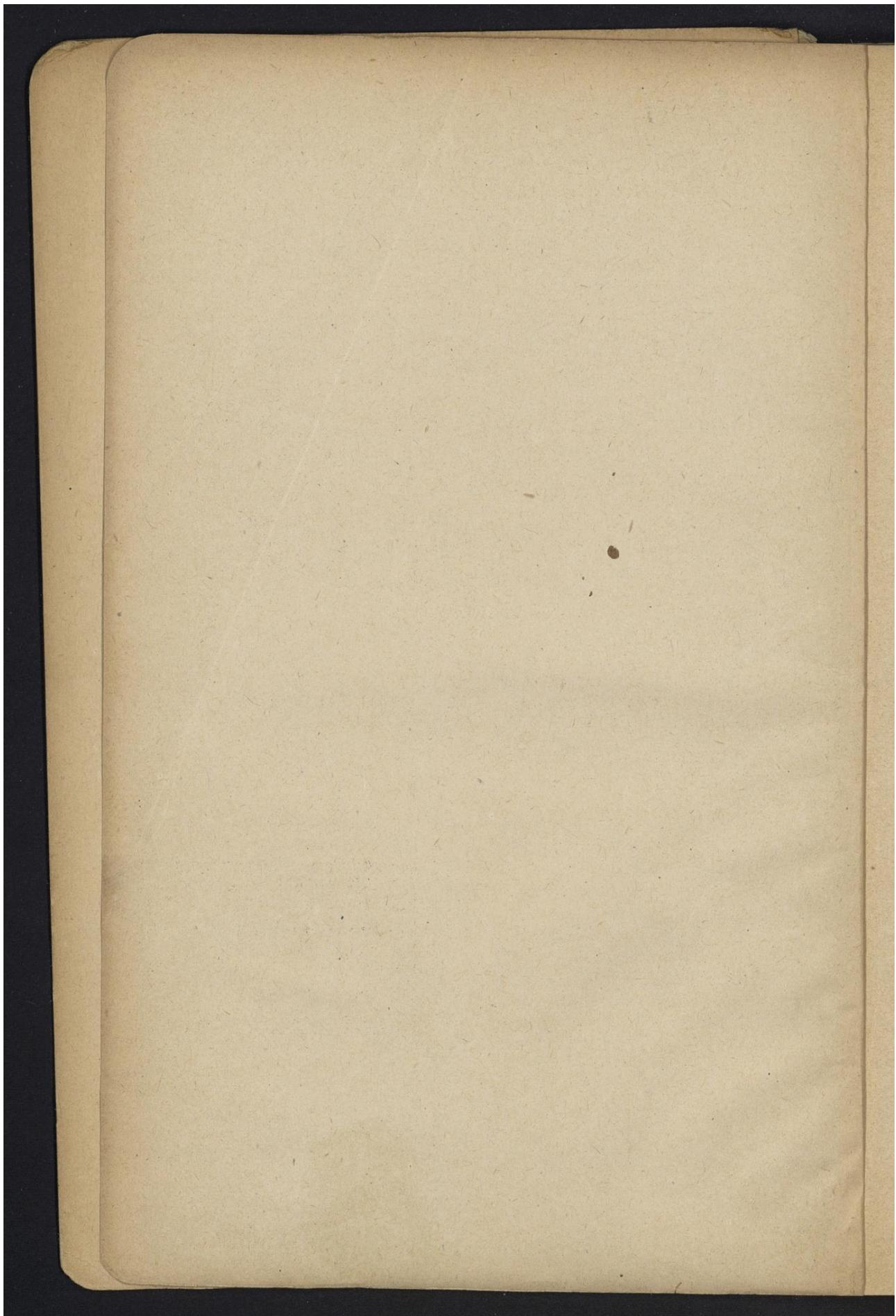




Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

8° Ru 108⁽⁷⁾

MINISTÈRE DE L'ARMEMENT ET DES FABRICATIONS DE GUERRE
Direction des Inventions, Études et Expériences techniques

Mission d'Essais, Vérifications et Expériences techniques

LABORATOIRE D'ESSAIS

du Conservatoire National des Arts et Métiers

Exposé pratique des Méthodes optiques
pour l'Étude microscopique
des Roches

PAR

LÉON BERTRAND

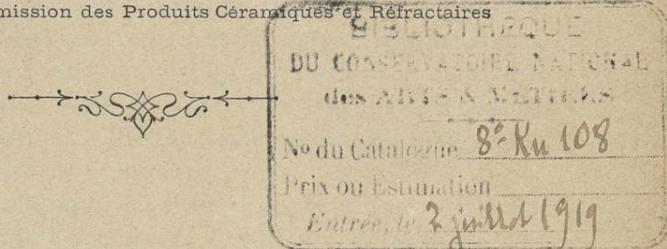
Professeur à l'École Normale Supérieure
Membre de la Commission des Produits Céramiques et Réfractaires

AVANT-PROPOS

DU

Chef d'Escadron F. CELLERIER

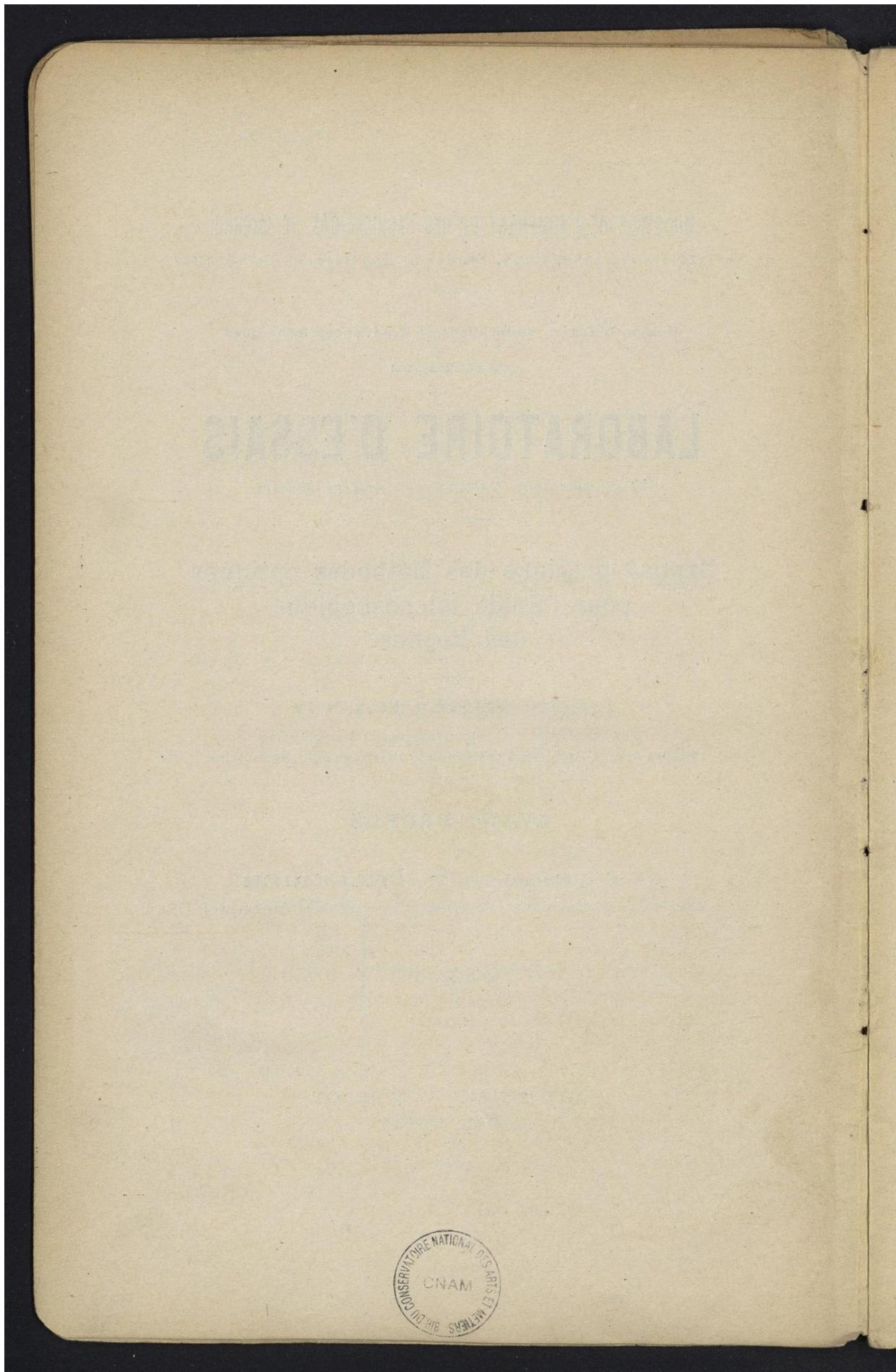
Président de la Commission des Produits Céramiques et Réfractaires



IMPRIMERIE CHAPELOT

PARIS - NANCY

1918



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

AVANT-PROPOS

On sait que notre industrie métallurgique, qui utilise pour les revêtements de ses fours des quantités relativement importantes de briques de silice, était, avant la guerre, presque entièrement tributaire de l'Allemagne pour la fourniture de ces produits.

La fabrication des briques de silice, en effet, avait été l'objet chez nos ennemis, notamment dans ces dernières années, d'une longue mise au point, comportant de minutieuses et systématiques études scientifiques et pratiques, portant sur les matières premières, les procédés de fabrication, les modes d'utilisation de ces briques.

Cette mise au point, il faut malheureusement le reconnaître, avait manqué à nos fabricants de produits réfractaires. Aussi, lorsque commença la période de fabrication intensive du matériel et des munitions, imposée par le caractère moderne de la guerre, se produisit-il, au début, une crise sur la fabrication des produits réfractaires, surtout quant à la qualité des produits. Cette crise eut sa répercussion naturelle sur la durée du fonctionnement des fours, c'est-à-dire, en fin de compte, sur la production même des aciéries.

Les défauts de qualité tenaient à la fois à des erreurs de technique dans la fabrication et à l'emploi de matières premières très variées et très différentes les unes des autres, comme structure et origine géologique. La même question s'est d'ailleurs posée chez nos Alliés, même chez ceux où avait pris naissance la fabrication des briques « Dinas », fabrication qui était restée à peu près exclusivement empirique.

La Commission technique des Produits Céramiques et Réfractaires du Ministère de l'Armement, constituée dès que les circonstances l'ont permis, en vue d'étudier les moyens susceptibles de remédier à cette grave situation, a aussitôt décidé qu'il était indispensable d'instituer des recherches systématiques, tant sur les matières premières de notre sous-sol, dans le but

de déterminer celles qui sont susceptibles d'un bon emploi, que sur les procédés de fabrication, dans l'intention de les améliorer sans retard. Ces utiles recherches, entreprises, pour la Commission, au Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers, à propos des briques de silice, devront d'ailleurs être généralisées, sur beaucoup de nos produits céramiques; nos Alliés anglais et américains se sont résolument engagés dans cette voie..

A côté des essais chimiques, physiques et mécaniques habituellement effectués sur les matières premières employées, puis sur les briques fabriquées, une place importante doit revenir aux études pétrographiques. Seules ces dernières permettent, en effet, de définir la *structure intime* des matières premières, et de reconnaître les caractères qui différencient des matières ayant une même composition chimique, tout en présentant parfois des propriétés entièrement différentes dans leur emploi; en outre, l'examen pétrographique, au microscope polarisant, permet de suivre les transformations de la matière première au cours de la cuisson et de l'emploi ultérieur des produits dans les fours métallurgiques, et, par suite, d'être un guide précieux pour la fabrication.

Mais, jusqu'ici, ces études pétrographiques sont restées le privilège d'un très petit nombre d'initiés, alors que leur généralisation dans les méthodes industrielles d'essais serait très désirable. Cela s'explique à la fois par le fait que ces études supposent des connaissances d'optique physique assez étendues qui, dans les traités de technique pétrographique destinés aux spécialistes, sont d'ordinaire beaucoup trop développées, et par le fait que ces traités s'étendent sur des finesse de technique inutiles pour une bonne pratique courante, en vue des usages industriels. Le débutant est souvent ainsi dans l'impossibilité de faire le choix de ce qui lui est indispensable tout en présentant le degré de rigueur nécessaire.

Aussi, soucieuse de familiariser nos industriels avec des procédés de recherches et de contrôle trop peu connus en France, la Commission a-t-elle invité l'un de ses membres, le professeur Léon BERTRAND, éminent spécialiste de la question, à exposer de la façon la plus simple possible, mais cependant avec la précision scientifique indispensable, les méthodes qu'une longue pratique lui a montré être suffisantes, dans les cas courants,

pour déterminer les *caractères optiques usuels des minéraux des roches, naturelles et artificielles.*

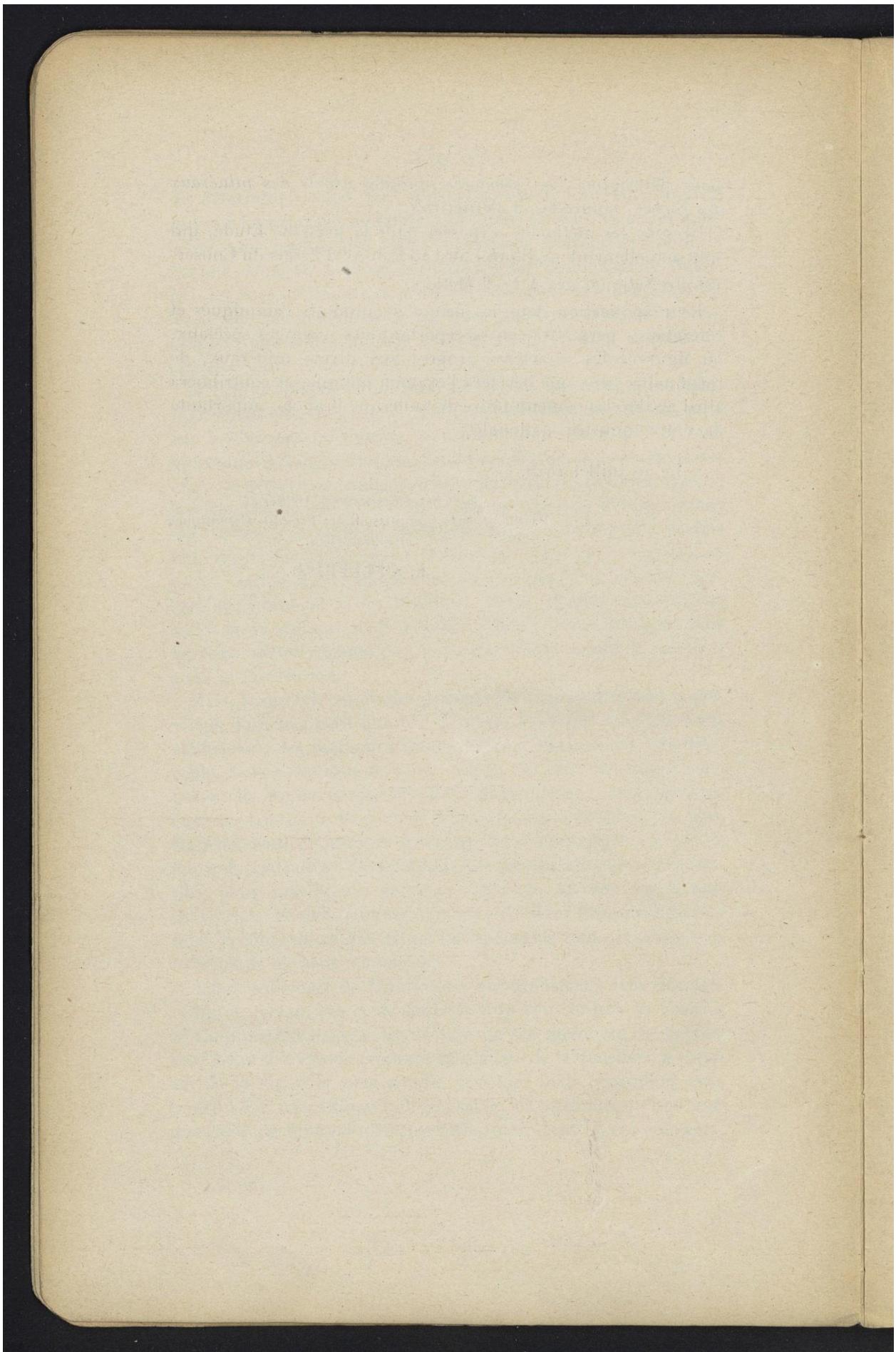
Ce sont ces méthodes, exposées dans la présente Etude, qui sont actuellement appliquées au Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers.

Leur application dans les usines de produits céramiques et réfractaires permettra, en se reportant aux ouvrages spéciaux, où figurent les caractères propres aux divers minéraux, de reconnaître ceux que décèlera l'examen optique, et contribuera ainsi au développement désiré de toute une branche importante de notre industrie nationale.

Le 20 juillet 1918.

*Le Chef d'Escadron d'Artillerie,
Président de la Commission des Produits Céramiques
et Réfractaires,*

F. CELLERIER.



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

INTRODUCTION

Le but de l'examen microscopique d'une roche, soit naturelle (roche éruptive, sédimentaire ou métamorphique), soit artificielle (une brique de silice, par exemple), est la détermination précise des *minéraux constituants* de la roche et de sa *structure*, c'est-à-dire de la manière dont ces éléments y sont associés. Cet examen nécessite l'appréciation d'une série de caractères, visibles les uns en lumière ordinaire ou *naturelle*, les autres en lumière *polarisée*, où les sections des divers minéraux observables dans la préparation prennent des teintes spéciales; cette préparation doit être une lame très mince à faces parallèles.

Les méthodes fondamentales d'étude ont été établies par les Maîtres de l'école pétrographique française : Fouqué, Michel-Lévy et A. Lacroix. Elles seront résumées ici, dans un sens aussi pratique que possible. Pour une étude plus complète de ces méthodes et pour l'énumération des caractères distinctifs des différentes espèces minérales, le lecteur devra se reporter aux ouvrages classiques (1).

Il ne saurait d'ailleurs être question d'étudier ainsi, une à une, toutes les sections cristallines existant dans une lame mince; cela serait, non seulement pratiquement impossible, mais même inopérant. Il est nécessaire de reconnaître, dans un premier examen sommaire, quelles sont les sections de la lame mince qui appartiennent à *un même minéral*, et cela malgré les différences de leurs teintes de polarisation tenant, comme nous le verrons, au fait que leurs éléments de symétrie cristallographique sont diversement situés par rapport au plan de la préparation, et aussi aux changements d'orientation de celle-ci sur la platine du microscope.

Ce n'est qu'ensuite et par une étude comparative de ces diverses sections d'un même minéral, que l'on arrivera à sa détermination. Le plus souvent, celle-ci ne pourra se faire avec certitude que sur quelques-unes de ces sections, les autres ne pouvant donner que des

(1) FOUQUÉ et MICHEL-LÉVY. — *Minéralogie micrographique*.
MICHEL-LÉVY et A. LACROIX. — *Les Minéraux des Roches*.
A. LACROIX. — *Minéralogie de la France et de ses Colonies*.
DUPARC et PEARCE. — *Traité de Technique minéralogique et pétrographique*.

présomptions, surtout à un observateur encore peu expérimenté. Il faut donc apprendre à trouver rapidement celles des sections qui sont convenablement orientées et qui donneront des caractères décisifs.

Ensuite, dans l'examen plus approfondi, il faut constamment faire appel, suivant les circonstances, à tel ou tel caractère, tiré soit de l'observation sans nicol ou avec un seul nicol, soit de l'examen entre deux nicols, celui-ci se faisant d'ailleurs, suivant le cas, en lumière parallèle ou convergente.

L'examen au microscope polarisant est donc une opération réclamant la connaissance approfondie des méthodes qu'il y aura lieu d'appliquer suivant les cas et des caractères optiques des nombreux minéraux qu'on peut être appelé à rencontrer. On ne peut assimiler un tel examen aux essais physiques et chimiques par exemple, pour lesquels, une fois le mode opératoire bien établi sur des données scientifiques, une technique appropriée donne des résultats toujours comparables, d'une façon pour ainsi dire presque automatique, avec un opérateur simplement adroit et consciencieux. Ici, *la mise en œuvre de la technique reste elle-même une opération scientifique*.

Il est d'ailleurs évident que, dans la pratique, surtout quand on étudie un groupe de roches très voisines les unes des autres et ne renfermant qu'un petit nombre de minéraux usuels (ce sera le cas, par exemple, pour les briques de silice), le coup d'œil acquis par l'expérience permettra de les diagnostiquer facilement. Mais il sera toujours utile et souvent nécessaire de contrôler cette impression par la détermination précise de leurs caractères optiques. Une étude systématique sera, dans tous les cas, nécessaire pour la détermination des minéraux exceptionnels.

Epaisseur de la lame mince.

La lame mince doit être taillée de façon à avoir ses deux faces aussi exactement parallèles que possible. Sauf dans des cas spéciaux où l'on aurait à rechercher des minéraux très peu biréfringents, on devra toujours chercher à obtenir une épaisseur uniforme de 2 à $\frac{3}{100}$ millimètre au maximum. A cette épaisseur, adoptée conventionnellement pour les lames pétrographiques, on arrive à une transparence à peu près parfaite pour tous les minéraux qui ne restent pas pratiquement opaques à toute épaisseur et qui, par là, échappent aux déterminations optiques (ils sont heureusement en nombre fort limité); d'autre part, les teintes de polarisation observées entre les deux nicols croisés sont les plus favorables pour l'appréciation de la biréfringence des sections cristallines.

Dans la pratique, toutes les fois qu'une lame mince contiendra des sections de quartz, ce qui sera très souvent le cas, on s'assurera que

l'on a atteint la minceur convenable par le fait qu'aucune de ces sections ne présentera plus, entre les nicols croisés, de teintes vives (vert, bleu, violet, rouge, orangé, jaune vif). Toutes ces sections devront polariser en blanc ou en gris; une légère teinte jaune pâle sera tout au plus acceptable.

Dans le cas où la roche à tailler ne contient pas de quartz, il peut y avoir intérêt, pour arriver à coup sûr à l'épaisseur convenable, à tailler en même temps trois petits fragments de quartz ou de roche quartzeuse, disposés de part et d'autre du fragment de la roche à tailler et que l'on fera ensuite disparaître.

On ne saurait d'ailleurs s'étendre ici sur les détails matériels des opérations à effectuer pour l'exécution de ces plaques minces, ni sur les précautions spéciales à prendre lorsque la roche à tailler manque de cohésion.

Microscope polarisant.

Le microscope spécialement adapté aux études pétrographiques est muni de *deux nicols*: l'un inférieur (*polariseur*), que les rayons lumineux traversent avant la lame mince et qui peut tourner dans une bague, de façon à être *orienté à volonté*; l'autre supérieur (*analyseur*), généralement situé entre l'objectif et l'oculaire, qui peut être instantanément mis en place ou enlevé par un dispositif à bascule ou à glissière, qui le ramène toujours *dans la même orientation*. L'oculaire renferme un *réticule* à deux fils croisés, réglé de telle façon que l'un de ces fils soit situé dans le plan de symétrie ou de polarisation de l'analyseur et l'autre bien perpendiculaire.

Il est, en outre, nécessaire que la platine qui porte les préparations tourne autour de l'axe optique du microscope et qu'une graduation appropriée permette de mesurer exactement les *angles de rotation de cette platine*. De plus, il faut qu'il y ait une coïncidence parfaite de la croisée des fils du réticule dans le champ de vision avec le même point de l'image de la préparation pendant la rotation, c'est-à-dire un *centrage parfait*. Cette condition, nécessaire pour les examens en lumière convergente, reste pratiquement réalisée dans les microscopes français du type construit par Nachet, même lorsqu'on substitue un objectif à un autre au moyen de l'adaptateur spécial. Ce microscope polarisant, le plus commode pour les études pétrographiques ordinaires, est caractérisé par le fait que la rotation de la platine y entraîne, d'une façon solidaire, celle de l'objectif, l'oculaire étant porté avec l'analyseur par un tube indépendant; mais il faut veiller soigneusement à ne pas fausser la direction de ce tube supérieur, car il n'y a pas de réglage possible.

Dans les microscopes n'ayant pas cette particularité (Zeiss, Leitz, etc.), il est souvent nécessaire de régler le centrage de l'objectif au

moyen de deux vis à angle droit déplaçant la bague qui porte l'objectif, lorsqu'on change celui-ci pour obtenir un grossissement plus fort ou pour faire un examen en lumière convergente. C'est là un dispositif permettant une précision de réglage plus grande que le précédent, mais il est moins commode pour les besoins de la pratique courante que le type Nachet, dont la précision du centrage reste généralement suffisante lorsqu'il est manié avec précaution.

Enfin, pour les examens à un fort grossissement et aussi pour ceux en lumière convergente, qui se font avec un objectif aussi fort que possible (les objectifs à sec 6 et 7 sont cependant généralement suffisants), le microscope doit être muni d'un *condenseur amovible à très court foyer*, pouvant être facilement mis en place (par un mouvement de bascule dans les modèles récents) au-dessus du condenseur à long foyer qui surmonte le nicol polariseur et qui sert pour les faibles et moyens grossissements.

Il est bien entendu que, pour toutes les opérations courantes qui se font *entre nicols croisés*, le polariseur doit être tourné de telle sorte que, le champ du microscope étant bien éclairé lorsque le nicol analyseur est enlevé, il devienne aussi obscur que possible lorsque l'analyseur est remis en place. *On doit toujours bien vérifier qu'il en est ainsi*; il existe d'ailleurs généralement un cran d'arrêt ou tout autre dispositif analogue maintenant le polariseur dans cette position après le réglage.

Il sera question, plus loin, de l'emploi de *lames auxiliaires* destinées à être superposées aux préparations étudiées, en vue de produire certains phénomènes. Afin de ne pas déranger la mise au point, ces lames auxiliaires seront interposées sur le trajet des rayons lumineux *entre l'objectif et le nicol analyseur*, dans un espace vide ménagé à cet effet.

Pour les microphotographies, au lieu de se servir du microscope polarisant ordinaire à plans de polarisation fixes (qui peut d'ailleurs servir aussi à cet effet), il peut être plus commode d'employer un microscope spécial à *nicols tournants*, solidaires l'un de l'autre. Lorsque l'image de la portion choisie de la préparation occupe la position convenable sur la plaque, on peut ainsi faire varier les apparences dues à la polarisation en faisant tourner les plans de polarisation des deux nicols par rapport à la préparation, au lieu de faire l'inverse comme avec le microscope ordinaire. Ce dispositif serait d'ailleurs moins commode, par contre, pour le travail ordinaire.

I

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES PHÉNOMÈNES OPTIQUES UTILISÉS DANS L'ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE

Sans entrer dans des détails superflus, il est indispensable de rappeler ici quelques notions fondamentales nécessaires à la compréhension des méthodes pratiques d'observation des minéraux en lame mince au microscope polarisant.

Pour les questions qui nous intéressent, il est commode, au lieu de se servir des surfaces d'onde, de conserver la notion de *rayons lumineux*, traversant les milieux transparents suivant une direction rectiligne, sur laquelle se propagerait un mouvement vibratoire périodique. S'il s'agit de *lumière monochromatique*, c'est-à-dire d'un mouvement vibratoire simple, on sait que :

1^o son *intensité* est proportionnelle au *carré de l'amplitude* des vibrations;

2^o sa *couleur* est fonction de la durée T ou *période* des vibrations.

Un rayon lumineux quelconque, provenant de la lumière du jour ou d'une source artificielle ordinaire (*lumière naturelle*), résulte de la coexistence de plusieurs modes vibratoires de durées T, T', T''... différentes; ceux-ci se font d'ailleurs dans une orientation quelconque et variable par rapport à la direction du rayon lumineux.

La vitesse de propagation de ces mouvements vibratoires sur le rayon lumineux ou *vitesse de la lumière* (V) varie d'ailleurs :

1^o avec la *nature du milieu* transparent et souvent même avec la *direction* suivie dans ce milieu (par exemple, dans tous les corps cristallisés autres que ceux du système cubique);

2^o avec la *période de la vibration*, c'est-à-dire la *couleur* de la lumière.

Cette seconde cause de variation est d'ailleurs faible par rapport aux différences tenant à la nature du milieu et aux variations de direction dans celui-ci. *Dans une première approximation*, suffisante pour les besoins de la pratique dans le cas des *lames très minces* qui nous occupent, *on peut admettre que, dans un même milieu transparent et suivant des directions parallèles dans ce milieu supposé homogène, les différents rayons lumineux se propagent avec une même vitesse V.*

La distance de deux points successifs d'un même rayon lumineux où la même vibration se retrouvera à la même phase (*longueur d'onde*) est donc exprimée par $\lambda = VT$. Cette distance, qui varie avec la couleur du rayon lumineux, sert à définir celle-ci.

Corps isotropes et anisotropes.

D'après ce qui précède, on peut donc diviser les milieux transparents en deux grands groupes :

A) CORPS ISOTROPES OU MONORÉFRINGENTS. — Ce sont ceux où V est indépendant de la direction de propagation dans le milieu et ne dépend que de la nature de celui-ci; les surfaces d'onde sont alors des sphères.

Ces milieux *isotropes* sont aussi *monoréfringents*, car un rayon lumineux passant de l'un d'eux à un autre de ce groupe (par exemple de l'air dans le verre non trempé ou dans l'eau ou tout autre liquide ordinaire) se réfracte simplement suivant les lois élémentaires connues en donnant *un seul rayon réfracté*.

Chacun de ces milieux est caractérisé par un *indice de réfraction* unique, exprimé en fonction de celui de l'air par la relation $n = \frac{I}{V}$, où V est la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu exprimée en fonction de la vitesse dans l'air, prise comme unité.

A ce groupe appartiennent tous les gaz et les liquides ordinaires, et, parmi les solides, ceux qui sont *vitreux*, c'est-à-dire non cristallisés, et aussi, comme nous allons en voir la raison plus loin, *les corps cristallins du système cubique*.

B) CORPS ANISOTROPES OU BIRÉFRINGENTS. — Dans la grande majorité des corps cristallisés, la vitesse V varie avec la direction de propagation, c'est-à-dire que les surfaces d'onde ne sont plus sphériques (*milieux anisotropes*).

Pour chaque direction, nous pouvons introduire la notion d'*indice suivant cette direction*, en la définissant comme dans les corps isotropes par la relation $n = \frac{I}{V}$, la vitesse étant toujours exprimée en fonction de celle dans l'air prise comme unité. Si l'on porte, à partir d'un point O dans ce milieu, suivant les différentes directions, des longueurs OM, OM', OM''... égales aux indices correspondants $n, n', n''...$ ainsi définis, le lieu des points M, M', M''... sera un *ellipsoïde*.

Cet *ellipsoïde des indices* (E) possède trois axes tri-rectangulaires :
α) l'un correspondant à la direction de *plus grand indice* (n_g);
β) un autre correspondant à la direction de *plus petit indice* (n_p);

γ) le troisième normal aux deux précédents et correspondant à un indice moyen (n_m), qui n'est d'ailleurs pas la moyenne des deux indices extrêmes.

Ces trois indices sont dits INDICES PRINCIPAUX du milieu anisotrope considéré. Lorsqu'on en connaît les valeurs et la position, l'ellipsoïde des indices est entièrement déterminé et, par suite aussi, la valeur de l'indice suivant une direction quelconque dans le milieu.

La symétrie cristallographique traduisant une symétrie dans la disposition intime des molécules, il est évident, *a priori*, que deux directions qui se montrent cristallographiquement équivalentes doivent avoir le même indice et que les axes de l'ellipsoïde des indices, c'est-à-dire *les indices principaux*, doivent correspondre à des axes *cristallographiques*, lorsque le système cristallin en présente. Réciproquement, *ces axes cristallographiques doivent coïncider avec l'un ou l'autre des indices principaux*; de plus, si un axe de symétrie cristallographique est d'ordre supérieur au second (axe ternaire, quaternaire ou sénaire), il ne peut correspondre qu'à un axe de révolution pour l'ellipsoïde des indices, qui doit alors être lui-même de révolution.

Dans ce cas, il n'existe évidemment plus trois indices principaux, l'indice n_m étant alors confondu soit avec n_g , soit avec n_p ; mais, par contre, tous les indices correspondant aux directions normales à l'axe de révolution (qui peut être n_g ou n_p) sont alors égaux entre eux et correspondent, suivant le cas, à n_p ou à n_g .

En ce qui concerne les corps cristallins du système cubique, il est bien évident que l'existence de trois axes quaternaires égaux, sans même faire intervenir les quatre axes ternaires et les multiples axes binaires de ce système, suffit à montrer que, dans ce cas, l'ellipsoïde des indices doit se ramener à une sphère, c'est-à-dire que l'indice est le même dans toutes les directions et, par suite, que ces corps sont optiquement isotropes, bien que cristallins.

Biréfringence.

Les corps anisotropes sont aussi dits BIRÉFRINGENTS. C'est qu'en effet, lorsqu'un rayon lumineux ordinaire, venant d'un milieu isotrope contigu au corps anisotrope en question, arrive à rencontrer leur surface de séparation, il pénètre dans le milieu anisotrope en s'y divisant en deux rayons réfractés, d'égale intensité lumineuse, mais d'indices différents, donc de directions différentes. D'autre part, ces deux rayons réfractés sont devenus POLARISÉS, c'est-à-dire que le mouvement vibratoire se propage, à partir de ce moment, le long de ces rayons toujours dans un même plan et perpendiculairement à un autre plan normal à celui-ci, qui est dit *plan de polarisation*.

Les deux rayons réfractés sont polarisés à angle droit, et les directions de leurs vibrations sont définies de la façon suivante : Soit O le point où le rayon lumineux ordinaire IO venant du premier milieu isotrope rencontre la surface de séparation S des deux milieux et soit (E) l'ellipsoïde des indices du second milieu ayant son centre en O (fig. 1).

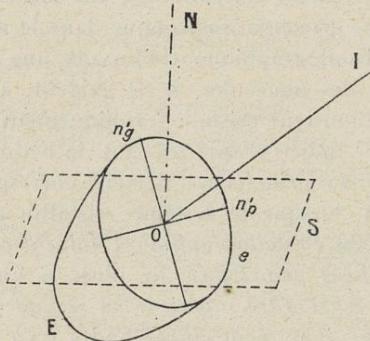


FIG. 1

Décomposition du mouvement vibratoire d'un rayon lumineux ordinaire en deux vibrations polarisées rectilignes, lors de sa pénétration dans un milieu anisotrope (ou biréfringent).

Coupons cet ellipsoïde par le plan perpendiculaire en O au rayon incident; il en résulte une ellipse de section (e), dont les deux axes seront n'_g et n'_p . Ce seront là les deux directions de vibration des deux rayons réfractés et, d'autre part, ceux-ci se propageront dans le second milieu avec des vitesses respectivement inverses des indices n'_g et n'_p . Ils prendront dans ce second milieu des directions définies par les lois habituelles de la réfraction, en tenant compte de l'indice n du premier milieu, de l'indice n'_g ou n'_p dans le second, et de l'angle que fait le

rayon incident IO avec la normale ON à la surface S de séparation des deux milieux.

Les deux rayons réfractés en question resteront ensuite polarisés dans la même direction s'ils passent de nouveau dans un milieu isotrope, leur nouvelle réfraction ayant encore lieu suivant les lois habituelles.

Si, par contre, un tel rayon polarisé pénètre dans un autre milieu biréfringent, sa vibration OA (fig. 2) se décompose en deux composantes α et β dirigées suivant les axes n'_g et n'_p de l'ellipse (e) suivant

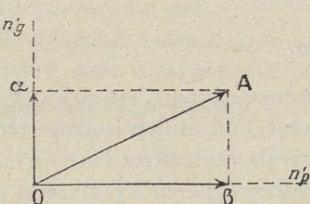


FIG. 2

Décomposition d'un mouvement vibratoire déjà polarisé, pénétrant dans un nouveau milieu biréfringent.

laquelle l'ellipsoïde des indices de ce milieu est coupé par le plan de l'onde incidente, c'est-à-dire le plan normal en O au rayon incident. Mais, dans ce cas, les deux intensités des rayons réfractés ne sont plus égales et même l'une d'entre elles peut s'annuler, si la direction de la vibration incidente OA coïncide avec l'une des deux directions n'_g ou n'_p du second milieu.

Cas exceptionnels de biréfringence.

Les solides isotropes peuvent devenir anisotropes ou biréfringents quand un phénomène mécanique (pression) ou physique (trempe du verre) modifie la disposition normale des molécules et la valeur de l'élasticité optique dans certaines directions, en déformant ainsi la sphère des indices. On sait aussi qu'il existe des cristaux liquides. Mais nous ne nous occuperons pas ici de ces faits exceptionnels et nous nous bornerons à l'étude des corps cristallisés ordinaires.

Cristaux uniaxes et biaxes.

Nous avons déjà vu que toute symétrie cristallographique doit se retrouver dans la distribution des indices, et nous en avons déjà tiré la conclusion, vérifiée d'ailleurs par l'observation, que les cristaux du système cubique se comportent optiquement comme des corps isotropes.

1^o CRISTAUX UNIAXES. — Dans les cristaux présentant un axe de symétrie d'ordre supérieur à 2 (*systèmes quadratique, hexagonal et rhomboédrique*), l'ellipsoïde (E) doit être de révolution autour de cet axe principal, qui est alors dit *axe optique*.

Si l'axe optique est n_g , le cristal est dit *uniaxe positif*;

Si l'axe optique est n_p , le cristal est dit *uniaxe négatif*.

Il importe de remarquer que l'axe optique est une *direction d'uniréfringence* : pour un rayon incident parallèle à cet axe, l'ellipse (*e*) des indices est alors un cercle, comme pour un corps isotrope, et il n'y a qu'un rayon réfracté. Au contraire, toute autre direction d'incidence correspond à une ellipse et donne, par suite, naissance à deux rayons réfractés. *L'axe optique des cristaux uniaxes est donc leur seule direction d'uniréfringence.*

2^o CRISTAUX BIAXES. — Dans les trois autres systèmes cristallins, les trois axes de l'ellipsoïde (E) sont inégaux, mais il existe des relations de position nécessaires avec les éléments de symétrie cristallographique :

a) *Système orthorhombique*. — Les trois indices principaux coïncident en direction avec les trois axes cristallographiques, mais sans qu'il y ait de relation entre les valeurs de ces indices et les paramètres cristallographiques des axes;

3) *Système monoclinique.* — L'axe unique de symétrie correspond à l'un quelconque des indices principaux; les deux autres sont situés dans le plan de symétrie g^1 , mais avec une orientation quelconque dans ce plan;

γ) *Système triclinique.* — Dans ce système, simplement pourvu d'un centre de symétrie, il n'y a aucune relation nécessaire entre la position des indices principaux et la forme du cristal ou ses particularités internes (clivages, plans de mâcles).

Dans tous les corps de ces divers systèmes, on peut encore chercher,

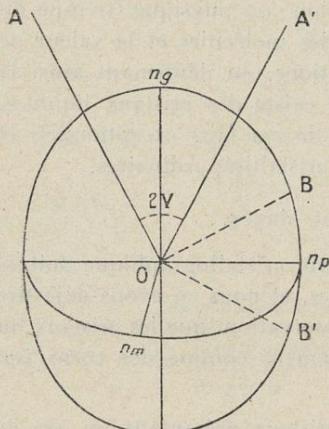


FIG. 3

Axes optiques d'un minéral biaxe.

par analogie avec ce qui a lieu pour les corps uniaxes, s'il y a des directions d'uniréfringence, qu'on appellera alors aussi axes optiques. Or, il est facile de voir (fig. 3) qu'il existe deux directions de cette nature, perpendiculaires aux deux sections cycliques de l'ellipsoïde (E) et situées dans le plan des deux indices extrêmes n_g et n_p , perpendiculairement aux deux vecteurs OB, OB' égaux à n_m . On désigne convenablement par (2V) l'angle aigu que font ces deux axes optiques OA, OA' et, suivant que la bissectrice de cet angle (bissectrice aiguë) se trouve être n_g ou n_p , on dit que :

Bissectrice aiguë = n_g , le corps est biaxe positif;

Bissectrice aiguë = n_p , le corps est biaxe négatif.

(On peut d'ailleurs remarquer que les corps uniaxes positifs ou négatifs sont respectivement les cas limites des cristaux biaxes de même signe.)

POLARISATION ET DOUBLE RÉFRACTION PAR LES CRISTAUX UNIAXES ET BIAXES

1° CRISTAUX UNIAXES. — Soit un rayon incident IO; l'un des deux rayons réfractés a toujours un indice constant (n_p si le cristal est uniaxe positif, n_g s'il est négatif), l'autre rayon possède, au contraire, un indice n' variable avec la direction de IO (fig. 4). Donc, parmi les deux rayons réfractés, on peut distinguer :

Un rayon ordinaire, polarisé dans le plan de IO et de l'axe optique (section principale) et d'indice constant;

Un rayon extraordinaire, polarisé dans un plan perpendiculaire à la section principale et d'indice variable.

Il est d'ailleurs facile de voir que :

Si le cristal est positif, le rayon extraordinaire est plus dévié que le rayon ordinaire, dont l'indice constant est n_p (*cristaux attractifs*);

Si le cristal est négatif, c'est l'inverse (*cristaux répulsifs*).

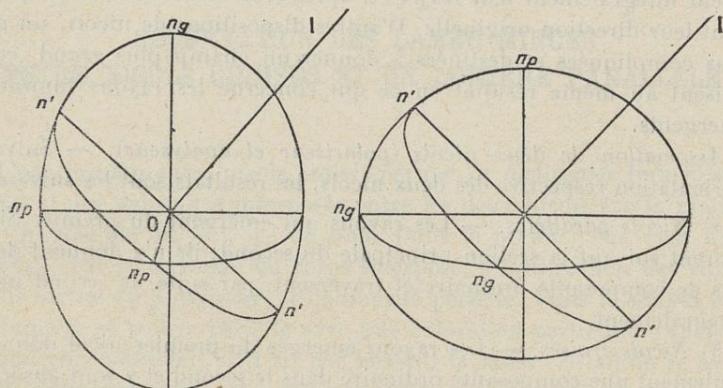


FIG. 4

Polarisation par les cristaux uniaxes :

- | | | | |
|--|---|---------------------------------|---|
| 1 ^o Cristal uniaxe positif (à gauche) | { | Indice du rayon ordinaire n_p | Indice du rayon extraordinaire $n' > n_p$ |
| 2 ^o Cristal uniaxe négatif (à droite) | { | Indice du rayon ordinaire n_g | |

2^o CRISTAUX BIAxes. — L'ellipse (e) est toujours quelconque et ses axes varient en grandeur avec la direction du rayon incident; on a donc toujours deux rayons réfractés *extraordinaires*, sauf, bien entendu, dans le cas de rayons incidents parallèles à l'un ou l'autre des deux axes optiques (directions d'uniréfringence).

Appareils de polarisation du microscope

Un nicol est, sous sa forme la plus simple, un prisme à bases obli-

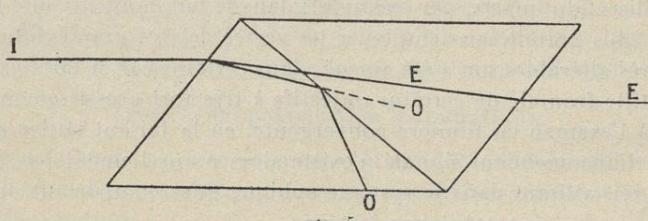


FIG. 5

Trajets des rayons réfractés dans le nicol
(O, rayon ordinaire ; E, rayon extraordinaire).

ques de calcite (minéral uniaxe négatif). Le rayon réfracté extraordinaire E, qui vibre dans le plan du rayon incident I et de la normale à

la face d'entrée, est donc moins dévié que le rayon ordinaire O. Le prisme est scié suivant une direction telle que les rayons ordinaires soient réfléchis totalement et aillent se perdre latéralement dans la monture noircie (fig. 5), alors que les rayons extraordinaires continuent intégralement leur trajet et, après leur sortie du nicol, reprennent leur direction originelle. D'autres dispositions de nicols, un peu plus compliquées et destinées à donner un champ plus grand, conduisent au même résultat en ce qui concerne les rayons lumineux émergents.

Association de deux nicols (polariseur et analyseur). — Suivant l'orientation respective des deux nicols, les résultats sont les suivants :

a) *Nicols parallèles.* — Les rayons qui émergent du premier nicol vibrent suivant la section principale du second; ils n'y donnent donc pas de composante ordinaire et traversent, par suite, le second nicol intégralement.

b) *Nicols croisés.* — Les rayons émergés du premier nicol donnent seulement une composante ordinaire dans le second et y sont absorbés (*nicols à l'extinction*).

c) *Nicols faisant un angle quelconque.* — Une partie seulement des rayons sortis du premier nicol traversent le second; cette portion conservée est d'autant plus grande que les sections principales des deux nicols sont plus voisines d'être parallèles.

Dans la pratique courante des études pétrographiques, ainsi qu'il a été dit à propos du réglage du microscope polarisant, toutes les observations sont faites *entre nicols croisés* et l'on doit toujours veiller à ce que l'extinction du champ soit aussi parfaite que possible lorsqu'aucune lame cristalline n'est interposée entre les deux nicols. Il est inutile d'insister sur le fait que, les diverses lentilles du microscope étant en verre non trempé, leur traversée n'introduit aucun phénomène optique particulier. Il n'en serait pas de même si, pour une raison ou une autre, on taillait une lentille dans une substance cristallisée (du quartz, par exemple); dans le but d'obtenir une réfringence plus grande sans employer les verres de très grand indice, qui sont très altérables, on a été amené, dans certains cas, à faire exécuter la lentille frontale de certains objectifs à très fort grossissement, destinés à l'examen en lumière convergente, en la faisant tailler en diamant. L'inconvénient signalé n'existe alors naturellement pas, le diamant cristallisant dans le système cubique et se comportant optiquement comme une substance isotrope.

OBSERVATION DES LAMES MINCES ENTRE NICOLS CROISÉS ET EN LUMIÈRE PARALLÈLE

L'observation entre nicols croisés permet de distinguer immédiatement si une substance interposée entre les deux nicols sur la platine du microscope est isotrope ou non. Dans le premier cas, rien n'est changé, par la traversée du corps interposé, à la direction des vibrations sorties du polariseur, et l'obscurité persiste. Dans le second cas, la lumière se trouve rétablie avec une coloration particulière (*polarisation chromatique*), sauf si, par hasard, la lame cristalline se trouvait taillée normalement à son axe optique unique (cristaux uniaxes) ou à l'un de ses axes optiques (cristaux biaxes). Dans ce cas, on peut d'ailleurs, par l'examen en lumière convergente, non seulement reconnaître que la substance est bien cristalline, mais en tirer des indications importantes pour sa détermination.

Nous nous occuperons, tout d'abord, de l'examen *en lumière parallèle*, qui est celui qu'on fait avec le microscope polarisant employé comme à l'ordinaire, avec objectif et oculaire et sans condensateur ou avec un condenseur très faible, de telle façon que les seuls rayons concourant à la formation des images observées soient ceux qui ont traversé la préparation normalement ou presque normalement.

Dans ce cas, les conditions des phénomènes précédemment indiqués se simplifient notablement. Le plan de l'onde incidente, c'est-à-dire le plan perpendiculaire au rayon incident, se confond alors avec la surface d'entrée dans le cristal; par suite, l'ellipse (*e*) et les axes n'_g et n'_p se trouvent dans le plan de la préparation. De plus, les rayons tombant normalement sur celle-ci, ils continuent leur trajet dans la lame cristalline et en ressortent *sans déviation*.

Teintes de polarisation chromatique.

Pour analyser ce qui se passe avec la lumière blanche ordinaire, il nous faut d'abord examiner ce qui se passerait en lumière simple ou monochromatique.

1^o LUMIÈRE MONOCHROMATIQUE. — Soient toujours On'_g et On'_p (fig. 6) les directions des deux axes de l'ellipse (*e*) provenant de la section de l'ellipsoïde des indices de la lame cristalline par le plan normal au rayon incident (ici confondu avec celui de la face d'entrée).

La vibration $OV = p$ sortie du polariseur va se décomposer en $OA = p \sin \alpha$ suivant On_p et $OB = p \cos \alpha$ sur On_g , qui se propageront dans la lame cristalline avec des vitesses respectivement égales à $\frac{V}{n'_p}$ et $\frac{V}{n'_g}$, si V représente la vitesse dans l'air.

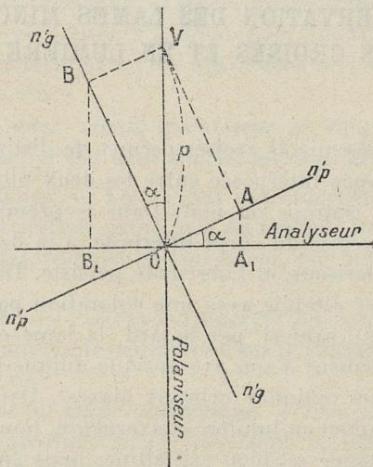


FIG. 6

Décomposition d'une vibration polarisée OV par la section cristalline, puis par l'analyseur.

L'épaisseur de la lame étant désignée par e , ces deux vibrations traverseront celle-ci en des temps $\frac{e n'_p}{V}$ et $\frac{e n'_g}{V}$.

Donc, pour une épaisseur e , il s'introduit une différence de phase $\tau = \frac{e (n'_g - n'_p)}{V}$.

Après la sortie de la lame et la traversée de l'analyseur, OA donne une composante $OA_1 = p \sin \alpha \cos \alpha = \frac{p \sin 2\alpha}{2}$ et OB une composante $OB_1 = -p \sin \alpha \cos \alpha = -OA_1$ suivant la section principale de l'analyseur. Donc, ces deux composantes sont égales en valeur absolue et elles vibrent dans le même plan, mais avec un retard de OB_1 sur OA_1 dans l'air égal à $\delta = V\tau = e (n'_g - n'_p)$.

Ces deux vibrations sinusoïdales sont donc dans les conditions requises pour interférer. En tenant compte de la direction opposée de OA_1 et de OB_1 , qui introduit aussi une différence de phase de π , la différence de phase des deux vibrations dans l'air après la sortie de l'analyseur est $\pi + \varphi$ (où $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$). Donc, si à un moment

donné, la vibration OA_1 a pour élévation $\frac{p \sin 2\alpha}{2} \sin \theta$, la vibration OB_1 aura $\frac{p \sin 2\alpha}{2} \sin [\theta - (\pi + \varphi)] = -\frac{p \sin 2\alpha}{2} \sin (\theta - \varphi)$.

Or, on sait que, dans ce cas, la vibration résultante est de même période que les deux composantes et que, par suite, son élévation au même instant peut être exprimée par $q \sin (\theta - \psi)$. Cette élévation de la résultante devant, à chaque instant, être égale à la somme de celles des composantes, on doit avoir, quelle que soit la valeur de θ :

$$q \sin (\theta - \psi) = \frac{p \sin 2\alpha}{2} [\sin \theta - \sin (\theta - \varphi)]$$

ou : $q \cos \psi \cdot \sin \theta - q \sin \psi \cdot \cos \theta = \frac{p \sin 2\alpha (1 - \cos \varphi)}{2} \sin \theta$
 $+ \frac{p \sin 2\alpha \cdot \sin \varphi}{2} \cos \theta$

On en déduit :

$$q \cos \psi = \frac{p \sin 2\alpha (1 - \cos \varphi)}{2}$$
$$- q \sin \psi = \frac{p \sin 2\alpha \cdot \sin \varphi}{2}$$

d'où enfin :

$$q^2 = p^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} = p^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda}$$

L'intensité de la lumière primitive (après la sortie du polariseur et avant la lame cristalline) étant I , celle I' à la sortie de l'analyseur sera donc :

$$I' = \frac{q^2}{p^2} I \quad \text{ou : } I' = I \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda}$$

Cette formule fondamentale va nous donner l'explication de tous les faits observés dans l'examen en lumière parallèle des sections de minéraux en lame mince.

En effet, on voit immédiatement que l'intensité I' deviendra nulle (*extinction*) :

1^o Quelle que soit la valeur de δ , c'est-à-dire l'épaisseur e de la lame et la longueur d'onde de la lumière employée, lorsque $\sin 2\alpha = 0$, ce qui s'obtiendra, par rotation de la platine du microscope, pour 4 positions à angle droit, qui sont celles où les axes n_g et n_p de l'ellipse (e) coïncident avec les sections principales des nicols, marquées par les fils du réticule de l'oculaire lorsque celui-ci est bien réglé;

2^o Quel que soit α , si $\sin \frac{\pi \delta}{\lambda} = 0$, ce qui a lieu quand $e (n'_g - n'_p) = k\lambda$.

Les variations de l'angle α , obtenues par la rotation de la platine portant la lame cristalline, produisent donc des variations de l'intensité qui vont depuis une extinction totale pour quatre positions à

angle droit jusqu'à une valeur maxima pour les positions bissectrices de celles-ci. Cette intensité maxima est $I' = I \sin^2 \pi \frac{e(n'_g - n'_p)}{\lambda}$.

De même, pour certaines valeurs de l'épaisseur ou de la différence des indices n'_g et n'_p pour lesquelles $e(n'_g - n'_p) = \frac{2k+1}{2} \lambda$, la lumière incidente peut être intégralement conservée (si la valeur de α correspond au maximum), tandis que pour d'autres, définies par $e(n'_g - n'_p) = k\lambda$, on peut avoir extinction complète quelle que soit l'orientation de la lame cristalline par rapport aux nicols.

Ces résultats vont nous permettre facilement de nous rendre compte de ce qui se passe en lumière ordinaire, contenant toutes les radiations du spectre.

2° LUMIÈRE NATURELLE. — Dans ce cas, à la sortie de l'analyseur, on a un éclairement coloré (TEINTE DE POLARISATION), puisque les radiations pour lesquelles $e(n'_g - n'_p)$ est un multiple exact de leur longueur d'onde sont totalement supprimées, alors que les autres sont plus ou moins intégralement conservées.

D'autre part, la valeur de l'angle α intervient de la même façon qu'en lumière monochromatique; pendant la rotation du microscope, les diverses radiations conservées du spectre voient leur intensité réduite dans la même proportion pour chacune d'entre elles, suivant la valeur de $\sin^2 2\alpha$. La teinte de polarisation reste donc la même, mais avec des variations d'intensité allant depuis une extinction totale pour les quatre positions à angle droit déjà définies, jusqu'à une valeur maxima pour les positions bissectrices.

Echelle chromatique de Newton.

Il est indispensable d'établir la gamme des teintes de polarisation correspondant aux diverses valeurs de $e(n'_g - n'_p) = \delta$. Les courbes ci-dessous (fig. 7) indiquent l'allure de la fonction $y = \sin^2 \pi \frac{\delta}{\lambda}$ pour diverses valeurs de la longueur d'onde prises dans le spectre, depuis le rouge jusqu'au violet. Il est facile, en comparant approximativement les coefficients suivant lesquels sont conservées les diverses régions du spectre, de se rendre compte de la succession des nuances, lorsque croît la valeur du retard $\delta = e(n'_g - n'_p)$.

Pour un retard δ nul, il y a évidemment obscurité. Pour de très petites valeurs, les diverses radiations du spectre croissent à peu près dans la même proportion, quoique pourtant avec prédominance des radiations ayant la plus faible longueur d'onde (violet, bleu) sur celles de l'autre extrémité du spectre. Il en résulte une nuance gris bleu-violacé (*gris lavande*), de plus en plus claire à mesure que croît la valeur du retard δ . Lorsque la courbe de la région moyenne du

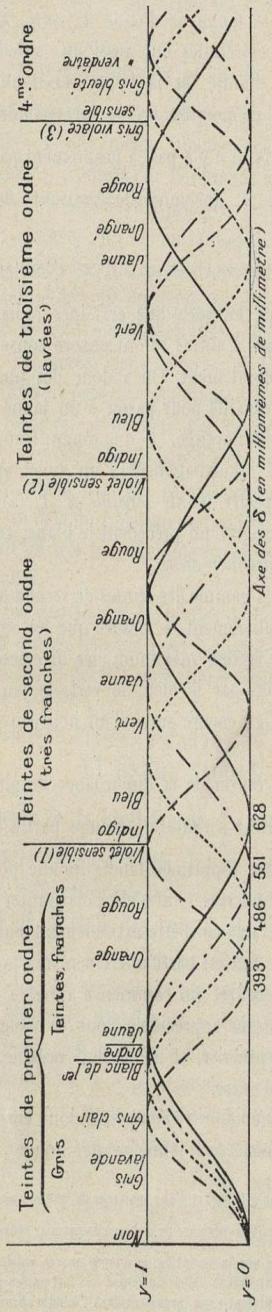


FIG. 7

A. — Teintes de polarisation correspondant aux diverses valeurs du retard $\hat{\delta} \equiv e(n'_s - n'_p)$ [échelle chromatique de Newton].

B. — Courbes donnant, en fonction du retard $\hat{\delta}$, les valeurs de $y \equiv \sin^2 \pi \frac{\hat{\delta}}{\lambda}$ pour différentes valeurs de λ correspondant à diverses régions du spectre :

- 1° Courbe en trait interrompu
 - 2° Courbe en trait pointillé
 - 3° Courbe en trait mixte
 - 4° Courbe en trait plein
- $\lambda \equiv 0.0033$ (raie K)
 $\lambda \equiv 0.86$ (raie F)
 $\lambda \equiv 5.51$ (raie D)
 $\lambda \equiv 6.28$ (rouge CuO)

NOTA. — L'échelle de l'axe des $\hat{\delta}$, omise sur le dessin, est donnée par les quatre valeurs de $\hat{\delta}$ inscrites sur cet axe.

spectre atteint son ordonnée maxima, égale à l'unité, c'est-à-dire lorsque δ est égal à la moitié de la longueur d'onde de cette région moyenne, les courbes des deux extrémités ont aussi une valeur de leur ordonnée presque égale à l'unité, et la teinte résultante est donc un blanc assez pur (*blanc de premier ordre*) correspondant à $\delta = \frac{255}{10^6} \text{ m}$ environ (1). Jusque là, il n'y a pas, à proprement parler, de vraie teinte colorée, mais plutôt une intensité croissante depuis l'obscurité jusqu'au blanc.

Mais, à partir de là, les diverses courbes $y = \sin^2 \pi \frac{\delta}{\lambda}$ s'écartent de plus en plus les unes des autres, en sorte que certaines radiations arriveront à être éteintes alors que d'autres seront encore conservées en grande partie ou même intégralement. On a donc des nuances franches, débutant par un jaune paille pour passer à un jaune brillant, à un jaune orangé, à de l'orangé, à du rouge franc, et enfin à un pourpre qui confine immédiatement à un violet appartenant à l'autre extrémité du spectre (*teinte sensible n° 1*) (2). Les teintes précédentes, y compris les gris qui précèdent le blanc, constituent la gamme des *teintes de premier ordre*.

Après la teinte sensible, vient la gamme des *teintes de second ordre*, dans laquelle s'échelonnent régulièrement, à mesure que les courbes correspondantes atteignent leur second maximum, les diverses couleurs du spectre depuis le violet, par le bleu, le vert, le jaune et l'orangé, jusqu'à un second rouge encore suivi d'un nouveau violet qui sert de *teinte sensible n° 2*.

Il faut d'ailleurs noter qu'en raison de la discordance de plus en plus grande des courbes $y = \sin^2 \pi \frac{\delta}{\lambda}$, qui fait qu'une partie d'une nuance du spectre peut seule être supprimée tandis qu'une portion notable en reste conservée, les diverses teintes de polarisation vont commencer à se laver de blanc, au lieu d'être extrêmement pures et vives comme les précédentes. Ce fait est particulièrement net pour la gamme des teintes du troisième ordre, qui commence après le violet sensible n° 2; mais il est déjà très appréciable pour ce violet lui-même par comparaison avec le premier, et même déjà notable pour l'orangé et le rouge du deuxième ordre.

La gamme des *teintes de troisième ordre* comprend donc encore la série du spectre (violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge), mais

(1) Un quartz au maximum de biréfringence (0,009) et d'une épaisseur de 0^m,03 a un retard $\delta = 0,009 \times 0,03 = \frac{270}{10^6} \text{ m}$. Il est donc à la limite supérieure de ce blanc de premier ordre.

(2) Cette teinte est ainsi dénommée parce que la variation de nuance en son voisinage est extrêmement rapide; le moindre changement dans la valeur du retard δ la fait passer au bleu ou au rouge, alors que les autres nuances s'étaient assez largement dans l'échelle chromatique et comportent, par conséquent, la possibilité d'une assez grande variation pour le retard δ .

fortement lavée et se terminant à une troisième teinte sensible peu distincte.

A partir du quatrième ordre, les courbes $y = \sin^2 \pi \frac{\delta}{\lambda}$ sont tellement disjointes que, pratiquement, celles de ces courbes qui sont relatives à une même nuance peuvent passer les unes par leur maximum, d'autres par l'ordonnée O. On peut dire que chacune des nuances est conservée à peu près pour moitié et l'on a une lumière à peine nuancée qui donne presque l'impression d'un blanc (*blanc d'ordre supérieur*), avec une intensité lumineuse sensiblement égale à la moitié de celle du blanc de premier ordre, puisque la moitié des radiations sont supprimées alors qu'elles étaient à peu près intégralement conservées dans le premier blanc. En réalité, les moindres variations d'épaisseur produites au polissage de la lame se traduisent, si la forte valeur de δ est due à une valeur élevée de $(n'_g - n'_p)$, ce qui est le cas habituel, par des changements notables de la teinte et par un *aspect irisé* très caractéristique des sections cristallines polarisant au delà du troisième ordre. Les sections de calcite et de dolomie en sont un très bon exemple parmi les minéraux très répandus dans les roches.

La reconnaissance des teintes de polarisation chromatique, avec la valeur qui en découle pour δ , c'est-à-dire pour $e(n'_g - n'_p)$ constitue le fondement des déterminations pétrographiques entre nicols croisés.

DÉTERMINATIONS PRATIQUES EN LUMIÈRE PARALLÈLE ET ENTRE NICOLS CROISÉS

1^o Mesure de la biréfringence $(n'_g - n'_p)$ d'une section cristalline.

La biréfringence d'une section se détermine avec une approximation suffisante pour les besoins de la pratique pétrographique, au moyen de l'échelle des teintes, si l'on connaît l'épaisseur e de la plaque mince, puisqu'on en déduit immédiatement la valeur de $e(n'_g - n'_p)$. Le tableau de ces teintes annexé à l'ouvrage classique « Les Minéraux des Roches », par Michel-Lévy et A. Lacroix, est d'ailleurs disposé de façon à donner directement la valeur de $(n'_p - n'_p)$ pour chaque teinte de polarisation et chaque épaisseur de lame mince.

Pour les minéraux polarisant dans les teintes vives, il est parfois assez difficile de reconnaître, au premier abord, si la teinte appartient au premier ordre ou au deuxième pour les jaunes, orangés, rouges et violettes, ou bien au deuxième ou au troisième ordre pour les bleus et verts. Il en est de même pour l'ordre exact des teintes très lavées qui se rencontrent dans les portions suivantes de l'échelle chromatique. Pour lever l'indécision, on peut se servir d'une lame auxiliaire, dont l'emploi très simple est fondé sur le principe suivant :

Si l'on amène une section cristalline à son *maximum d'éclairement*, les deux axes n'_g et n'_p de l'ellipse de section de l'ellipsoïde des indices par le plan de la préparation occupent alors les positions bissectrices des traces des sections principales des deux nicols, marquées par les deux fils du réticule de l'oculaire. Si l'on interpose sur le trajet des rayons lumineux, entre les deux nicols, une autre lame cristalline placée aussi de telle sorte qu'elle soit à son maximum d'éclairement (ou, plus simplement, si l'orientation de son N'_g a été marquée par le constructeur, en orientant cette direction suivant l'une des bissectrices des deux fils du réticule), deux cas peuvent se présenter :

a) *Les deux directions n'_g et N'_g se trouvent coïncider* et, par suite, aussi n'_p et N'_p ; dans ce cas, il est évident que les deux retards δ et Δ de la section considérée et de la lame auxiliaire vont s'ajouter pour la production de la teinte de polarisation chromatique, et que la teinte alors observée sera celle qui correspond à un retard $(\delta + \Delta)$. En d'autres termes, la teinte de polarisation de la section considérée va *monter* dans l'échelle chromatique par l'interposition de la lame auxiliaire.

b) *La direction de N'_g se trouve coïncider avec celle de n'_p* (et par suite N'_p avec n'_g); les deux retards δ et Δ sont alors de sens inverse et leurs effets se retranchent pour la production de la teinte de polarisation. Si le retard de la lame auxiliaire est inférieur à celui de la section considérée, la teinte résultante est celle qui correspond à un retard $(\delta - \Delta)$; si c'est l'inverse, la teinte correspond à $(\Delta - \delta)$.

La lame auxiliaire cristalline qui nous servira à déterminer la position précise d'une teinte de polarisation dans l'échelle chromatique est un *quartz compensateur*. C'est une lame taillée en biseau, d'épaisseur par suite régulièrement croissante d'une extrémité à l'autre (1); sous sa forme la plus commode, la direction de l'indice N_g se trouve à 45° de sa longueur, en sorte qu'en la présentant transversalement au plan de symétrie du microscope et en se bornant à la retourner entre les doigts, on amène ainsi successivement, par une manœuvre aussi simple que possible, la direction de cet indice à coïncider successivement avec les deux bissectrices des fils du réticule, c'est-à-dire avec les deux indices n'_g et n'_p de la section à étudier.

Comme on ne sait pas, *a priori*, quelle est la position respective de n'_g et de n'_p de la section considérée, on devra procéder par tâtonnement. En superposant la lame de quartz compensateur à la section à étudier, amenée à son maximum d'éclairement, en partant de l'épaisseur la plus faible du quartz et faisant glisser celui-ci de façon à en augmenter l'épaisseur suivant l'axe du microscope, dans l'un des cas

(1) Cette lame peut utilement servir aux débutants à se familiariser avec la gamme des teintes de polarisation, en la déplaçant sur la platine du microscope.

on verra la teinte de la section se laver de plus en plus et atteindre le blanc d'ordre supérieur. C'est qu'alors l'indice n'_g de la section coïncide avec la direction de l'indice N_g du quartz, tracée sur la lame auxiliaire. Nous avons donc, par là, la position respective des deux indices extrêmes de la section considérée; c'est là une indication sur laquelle je reviendrai plus loin.

Dans l'autre position du quartz compensateur, si l'on fait la même manœuvre, le retard graduellement croissant de la lame auxiliaire se retranche de celui de la section à étudier, et il arrive un moment où la teinte résultante arrive aux couleurs appartenant indubitablement au premier ordre, c'est-à-dire au jaune pâle, au blanc et au gris. Le nombre des teintes sensibles par lesquelles on est passé pour atteindre ce résultat donne évidemment, en lui ajoutant 1, l'ordre de l'échelle chromatique auquel appartient la teinte de polarisation du minéral et, par suite, la valeur du retard $\delta = e(n'_g - n'_p)$ de la section considérée.

Pour des sections polarisant très peu (dans les teintes gris foncé), si l'on veut en apprécier plus exactement la biréfringence, il peut, de même, y avoir intérêt à leur superposer une lame auxiliaire de retard connu, de façon à ce que la teinte résultante arrive dans une région de la gamme où l'appréciation en soit facile. Le mieux, à cet égard, est d'employer un quartz teinte sensible, dont la teinte, comme on le sait, passe immédiatement au bleu ou au rouge lorsque son retard est légèrement augmenté ou diminué. La variation de son retard, due à la superposition de la section cristalline à étudier, est donc facile à apprécier, et on en déduit la biréfringence de cette section.

Une détermination plus précise, mais d'une application généralement inutile dans la pratique courante, peut se faire à l'aide du comparateur de Michel-Lévy. Dans cet appareil, au moyen d'un prisme à réflexion totale, on juxtapose à l'image de la section considérée celle d'une lame de quartz, parallèle à l'axe et d'épaisseur variable donnée par la graduation de l'appareil, que l'on produit dans un petit microscope auxiliaire polarisant, qui constitue le comparateur proprement dit. En faisant varier l'épaisseur du quartz, on modifie la teinte de polarisation du comparateur; d'autre part, en faisant tourner la lame auxiliaire par rapport aux sections principales des nicols du comparateur, on fait varier l'intensité de cette teinte de polarisation en la diminuant si, au maximum, elle est supérieure à celle de l'image de la section à étudier dans le champ du microscope. Dans le cas contraire, on diminue l'intensité de la teinte de polarisation de cette section en tournant convenablement la platine du microscope. On peut ainsi arriver à égaliser rigoureusement la teinte de comparaison à celle de la section étudiée, aussi bien comme coloration que comme intensité.

Lorsqu'il en est ainsi, l'épaisseur ε du quartz auxiliaire étant donnée par la graduation de l'appareil et ses indices principaux N_g et N_p étant connus, on a :

$$e(n'_g - n'_p) = \varepsilon(N_g - N_p)$$

d'où l'on déduit la biréfringence cherchée $(n'_g - n'_p)$ si l'épaisseur e est connue.

Quant à l'épaisseur e de la préparation, elle peut aussi pratiquement se déterminer avec une approximation suffisante, sans mesure spéciale, lorsqu'il existe dans la préparation un minéral connu assez répandu en sections diversement orientées, c'est-à-dire polarisant avec des teintes différentes. Parmi ces sections, il est à peu près certain que celle qui polarise le plus a une biréfringence très voisine de la biréfringence absolue du minéral, c'est-à-dire de la différence de ses indices extrêmes n_g et n_p (nous pourrons d'ailleurs contrôler qu'il en est bien ainsi par l'emploi de la lumière convergente). Par une des méthodes précédemment indiquées (appréciation directe de la teinte de polarisation ou emploi du comparateur), on en déduit la valeur de $e(n_g - n_p)$ et, comme n_g et n_p sont supposés connus, on en tire la valeur de e .

C'est d'ailleurs, comme nous l'avons vu, le procédé pratiquement employé dans la taille des plaques minces. Les teintes de polarisation des quartz, présents dans la plupart des roches, ou, à défaut d'eux, des feldspaths, ne doivent plus se trouver dans la gamme des teintes colorées proprement dites et dépasser le blanc de premier ordre, lorsque l'épaisseur est convenable, c'est-à-dire égale à 3/100^{es} de millimètre, au maximum.

2^o Mesure de la biréfringence absolue du minéral ($n_g - n_p$).

S'il existe de nombreuses sections du minéral, le procédé approximatif qui vient d'être indiqué, en partant d'un minéral de biréfringence connue, pour la vérification de l'épaisseur de la préparation, est applicable à la détermination approximative de la biréfringence d'un minéral inconnu lorsque l'épaisseur est connue. On cherchera donc, parmi toutes les sections du minéral, celle qui a la plus grande biréfringence et qui doit donc contenir approximativement ses deux indices extrêmes n_g et n_p . Ceci posé, on peut admettre que la biréfringence de cette section est, à un degré d'approximation suffisant pour les recherches pétrographiques courantes, égale à la *biréfringence absolue du minéral*. Un examen en lumière convergente, dont nous verrons plus loin le principe, permettra d'ailleurs de reconnaître qu'il en est bien ainsi et que la section en question est, soit parallèle au plan des axes optiques s'il s'agit d'un minéral biaxe, soit parallèle à l'axe optique si le minéral est uniaxe.

On pourra de même, lorsque l'examen en lumière convergente aura fait reconnaître des sections perpendiculaires aux bissectrices n_g et n_p des axes optiques, en déterminant leurs biréfringences respectives, avoir ainsi les valeurs des différences $(n_m - n_p)$ et $(n_g - n_m)$, qui fixent la position de l'indice moyen n_m par rapport aux deux indices extrêmes n_g et n_p .

3° Détermination de la situation respective de n'_g et n'_p dans une section.

Etant connues les deux directions d'extinction d'une section, marquées sur celle-ci par la position des deux fils du réticule lorsque la section est amenée à l'une de ses positions d'extinction, il importe de déterminer quelle est, parmi ces deux directions, celle qui correspond à n'_g et aussi, par suite, celle qui coïncide avec n'_p .

Pour faire cette détermination des situations respectives de n'_g et n'_p , on se sert de lames auxiliaires telles que celles dont j'ai déjà exposé le principe d'emploi à propos de la détermination de la biréfringence de sections trop ou trop peu biréfringentes. La lame auxiliaire qui nous servira le plus souvent dans le cas qui nous intéresse actuellement est un *mica quart d'onde*, dont le retard est égal au quart de la longueur d'onde de la région moyenne du spectre (c'est-à-dire à la moitié du retard qui correspond au blanc de premier ordre); cette lame, examinée seule au microscope polarisant, donne donc une teinte *gris moyen*.

D'après ce que nous avons déjà vu, après avoir fixé par rapport à la section étudiée ses deux directions d'extinction, on amène ensuite cette section à l'une de ses positions d'*éclairement maximum*. Les deux directions n'_g et n'_p correspondent alors aux deux bissectrices des fils du réticule. On superpose alors le mica quart d'onde de façon que son indice N_g (marqué sur le verre) soit dans une direction à 45° des fils du réticule et l'on observe le changement de teinte qui en résulte pour la section. Si sa teinte de polarisation a *monté*, dans une mesure compatible avec l'addition d'un retard $\frac{\lambda}{4}$, c'est évidemment que le n'_g de la section correspond au N_g de la lame auxiliaire; si la teinte a *baissé* dans l'échelle des teintes (toujours dans une même mesure), c'est alors le n'_p de la section qui coïncide avec le N_g de la lame auxiliaire. En retournant le mica quart d'onde de façon que sa direction N_g soit à angle droit de la première position, on fait la contre-épreuve comme vérification du résultat obtenu.

L'emploi du mica quart d'onde sera très rapide et décisif toutes les fois que la section étudiée polarise dans une teinte colorée franche ou même encore dans le blanc ou les gris *clairs* du premier ordre. Mais, pour les sections polarisant trop peu, dans des gris *foncés*,

lorsque les directions du n'_g de la section et du N'_g du mica sont croisées, le retard Δ de la lame auxiliaire prédominant sur celui δ de la section étudiée, la teinte résultante correspond à un retard égal à $\Delta - \delta$; cette teinte pourra se trouver plus élevée que celle de la section (si $\Delta - \delta > \delta$ ou $\Delta > 2\delta$). Il est vrai que, dans la position où les indices n'_g et N_g sont parallèles, la teinte montera davantage, puisqu'elle correspond alors à la somme des deux retards δ et Δ et non plus à leur différence, comme le cas précédent. Il n'y a donc pas d'ambiguïté pour la détermination, si l'on procède avec attention.

Il peut néanmoins y avoir là une cause de difficulté, surtout pour les débutants, et il est en tout cas plus commode, pour les sections polarisant très peu, de se servir du quartz teinte sensible, déjà indiqué à leur propos pour l'appréciation de leur biréfringence (son emploi est même souvent nécessaire pour mettre en évidence l'existence même de cette biréfringence, lorsqu'elle est particulièrement faible). On se servira du quartz teinte sensible, ainsi qu'il vient d'être dit pour le mica quart d'onde, mais à la différence près qu'on observe alors, non la variation de la teinte de polarisation de la section étudiée résultant de la superposition de la lame auxiliaire, mais au contraire la variation apportée à la teinte de polarisation connue de la lame auxiliaire par l'addition ou la soustraction du faible retard tenant à la traversée de la section considérée. Nous savons d'ailleurs que les moindres variations de la teinte de la lame en question (et c'est pour cela qu'elle a été choisie) l'amènent immédiatement à un bleu ou à un rouge ne permettant aucune ambiguïté sur le sens de cette variation.

Par contre, l'emploi du quartz teinte sensible serait défavorable pour les sections polarisant dans des teintes vives et colorées. Il pourrait avoir comme unique résultat, en raison de la valeur de son retard, de l'ordre de λ , de faire passer la teinte de la section cristalline à une même teinte, mais appartenant à l'ordre immédiatement supérieur ou inférieur, suivant le cas, et l'appréciation des résultats pourrait parfois être délicate, tout au moins dans l'un des deux sens. Pour ces sections, il faut, comme je l'ai dit plus haut, se servir du mica quart onde, qui ne peut alors donner lieu à aucune ambiguïté.

Enfin, en ce qui concerne les sections à biréfringence très élevée (polarisant dans les teintes mal définies du quatrième ordre conduisant au blanc d'ordre supérieur), il faut alors se servir du quartz compensateur, dont l'emploi a d'ailleurs été déjà indiqué à propos de ces sections pour en apprécier la biréfringence. On trouvera facilement la position de la lame auxiliaire pour laquelle la teinte de polarisation très élevée de la section considérée se trouve ramenée aux teintes plus basses dans l'échelle chromatique. C'est qu'alors la direc-

tion du plus faible indice de la section étudiée, c'est-à-dire son n'_p , coïncide en direction avec le plus grand indice N_g de la lame de quartz auxiliaire.

4^o Angles d'extinction des sections cristallines.

Lorsque les sections des minéraux présentent des caractères cristallographiques apparents (faces cristallines, clivages, mâcles), on déterminera l'orientation des *directions d'extinction*, c'est-à-dire des indices n'_g et n'_p , par rapport à certains de ces repères cristallographiques choisis en conséquence. On verra, à propos de chacun des groupes de minéraux des roches, quels sont les repères qu'on a été amené à y adopter pour la mesure des *angles d'extinction*. Il existe cependant quelques lois générales qui doivent être mises en évidence.

Tout d'abord, lorsque les sections présentent un allongement bien marqué suivant une certaine direction et si elles sont limitées, dans cette direction, par les traces de deux faces parallèles, ou bien s'il existe une direction de clivage très facile coïncidant avec cet allongement, ce qui est souvent le cas, il est naturel de rapporter les angles d'extinction à la direction de l'allongement ou à celle du clivage facile. Or, l'allongement des sections peut correspondre, soit à un allongement marqué de cristaux de forme prismatique, soit à un aplatissement très accentué des cristaux de forme tabulaire. De même, l'existence d'une direction de clivage facile dans les sections allongées peut tenir, soit à l'existence de plans de clivage parallèles à l'aplatissement dans le cas des cristaux tabulaires (par exemple, chez les micas), soit à la coexistence de deux séries de clivages d'égale facilité se coupant suivant la direction d'allongement dans les cristaux prismatiques (les sections non parallèles à l'allongement montrent alors ces deux séries de clivages).

Par raison de symétrie, lorsque des cristaux présentent un allongement marqué, il doit se faire suivant un axe de symétrie, c'est-à-dire suivant l'un des indices principaux; de même, un aplatissement marqué doit se faire normalement à un axe de symétrie et suivant un plan de symétrie contenant les deux autres indices principaux (sous la condition, naturellement, qu'il ne s'agisse pas de cristaux du système triclinique, pour lesquels il n'y a ni axe, ni plan de symétrie). Les sections les plus caractéristiques, qui seront celles que l'on devra rechercher pour l'étude, seront alors *les plus allongées*, c'est-à-dire celles qui sont, soit parallèles à la direction d'allongement, soit perpendiculaires à l'aplatissement (évidemment avec une certaine tolérance).

Pour la même raison de symétrie que nous venons d'invoquer, lorsque le minéral présente *un seul clivage très facile*, avec ou sans

autres clivages plus difficiles (comme les micas, par exemple), ce clivage doit correspondre à un plan de symétrie cristallographique, si le système cristallin en comporte (c'est-à-dire si ce n'est pas un cristal triclinique), et contenir deux des indices principaux, étant perpendiculaire au troisième. De même, si le minéral présente *deux clivages prismatiques d'égale facilité* (comme les amphiboles ou les pyroxènes, par exemple), ces deux clivages doivent être cristallographiquement symétriques par rapport à un plan de symétrie, et la direction de leur intersection coïncidera avec celle de l'un des indices principaux, si ceux-ci sont en relation avec des axes cristallographiques, c'est-à-dire si le minéral n'est pas du système triclinique.

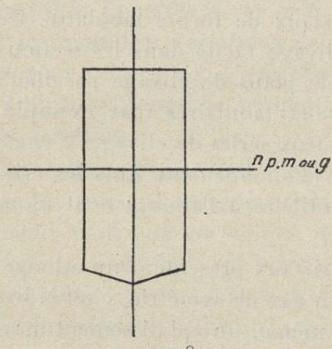
Nous allons examiner comment se comportent, à ce point de vue, les cristaux des divers systèmes cristallins. Mais, auparavant, il est une loi générale, applicable à toutes les sections à forme définie (et aussi à la disposition des clivages *d'égale facilité*), qu'il faut rappeler.

L'existence d'un axe binaire ou d'un axe principal d'ordre pair, jointe à celle du centre de symétrie, entraîne l'existence d'un plan de symétrie perpendiculaire à cet axe. Par suite, toute section parallèle à un axe binaire ou d'ordre pair, étant perpendiculaire à un plan de symétrie, a une forme symétrique par rapport à la trace de ce plan (fig. 8). L'extinction s'y fera suivant la direction de l'axe (qui

correspond à l'un des indices principaux) et suivant la trace du plan de symétrie. Lorsqu'une telle section présentera la forme la plus simple, c'est-à-dire une forme allongée limitée par deux côtés parallèles, elle s'éteindra donc *suivant son allongement* (ou suivant la direction commune des traces des deux clivages prismatiques, lorsque la section est parallèle à leur intersection). Il en sera évidemment de même pour une section devant son allongement au fait qu'elle est perpendiculaire à un aplatissement suivant un plan de

symétrie (ou pour une section faite normalement à un clivage facile unique).

a) Dans les systèmes cristallins ayant *un axe de symétrie principal* (cristaux uniaxes), l'allongement est parallèle à l'axe principal (axe optique) ou l'aplatissement perpendiculaire à cet axe. L'extinction des sections allongées se fait parallèlement et perpendiculairement à leur allongement et à la trace des clivages faciles lorsqu'il existe.



Sec'ion cristalline symétrique
à extinction longitudinale.

Pour ces systèmes, il faut noter que toute section perpendiculaire à l'axe principal (c'est-à-dire normale à l'allongement ou parallèle à l'aplatissement) reste *toujours éteinte*. Si elle a une forme définie, celle-ci permet de juger du système cristallin (quadratique, hexagonal ou rhomboédrique); il importera de ne pas les confondre avec des sections de cristaux cubiques, qui peuvent aussi présenter des sections carrées, octogonales, hexagonales ou triangulaires (1), mais qui, en lumière convergente, se comportent comme des corps isotropes et non uniaxes.

β) Dans le *système orthorhombique*, l'allongement a lieu parallèlement et l'aplatissement perpendiculairement à un axe binaire. Les extinctions des sections les plus allongées se feront donc encore toujours parallèlement et perpendiculairement à leur allongement (et à la trace des clivages faciles, lorsqu'il en existe).

γ) Dans le *système monoclinique*, les cristaux présentent souvent un aplatissement suivant le plan de symétrie unique (g^1), ainsi que des clivages faciles suivant ce même plan. Les sections les plus allongées, donc perpendiculaires à g^1 (sections de la zone ph^1), ont encore une extinction suivant leur allongement et suivant la direction perpendiculaire à celui-ci, qui coïncide avec l'axe de symétrie, c'est-à-dire avec l'un des indices principaux.

Mais les sections g^1 ont une direction d'extinction quelconque par rapport aux seuls repères cristallographiques qu'on y puisse trouver (arêtes ou traces de clivages, soit verticaux h^1g^1 , soit pg^1), car l'orientation des deux indices principaux contenus nécessairement dans le plan de symétrie g^1 y est d'ailleurs quelconque.

Il existe assez souvent, dans les cristaux monocliniques, une direction d'allongement plus ou moins marquée n'ayant pas lieu suivant l'axe unique (arête ph^1), mais, au contraire, suivant l'une des deux directions h^1g^1 ou pg^1 (orthose). Dans ce cas, les sections les plus allongées auront un angle d'extinction nul dans la seule orientation où elles sont perpendiculaires à g^1 et généralement un angle d'extinction croissant jusqu'à ce qu'elles viennent coïncider avec g^1 (*minimum d'extinctions*).

En résumé, dans le système monoclinique, à l'exception des sec-

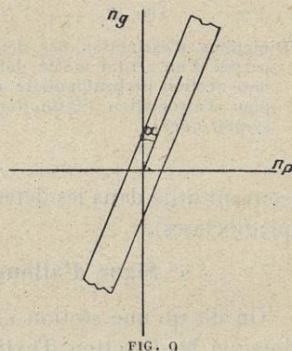


FIG. 9
Section cristalline d'apparence symétrique à extinction oblique.

(1) Suivant qu'elles sont perpendiculaires à l'un des trois axes quaternaires ou des quatre axes ternaires de ce système.

tions de la zone ph^1 , perpendiculaire à g^1 , les sections auront, en général, une extinction oblique à leur allongement (fig. 9).

δ) Système triclinique. — L'allongement ou l'aplatissement, lorsqu'ils existent, se feront sans aucune relation avec les axes de symétrie optique (fig. 9). Les angles d'extinction (α) seront donc, de même que pour les sections quelconques du système monoclinique, variables avec l'orientation de la section et la nature du minéral. Ce n'est que par hasard qu'on rencontrera des sections s'éteignant en long. Il en est de même pour les traces des clivages, qui ne présenteront aucune coïncidence avec les directions d'extinction.

CRISTAUX MACLÉS. — Nous envisagerons seulement le cas le plus simple, celui des cristaux à axe d'hémisphère normale dirigé perpendiculairement à la face d'association des cristaux élémentaires. Dans ce cas,

des sections orientées d'une façon quelconque par rapport à la face d'association couperont les ellipsoïdes des indices des deux individus élémentaires suivant deux ellipses entièrement indépendantes l'une de l'autre, et les deux cristaux juxtaposés s'éteindront d'une manière absolument indépendante l'un de l'autre. Par contre, on reconnaîtra facilement les sections orientées perpendiculairement à la face d'association (fig. 10) et parallèles à l'axe d'hémisphère, parce que les deux ellipses en question (et par suite les directions d'extinction) seront alors *symétriques*, par rapport à la trace du plan de macle (ligne de macle). Cette constatation sera

souvent utile dans les déterminations de certains minéraux (feldspaths plagioclases).

5° Signe d'allongement d'une section de minéral.

On dit qu'une section s'éteignant en long a un *allongement positif* lorsque la direction d'extinction parallèle à cet allongement est n'_g et qu'elle a un *allongement négatif* si cette direction est n'_p . La détermination du *signe d'allongement* revient donc à la recherche des directions respectives des deux indices n'_g et n'_p , dont il a été précédemment question.

Pour les sections à extinction oblique par rapport à leur allongement, on étend la définition ci-dessus en considérant celle des deux

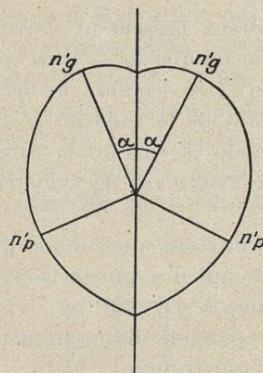


FIG. 10

Directions d'extinction des deux parties d'un cristal macle, dans une section perpendiculaire au plan d'association (extinctions symétriques).

Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires

directions d'extinction qui fait, avec l'allongement de la section, un angle inférieur à 45° .

Lorsqu'un minéral se présente en cristaux allongés suivant n_g ou aplatis perpendiculairement à n , le signe d'allongement de ses sections est *positif*; de même, ce signe sera *négatif* pour un minéral allongé suivant n_p ou aplati perpendiculairement à n_g . Un petit nombre de minéraux présentent leur allongement suivant n_m et leurs sections peuvent alors présenter un *signe d'allongement variable*; nous reviendrons sur ce sujet à la fin du chapitre relatif à l'examen en lumière convergente.

DÉTERMINATION EN LUMIÈRE CONVERGENTE ENTRE NICOLS CROISÉS

Nous n'envisagerons pas ici la théorie des phénomènes qui se produisent en lumière convergente, dont le développement nous entraînerait beaucoup trop loin, et nous nous bornerons à l'exposé simplifié des phénomènes qui se produisent avec les lames cristallines très minces qui importent seules dans les recherches de pétrographie.

Il est d'ailleurs inutile de se servir d'un microscope spécial à lumière convergente; pour les caractères relativement très simples empruntés aux phénomènes de cette nature, le microscope polarisant qui nous a servi jusqu'ici peut être adapté simplement de façon à les donner de façon suffisante.

Pour cela, on superpose au nicol polariseur un *condenseur très convergent*, dont il a été question à propos de la description du microscope et qui, dans les modèles récents de Nachet, se met en place instantanément par un mouvement de bascule; il faut seulement prendre la précaution de *l'amener exactement en contact avec la face inférieure de la lame de verre qui porte la préparation* (alors que, si l'on emploie ce condenseur pour l'examen en lumière parallèle à de forts grossissements, il faut le baisser notamment pour obtenir le maximum de netteté des images). On obtient ainsi un faisceau très convergent de lumière polarisée traversant la préparation et pénétrant ensuite dans *l'objectif qu'on choisit le plus fort de ceux qu'on possède*, tout au moins parmi les objectifs à sec pour les observations courantes (le n° 7 Nachet, ou même à la rigueur le n° 6, suffit dans la grande majorité des cas; si l'on avait besoin d'une ouverture plus grande pour le faisceau utile, correspondant à un *champ* plus grand pour le phénomène, on se servirait d'un objectif à immersion).

On commence par mettre l'objectif au point sur la préparation à la façon ordinaire, puis *on enlève l'oculaire*. En regardant alors suivant l'axe du microscope, *muni de l'analyseur*, on observe une image assez petite, mais en général suffisamment nette, des figures classiques dues à la lumière convergente. Ces figures se composent de lignes noires et de courbes colorées, ces dernières n'étant d'ailleurs visibles en lames minces que pour les minéraux très biréfringents.

Cette image est plus petite avec les objectifs les plus forts, mais elle gagne en netteté et en *grandeur de champ* (celui-ci étant défini par la convergence du faisceau qui prend part à la formation de ces figures). Il faut d'ailleurs observer que les rayons contribuant à la formation de la *partie centrale* de l'image en lumière convergente rencontreraient seuls l'oculaire de façon à coopérer à la formation de l'image obtenue en lumière parallèle; *quand on remet l'oculaire en place, la teinte de polarisation observée correspond donc à celle qui existe au centre du champ en lumière convergente.*

Si l'on veut utiliser le microscope de façon à obtenir une image plus grossie des figures dues à la lumière convergente, on peut collecter les rayons qui donnent naissance à cette image, au moyen d'une lentille à grande ouverture (lentille de Bertrand) qui s'adapte à la partie inférieure du tube porte-oculaire et qui, associée à l'oculaire *qui est alors conservé*, joue le rôle d'objectif accessoire et transforme ainsi la partie supérieure du microscope en un véritable microscope secondaire, donnant une image bien plus grossie, quoique généralement assez peu nette. Ce dispositif n'a guère d'avantages que pour mesurer l'angle des axes optiques, car il permet l'emploi d'un oculaire à réticule gradué ou à fils parallèles mobiles.

Dans la pratique courante des déterminations pétrographiques, où l'on n'a qu'à reconnaître des minéraux dont les caractères optiques ont été antérieurement étudiés et non à préciser ces caractères de façon rigoureuse, la mesure exacte des angles des axes optiques sera généralement inutile et il suffira d'apprécier leur ordre de grandeur. On pourra alors se borner à l'observation *sans oculaire* des figures dues à la lumière convergente (1).

On peut alors, si l'on ne tient pas à avoir l'image correspondant à un faisceau le plus convergent possible, c'est-à-dire à avoir le plus de champ possible, observer avec un objectif *assez fort* seulement (le n° 6 de Nachet, par exemple), de façon à avoir une image un peu plus grossie, bien qu'un peu moins nette, de la portion des figures de lumière convergente qui correspond à un champ un peu moins grand que celui qu'on obtiendrait avec un objectif plus fort.

1^o MINÉRAUX UNIAXES

En lumière convergente, les minéraux uniaxes donnent des figures composées : 1^o de lignes noires; 2^o de courbes d'égal retard colorées

(1) On peut aussi, en laissant au microscope sa disposition ordinaire, *sans enlever l'oculaire après la mise au point*, observer une très petite image du même phénomène *au-dessus de l'oculaire*, en plaçant l'œil convenablement. Cette image est trop petite pour en faire vraiment l'étude; mais, avec un peu d'habitude, ce dispositif peut être commode pour la recherche de sections convenablement orientées dans une préparation, car il ne nécessite pas d'enlever l'oculaire pour observer l'image de chaque section. On peut d'ailleurs, comme le fait M. Lacroix, grossir cette petite image par une loupe superposée.

(celles-ci étant seulement visibles, avec les préparations minces habituelles, pour les minéraux très biréfringents de ce groupe : mica noir, calcite et dolomie, etc.).

Les lignes noires sont dirigées parallèlement à la trace des sections principales des deux nicols et elles constituent, par leur association, une croix noire dont le centre se trouve au point où l'axe optique du minéral (1) vient traverser le champ de l'image en lumière convergente (2).

A) SECTIONS PERPENDICULAIRES A L'AXE OPTIQUE. — La croix noire est alors *centrée* et reste *invariable* lorsqu'on fait tourner la platine du microscope portant la préparation (fig. 11); cela est d'ailleurs

d'accord avec ce que nous avons vu précédemment pour l'examen en lumière parallèle, où ces sections restent constamment éteintes, puisque le centre du champ en lumière convergente est toujours occupé par le centre de la croix noire. D'autre part, les courbes d'égal retard colorées sont des cercles concentriques et qui resteront eux-mêmes fixes durant la rotation lorsqu'ils seront observables (à cet égard, l'examen au plus fort objectif possible, qui augmente le champ de l'image en lumière convergente, sera le plus favorable pour l'obtention de ces courbes, dont il est d'ailleurs pratiquement inutile de se servir dans les études pétrographiques courantes).

B) SECTIONS OBLIQUES SUR L'AXE OPTIQUE. — La croix noire est alors *décentrée*, son centre s'écartant de plus en plus du centre du champ à mesure que l'axe optique devient plus oblique et pouvant même sortir du champ quand la section est assez oblique (à ce point de vue encore, les objectifs les plus forts devront être préférés, si l'on désire avoir le centre de la croix visible le plus souvent possible). Il faut noter que les branches de la croix s'étalement assez fortement en s'éloignant du centre de celle-ci.

Lorsqu'on fait tourner la platine du microscope, le centre de la croix décrit un cercle autour du centre du champ; mais les branches de la

(1) Cet axe passant par le point de la section du minéral situé au centre du champ du microscope, et sa direction étant plus ou moins oblique par rapport à l'axe du microscope suivant l'orientation de la section.

(2) Il importe de ne pas confondre cette croix noire avec un phénomène parfois observable en lumière parallèle, lorsque certains minéraux se présentent en aiguilles très fines (parfois en fibres tellement minces qu'elles peuvent être indiscernables), groupées de façon à donner naissance à une sorte de globule ou de sphérolithe, en se disposant d'une façon radiée autour de son centre. Si les fibres en question s'éteignent en long, on aura donc une croix noire plus ou moins estompée en lumière parallèle (*sphérolithes à croix noire*), puisque les fibres ayant la direction des fils du réticule seront éteintes et qu'au contraire, celles dirigées à 45° présenteront leur maximum d'éclairement. Lorsqu'on tournera la préparation, la croix restera naturellement toujours orientée de la même façon, de nouvelles fibres venant à s'éteindre à mesure que celles qui l'étaient recommenceraient à polariser.

croix noire restent continuellement parallèles aux sections principales des nicols en balayant successivement le champ et sortant alternativement de celui-ci quand le centre de la croix est en dehors, comme l'indiquent les figures ci-contre (fig. 12). Lorsqu'une branche de la croix vient à passer par le centre du champ, on est évidemment dans l'une des positions donnant l'extinction en lumière parallèle (1).

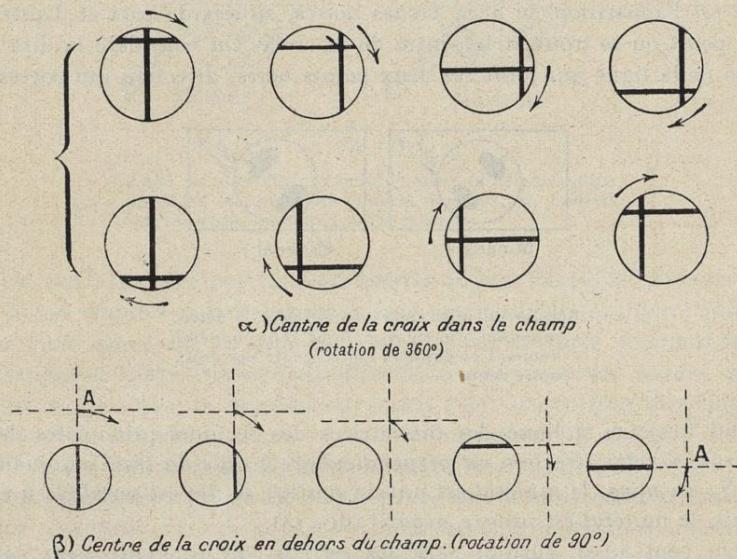


FIG. 12

Déplacement de la croix noire lorsqu'elle n'est pas centrée,
pendant la rotation du microscope.

C) SECTIONS PARALLÈLES A L'AXE OPTIQUE. — Dans ce cas, le centre de la croix se trouvant reporté à l'infini, lorsqu'une des quatre branches de la croix viendra à passer par le champ, on aura un envahissement de celui-ci par une ombre assez floue dirigée suivant la section principale de l'un des nicols; cela se produit pour les positions d'extinction en lumière parallèle.

En résumé, la caractéristique des cristaux uniaxes à l'examen en lumière convergente est la présence de lignes noires rectilignes et restant toujours parallèles aux traces des sections principales des deux nicols. On reconnaîtra, en lumière parallèle, les sections où la croix noire est centrée par le fait qu'elles restent éteintes dans quelque orientation que ce soit.

(1) Dans certains cas, il est même plus facile d'apprécier exactement la direction de ces positions d'extinction par ce procédé que par l'examen direct des extinctions en lumières parallèles, surtout lorsqu'on a affaire à des sections polarisant assez peu.

Détermination du signe optique.

A) CROIX NOIRE CENTRÉE. — On interpose un *mica quart d'onde* entre l'objectif et l'analyseur. La croix noire disparaît; mais, en même temps, il y a dislocation des courbes colorées circulaires d'égal retard, qui se dilatent dans deux quadrants opposés de la croix et se contractent dans les deux autres. Un résultat visible dans presque tous les cas est l'apparition de *deux taches noires*, situées de part et d'autre du point où se trouvait le centre de la croix. On considère la direction de la ligne qui joint ces deux points noirs, direction qui corres-

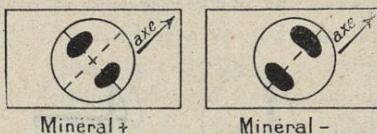


FIG. 13.

Emploi du mica quart d'onde pour la détermination du signe optique d'un minéral donnant en lumière convergente une croix noire centrée.

pond toujours à l'une des bissectrices des sections principales des nicols; si cette direction est perpendiculaire à celle du trait indiquant le N_g du mica, le minéral est *uniaxe positif*; si elle est parallèle à ce trait, le minéral est *uniaxe négatif* (fig. 13).

On peut aussi, surtout pour les sections de minéraux assez peu biréfringents, pour lesquels le premier anneau coloré est déjà fortement en dehors du champ, employer un *quartz teinte sensible* comme lame auxiliaire. Dans ce cas, il y a bien encore disparition de la croix noire, mais les quatre quadrants entre lesquels elle partageait le champ vont prendre des couleurs vives, dérivant de la teinte sensible (qui se retrouve seulement sur l'emplacement des lignes noires), soit en montant dans l'échelle chromatique, soit en baissant. Deux secteurs opposés prendront une teinte *bleue*, passant graduellement au vert en s'éloignant du centre du champ et des branches de la croix (où l'on a la teinte sensible); les deux autres auront, au contraire, une couleur *rouge* passant à l'*orangé*, puis au jaune en s'éloignant du centre ou des branches de la croix (fig. 14). Les secteurs rouges et jaunes correspondent à ceux pour lesquels l'interposition du mica quart d'onde donnait les deux taches noires (qui représentent aussi un abaissement de la teinte de polarisation de la lame auxiliaire, de même que le passage du violet au rouge et au jaune pour le quartz sensible). Si donc la bissectrice commune de ces deux secteurs est perpendiculaire à l' N_g du quartz, le minéral est *uniaxe positif* (l' N_g est alors bissecteur des secteurs bleus); si, au contraire,

L'axe N_g du quartz est bissecteur des secteurs rouges, le minéral est uniaxe négatif.

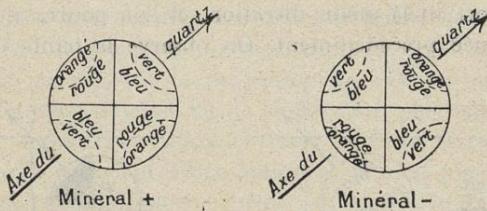


FIG. 14

Emploi du quartz teinte sensible pour la détermination du signe optique d'un minéral donnant, en lumière convergente, une croix noire centrée.

On peut traduire ces résultats par la RÈGLE PRATIQUE SUIVANTE :
1° Si on emploie le mica quart d'onde, on considère la figure faite par l'axe gravé sur la lame auxiliaire et par la ligne joignant les deux points noirs; si ces deux directions sont en croix, faisant un signe +, le signe du minéral est positif (+); si ces deux directions coïncident, faisant un signe —, le minéral est négatif (—).

2° Si on emploie le quartz teinte sensible, on considère les deux secteurs opposés ayant l'axe du quartz gravé sur la lame comme bissectrice commune, et on compare (mentalement) leur teinte à la teinte sensible propre à la lame auxiliaire; si cette teinte est bleue, donc plus (+) élevée dans la gamme, le minéral est positif (+); si elle est rouge, donc moins (—) élevée dans la gamme, le minéral est négatif (—).

B) CROIX NOIRE NON CENTRÉE, MAIS AYANT SON CENTRE DANS LE CHAMP.
— Les mêmes méthodes de détermination du signe optique sont encore valables, à part l'inégalité des secteurs dans le champ et le fait que, avec le mica quart d'onde, l'un des deux points noirs pourra se trouver en dehors du champ; il y aura avantage à faire toujours la contre-épreuve en retournant la lame auxiliaire, de façon à placer son axe successivement dans les deux directions perpendiculaires (cette remarque est d'ailleurs applicable aussi au quartz sensible).

C) CENTRE DE LA CROIX NOIRE EN DEHORS DU CHAMP. — Si le centre de la croix n'est pas trop extérieur, on peut, en notant la façon dont se comportent les branches de la croix lorsqu'elles traversent le champ, savoir dans quelle direction se trouve ce centre de la croix, même lorsque la section est dans une position d'éclairement maximum et qu'elle n'est pas traversée en son bord par les deux branches de la croix (si celle-ci est assez excentrée). La section étant orientée dans une de ces positions, on lui superpose l'une des deux lames auxiliaires

précédentes. Comme on connaît la direction de la bissectrice du secteur auquel appartient le champ dans la position où se trouve la préparation, on placera la lame auxiliaire de telle sorte que l'axe gravé sur son support ait la même direction, et l'on pourra alors appliquer la règle donnée précédemment. On observe la teinte que prend le

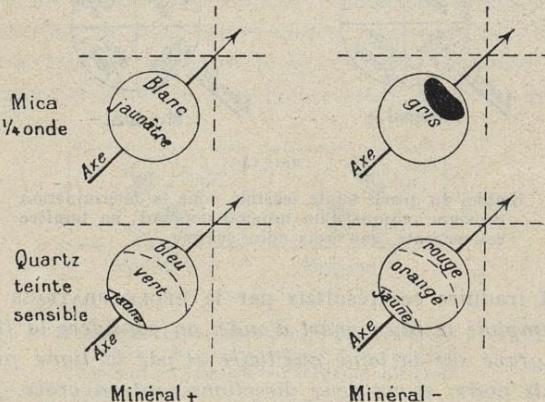


FIG. 15

Emploi du mica quart d'onde et du quartz teinte sensible pour la détermination du signe optique d'un minéral uniaxe taillé très obliquement à l'axe optique.

La préparation est supposée dans une orientation à 45° des positions d'extinction, et telle que le champ visible en lumière convergente soit compris dans le secteur S. O. de la croix noire (figurée en pointillé), dont les branches sont extérieures au champ.

champ en lumière convergente (fig. 15) et l'on compare cette teinte à la teinte propre à la lame auxiliaire employée (gris moyen pour le mica quart d'onde, violet sensible pour le quartz).

Mais cette détermination ne sera plus alors, pour ainsi dire, automatique, comme elle l'était dans les cas précédents, et elle nécessitera beaucoup d'attention pour ne pas commettre d'erreur d'appréciation. Il vaudra mieux, si la croix est fortement décentrée, employer la méthode suivante, seule applicable au cas où la section est parallèle à l'axe optique.

Lorsqu'on amène une des branches de la croix noire à passer par le centre du champ (position d'extinction en lumière parallèle), elle indique la projection de l'axe optique sur le plan de la préparation. Si le minéral est positif, cette direction correspond à un indice n' compris entre n_g et n_p , tandis que la direction perpendiculaire est celle de l'indice n_p ; par conséquent, si l'on se reporte en lumière parallèle, en tournant la platine de 45° de façon à passer à une position d'éclaircissement maximum et à amener cette projection de l'axe dans une direction déterminée, et si l'on détermine le signe de cette projection

en lumière parallèle par rapport à la seconde direction d'extinction qui lui est perpendiculaire, par le procédé connu (mica quart d'onde ou quartz teinte sensible, suivant le cas), *le signe de cette direction en lumière parallèle sera positif, c'est-à-dire le même que le signe optique du minéral en lumière convergente. Il en serait de même si le minéral était négatif*, car la projection de l'axe optique aurait un indice n' inférieur à l'indice n_g de la direction perpendiculaire.

D) SECTION PARALLÈLE A L'AXE OPTIQUE. — Dans ce cas, si l'on emploie la méthode qui vient d'être indiquée, ce n'est plus la projection de l'axe, mais l'axe optique lui-même qui se trouve dans le plan de la préparation; la seule difficulté est alors d'apprecier, quand on arrive à l'une des positions d'extinction, quelle est la direction de la branche de la croix qui vient alors passer par le champ en lumière convergente. Si l'on n'arrive pas à une certitude absolue à cet égard, il vaudra mieux recourir à une autre section du même minéral, s'il en existe d'autres dans la préparation.

2° MINÉRAUX BIAXES

Pour ces cristaux, les lignes noires en lumière convergente sont, en général, courbes au lieu d'être droites comme pour les minéraux uniaxes. Ce n'est que dans certaines orientations de la platine du microscope qu'on peut avoir des figures rectilignes, et même une sorte de croix noire (fig. 16) pour certaines sections convenablement orientées. Aussitôt qu'on tourne la platine, ces lignes s'incurvent immédiatement et la croix noire qu'on peut rencontrer accidentellement se disloque en deux branches de courbe (*hyperbole*), ce qui n'a jamais lieu avec les minéraux uniaxes.

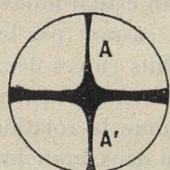


FIG. 16

Pseudo-croix noire que peuvent donner, dans certaines conditions, les cristaux biaxes en lumière convergente.

Quant aux courbes colorées d'égal retard, nous ne nous en occuperons pas ici, car elles seront très exceptionnelles dans les lames minces et ne nous fourniraient pas d'ailleurs de renseignement utile.

A) SECTION PERPENDICULAIRE A UNE BISSECTRICE DES AXES OPTIQUES. — Les lignes noires sont alors les deux branches d'une série d'hyperboles équilatères ayant pour asymptotes communes les traces des sections principales des deux nicols et passant constamment par les deux traces A et A' des axes optiques sur le plan de l'image (fig. 17). Quand le plan des axes se trouve à 45° des sections principales, les deux branches de l'hyperbole présentent leur maximum d'écartement, les deux traces des axes optiques en constituant alors les sommets. En tournant la platine, dans un sens ou dans l'autre, l'hyperbole se

resserre, de façon à passer toujours par les traces des axes, qui décrivent un cercle autour du centre du champ. Lorsque le plan des axes arrive à coïncider avec l'une des sections principales, l'hyperbole correspondante doit naturellement se réduire aux asymptotes du système, c'est-à-dire donner momentanément l'apparence d'une *croix noire*. En réalité, lorsqu'on examine attentivement cette croix (fig. 16 et 17),

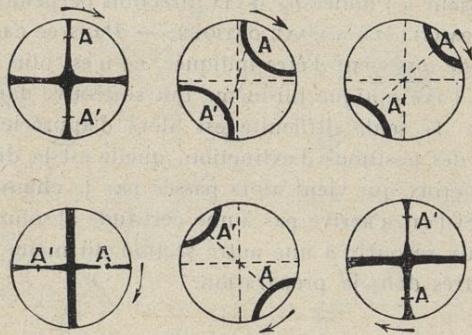


FIG. 17

Variations, pour une rotation de 180° du microscope, de la figure donnée en lumière convergente par une section d'un minéral biaxe perpendiculaire à la bissectrice de l'angle aigu de ses axes optiques (cet angle étant supposé assez faible).

on voit qu'elle a un aspect un peu différent de celle d'un cristal uniaxe taillé perpendiculairement à son axe, car la branche passant par les deux traces des axes optiques présente des étranglements en ces deux points et la branche qui lui est perpendiculaire est assez fortement étalée, même au centre de la croix. Lorsqu'on continue la rotation dans le même sens, la croix se disloque de nouveau en deux branches d'hyperbole, mais *dans les deux autres quadrants*, jusqu'à ce que la croix se soit formée à nouveau, ensuite l'hyperbole revient dans les premiers quadrants (fig. 17).

D'après le grossissement de l'objectif employé, l'écartement maximum des deux branches d'hyperbole variera. Ainsi que nous l'avons vu, les objectifs les plus forts, ayant le plus grand champ, seront ceux qui permettront de conserver dans ce champ les hyperboles correspondant à un plus grand angle des axes optiques, de part et d'autre de la bissectrice considérée. A partir d'un certain angle des axes variable avec l'objectif (ceci a lieu, en tout cas, si la bissectrice est la bissectrice de l'angle obtus des axes), les deux branches de l'hyperbole *sont sorties du champ* pendant une partie de la rotation (fig. 18). La rapidité avec laquelle elles s'écartent l'une de l'autre, lorsqu'on part d'une position donnant la croix noire, permet d'ailleurs d'apprécier, avec une approximation assez grande lorsqu'on se

sert d'un même objectif et qu'on a examiné à ce point de vue des sections de minéraux dont l'angle des axes est connu, la valeur de

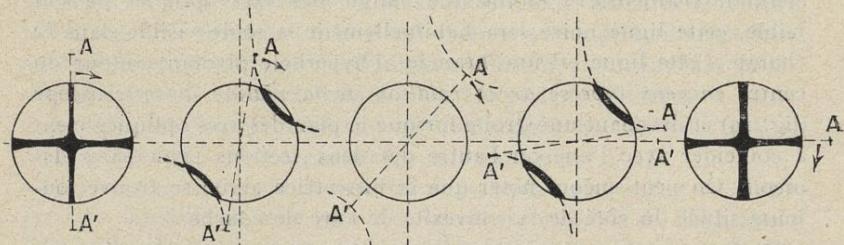


FIG. 18

Variations, pour une rotation de 90° du microscope, de la figure donnée en lumière convergente par une section d'un minéral biaxe perpendiculaire à la bissectrice de l'angle obtus des axes optiques.

l'angle (aigu ou obtus) que font les axes optiques de part et d'autre de la bissectrice considérée.

B) SECTION PRESQUE PERPENDICULAIRE A UNE BISSECTRICE. — Le phénomène est le même que dans le cas précédent, mais avec un décentrement en rapport avec l'angle que fait la bissectrice avec la

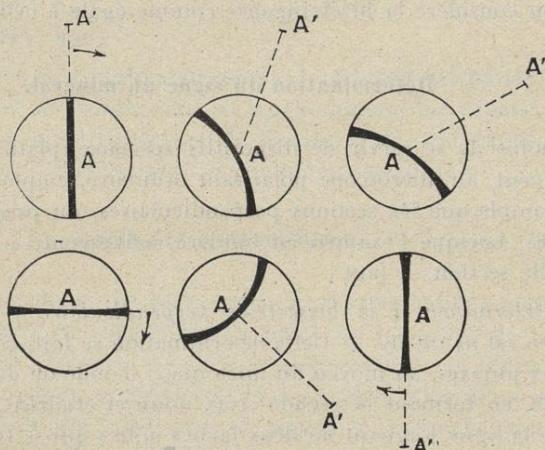


FIG. 19

Variations, pour une rotation de 180° du microscope, de la figure donnée en lumière convergente par une section d'un minéral biaxe perpendiculaire à l'un des axes optiques.

normale au plan de la préparation (et naturellement aussi avec le grossissement de l'objectif employé, ainsi qu'on le sait).

C) SECTION PERPENDICULAIRE A UN AXE OPTIQUE. — Dans ce cas, la trace de l'un des axes passant par le centre du champ, l'une des

lignes noires passera constamment par ce centre (ce qui concorde avec le fait qu'en lumière parallèle, une telle section est toujours éteinte). D'ailleurs, à moins que l'angle des axes optiques ne soit faible, cette ligne noire sera habituellement la seule visible dans le champ. Cette ligne est une branche d'hyperbole pivotant autour du centre *en sens inverse de la rotation de la platine du microscope* (fig. 19) et devenant une droite lorsque le plan des axes optiques vient à coïncider avec l'une ou l'autre des deux sections principales des nicols. On peut encore noter que la bissectrice aiguë se trouve toujours située du côté de la convexité de l'arc de courbe.

D) SECTION PARALLÈLE AU PLAN DES AXES OPTIQUES (PERPENDICULAIRE à n_m). — De même que pour les sections de minéraux uniaxes parallèles à l'axe optique, il y aura simplement envahissement du champ par une ombre pour les positions d'extinction, c'est-à-dire quand les indices extrêmes n_g et n_p , situés dans le plan de la préparation, coïncident avec les traces des sections principales des nicols. On doit noter que, parmi les diverses sections possibles pour un minéral biaxe, c'est celle de *plus grande biréfringence*. Nous avons d'ailleurs vu qu'on pourra se servir de ce caractère dans la détermination de la biréfringence d'un minéral, pour contrôler l'orientation de la section dont on considère la biréfringence comme égale à celle du minéral.

Détermination du signe du minéral.

A moins de se servir de dispositifs spéciaux (platine inclinante), on ne peut, au microscope polarisant ordinaire, employer d'une manière simple que les sections perpendiculaires (ou presque) aux bissectrices. Lorsque l'examen en lumière convergente a fait découvrir une telle section, il faut :

1^o Déterminer si la bissectrice perpendiculaire à la section en question est n_g ou n_p . — Cette détermination se fait, comme pour les cristaux uniaxes, au moyen du mica quart d'onde ou du quartz teinté sensible, en formant la pseudo-croix noire et étudiant, soit la direction de la ligne joignant les deux taches noires qui se formeront dans deux quadrants opposés, soit les colorations que prennent les quadrants opposés. Il n'y a, à cet égard, qu'à se reporter à ce qui a été dit pour les cristaux uniaxes. Les caractères indiqués pour les corps uniaxes positifs s'appliquent aux sections de minéraux biaxes taillées perpendiculairement à la bissectrice n_g , et ceux des corps uniaxes négatifs aux sections perpendiculaires à n_p .

2^o Reconnaître si cette bissectrice est la bissectrice de l'angle aigu ou obtus des axes optiques. — Lorsque les traces des deux axes optiques se trouvent dans le champ, avec un objectif ordinaire, à sec ou

même à immersion, on en peut conclure que la section est perpendiculaire à l'*angle aigu* des axes; cela se reconnaîtra à ce que les deux branches de l'hyperbole, à leur maximum d'écartement, restent dans le champ. Il y aura encore bien des chances pour qu'il en soit ainsi, avec un objectif ordinaire, si l'on peut affirmer que, dans leur dislocation maxima, les deux branches de l'hyperbole s'écartent à peine au dehors du champ; mais alors le demi-angle des axes, de part et d'autre de la bissectrice considérée, doit approcher de 45°.

Quand, par contre, la dislocation de la croix noire se fait avec une extrême rapidité, de telle sorte que les deux branches de l'hyperbole sortent du champ pour une rotation très faible du microscope, on en peut conclure immédiatement que la bissectrice en question est celle de l'*angle obtus* des axes optiques.

Lorsqu'il y a doute, on peut chercher à trouver plusieurs sections du minéral perpendiculaires à une bissectrice, et l'on comparera alors la rapidité de la dislocation de la croix noire pour une même rotation du microscope. Si on en trouve qui se classent, à ce point de vue, en deux groupes différents, les sections pour lesquelles la dislocation est *la moins rapide* sont évidemment celles qui sont perpendiculaires à la bissectrice de l'*angle aigu* des axes et qui, par suite, *donnent leur signe au minéral*.

On sait, en effet, que :

Si la bissectrice de l'*angle aigu* est n_g , le minéral est *positif*;

Si la bissectrice de l'*angle aigu* est n_p , le minéral est *négatif*,
et inversement pour la bissectrice de l'*angle obtus*, qui est n_p pour les minéraux *positifs* et n_g pour les minéraux *négatifs*.

Angle des axes optiques

Il n'est généralement pas utile, pour les déterminations pétrographiques courantes, de connaître avec précision la valeur de l'*angle des axes optiques*. Le plus souvent, la dislocation de la croix noire donnée par la section perpendiculaire à la bissectrice aiguë suffit, ainsi qu'il a été dit plus haut, pour en apprécier l'ordre de grandeur, avec un objectif connu et étudié à ce point de vue au moyen de minéraux eux-mêmes connus.

Des mesures directes précises ne peuvent se faire qu'avec un dispositif spécial.

Minéraux allongés suivant n_m

Certains minéraux présentent des sections allongées dont le signe d'allongement se montre variable, tantôt positif, tantôt négatif. Cela

tient à ce que leur allongement se fait suivant l'indice n_m ; dans les sections parallèles à cet allongement, l'indice suivant la direction transversale peut alors varier depuis n_p jusqu'à n_g , c'est-à-dire être soit plus grand, soit plus petit que l'indice n_m suivant l'allongement. On peut vérifier ce caractère (qui se rencontre dans le péridot, l'épidote, la wollastonite, etc.) par un examen en lumière convergente; celui-ci montre alors que le plan des axes optiques est transversal à l'allongement.

EXAMEN DES LAMES MINCES EN LUMIÈRE NATURELLE ET AVEC UN SEUL NICOL

Il existe encore un certain nombre d'autres caractères donnant des indications très précieuses pour la détermination des minéraux en lames minces, les uns observables en lumière ordinaire (sans nicol), les autres réclamant l'existence d'un nicol. Dans la pratique, l'interposition d'un nicol n'a d'autre effet, pour les caractères appartenant à la première catégorie, que de diminuer de moitié l'intensité de la lumière. Comme celle-ci reste suffisante avec un nicol et comme, d'autre part, il serait assez long d'enlever le polariseur et de le remettre en place après chaque examen fait sans nicol, en pratique toutes les observations qui pourraient être faites en lumière naturelle le seront *avec le polariseur, qui restera donc à demeure sur le microscope*, de telle façon qu'il n'y ait qu'à lever ou abaisser l'analyseur pour passer instantanément de l'examen entre nicols croisés à l'autre.

Nous réunirons donc ici les différentes sortes de caractères qui pourront être observés avec le microscope muni du polariseur seul.

1^o Détermination de la réfringence d'un minéral.

L'examen entre nicols croisés ne fournit de renseignements que sur la *différence* des indices extrêmes d'un minéral, mais non sur ces indices eux-mêmes.

Il existe divers *réfractomètres* permettant une détermination précise des indices des minéraux en lames minces; mais ce sont des instruments destinés à des recherches de précision, en particulier à établir les caractéristiques optiques des divers minéraux, et dont l'emploi n'est pas nécessaire dans la pratique pétrographique courante, où l'on a surtout à reconnaître les minéraux existant dans une préparation en utilisant les caractères distinctifs établis par les recherches et les déterminations précises des minéralogistes. Le plus souvent, lorsqu'une appréciation de la valeur absolue des indices doit intervenir pour lever l'indécision entre divers minéraux présentant par ailleurs des caractères analogues, ou bien pour reconnaître au premier abord certains minéraux exceptionnellement réfringents, il suffit alors d'avoir une *notion assez approchée de la valeur de l'indice moyen du minéral.*

On acquiert, à cet égard, des renseignements souvent suffisants *en abaissant le condenseur* qui surmonte le polariseur, de façon à faire traverser la préparation par des rayons assez obliques; il y a même souvent avantage, pour cela, même avec les objectifs faibles, à mettre en place le condenseur très convergent destiné à la lumière convergente et à l'abaisser progressivement. On voit alors les contours des minéraux se dessiner avec une grande netteté, par suite de réflexions totales se faisant le long de leurs surfaces de séparation d'avec les minéraux contigus (de même espèce ou d'espèces différentes). Il se produit, en outre, pour la même raison, une accentuation de leurs discontinuités intérieures (clivages, cassures irrégulières, inclusions, etc.) pouvant souvent donner de très utiles indications.

Mais, surtout, les minéraux ayant *une forte réfringence* sont immédiatement mis en évidence par des réflexions totales se produisant à *leur surface supérieure*, qui empêchent la propagation vers l'oculaire d'une partie de la lumière ayant pénétré dans le minéral et qui l'assombrissent par rapport aux minéraux ayant un indice moyen voisin de celui du baume dans lequel est montée la préparation. Tandis que les minéraux ayant le même indice què le baume conservent la même transparence que celui-ci, ceux d'indice plus élevé deviennent d'autant plus sombres, à mesure qu'on baisse le condenseur, que leur indice moyen est plus élevé par rapport à celui du baume. En outre, les inégalités de la surface supérieure qui se produisent nécessairement au polissage se mettant ainsi en évidence, les minéraux très réfringents prennent, en même temps, un aspect rugueux qui contribue aussi à donner, pour ces sections, *une impression de relief par rapport aux minéraux voisins*, par laquelle on traduit d'une façon abrégée ce phénomène. On dira donc qu'*en baissant le condenseur, une section prend un relief d'autant plus accentué que son indice est plus élevé par rapport à celui du baume*.

C'est ainsi que certains minéraux, tels que le sphène et le rutile, deviennent presque absolument obscurs dès qu'on baisse le condenseur, alors que le quartz, par exemple, conserve toujours un aspect poli et transparent. Avec un peu d'habitude, on arrive facilement à acquérir ainsi une notion assez approchée de l'indice moyen d'un minéral, incolore ou même coloré, en lame mince, et c'est là un examen qu'il importe de faire dès le début, avant même d'examiner la préparation entre nicols croisés, pour reconnaître au premier abord la répartition des sections de même nature minérale dans les préparations étudiées.

Procédé de Becke.

Lorsque le minéral étudié se trouve juxtaposé au baume, sur le bord de la préparation, on peut comparer avec précision les divers

indices de sa section avec l'indice du baume, au moyen d'un procédé qui est d'ailleurs d'une application générale pour la *comparaison des indices de deux sections cristallines contiguës*, ou bien d'une section cristalline et d'un autre milieu transparent qui lui est juxtaposé sur la préparation (baume ou liquide d'indice déterminé).

Ce procédé, dû au professeur Becke, est extrêmement simple, tout en mettant facilement en évidence des différences d'indices aussi faibles que celles que peuvent présenter, par exemple, deux sections de quartz contiguës, mais diversement orientées, c'est-à-dire pouvant ne guère dépasser 0,001.

Ce procédé utilise les réflexions totales qui se font, au contact de deux sections d'indices différents, sur leur surface de séparation et

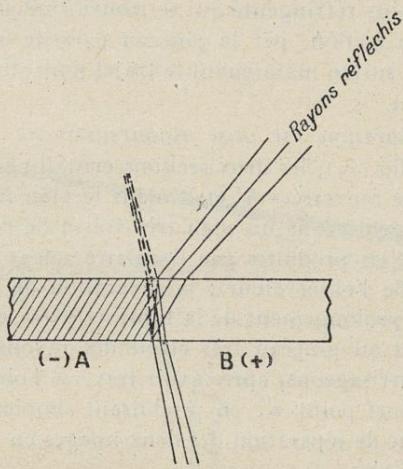


FIG. 20

Réflexion totale se produisant sur la surface de séparation des sections de deux minéraux inégalement réfringents.
(A, minéral le moins réfringent. B, minéral le plus réfringent).

dont nous avons déjà parlé précédemment en indiquant que, lorsqu'on baisse le condenseur, elles accentuent la séparation des deux sections. En réalité, ce phénomène existe toujours; mais, avec un fort éclairage de l'image, il est noyé au milieu d'une luminosité trop grande et son effet disparaît partiellement; pour le rendre bien visible, il faut, soit munir le microscope d'un diaphragme disposé au-dessous du polariseur, de façon à diminuer beaucoup le faisceau éclairant la préparation, soit éclairer celle-ci obliquement en déplaçant le miroir, soit simplement mettre en place le condenseur très convergent et le baisser autant que possible. Ce dernier dispositif, qui est celui que nous avons déjà employé pour apprécier le relief

que prennent les sections des divers minéraux, pourra donc servir encore dans ce cas.

Considérons d'abord, plus en détail, ce qui se passe à la jonction de deux minéraux, coupés par la préparation suivant deux sections séparées par une surface à peu près normale aux deux faces de la préparation (fig. 20). Sur cette surface, *du côté du minéral le plus réfringent*, un certain nombre des rayons lumineux du faisceau éclairant subissent une réflexion totale, au lieu de traverser cette surface de séparation et d'aller contribuer en partie à la formation de l'image de la face supérieure de la section la moins réfringente, comme ils le devraient. Il existe donc, le long de la ligne de séparation des deux plages sur la face supérieure de la préparation, une certaine zone $\alpha \beta$ de la section la plus réfringente qui se trouve suréclairée par rapport au reste de cette section, par le pinceau parasite un peu divergent dont nous allons suivre maintenant le trajet dans diverses conditions de mise au point.

A) Si la préparation est mise rigoureusement au point sur sa face supérieure (fig. 21), les deux sections cristallines A et B donnent des images réelles renversées A' et B' dans le plan focal de l'oculaire (ou, plus exactement, dans un plan très voisin de celui-ci et tel que les images virtuelles produites par l'oculaire soient à la distance de vision distincte de l'observateur); la séparation de ces deux images sera en α' sur le prolongement de la ligne αO (O = centre optique de l'objectif). Quant au pinceau très étroit des rayons réfléchis totalement que nous envisageons, après avoir traversé l'objectif, il viendra converger au même point α' , en produisant simplement une accentuation de la ligne de séparation des deux images en question, ensuite grossies par l'oculaire.

B) Examinons maintenant ce qui se passe lorsqu'on dérange la mise au point, en abaissant l'objectif, c'est-à-dire en le rapprochant de la préparation (fig. 22).

L'œil continue à voir, avec le grossissement propre à l'oculaire, ce qui se passe dans le même plan que précédemment, que je continuerai à désigner, pour abréger, sous le nom de plan focal de l'oculaire. On continue à voir, mais avec une netteté décroissante à mesure qu'on déplace l'objectif, les images renversées A' et B' des deux sections cristallines; leur séparation est en α'_1 , sur le prolongement de la ligne αO_1 (O_1 = nouvelle position du centre optique de l'objectif). Il y a donc un léger déplacement de cette ligne de séparation; les images, en perdant graduellement de leur netteté, deviennent en même temps un peu plus grossies.

Quant au pinceau des rayons totalement réfléchis que nous envisageons, sa convergence vient alors se faire en β_1 , au-dessus du plan

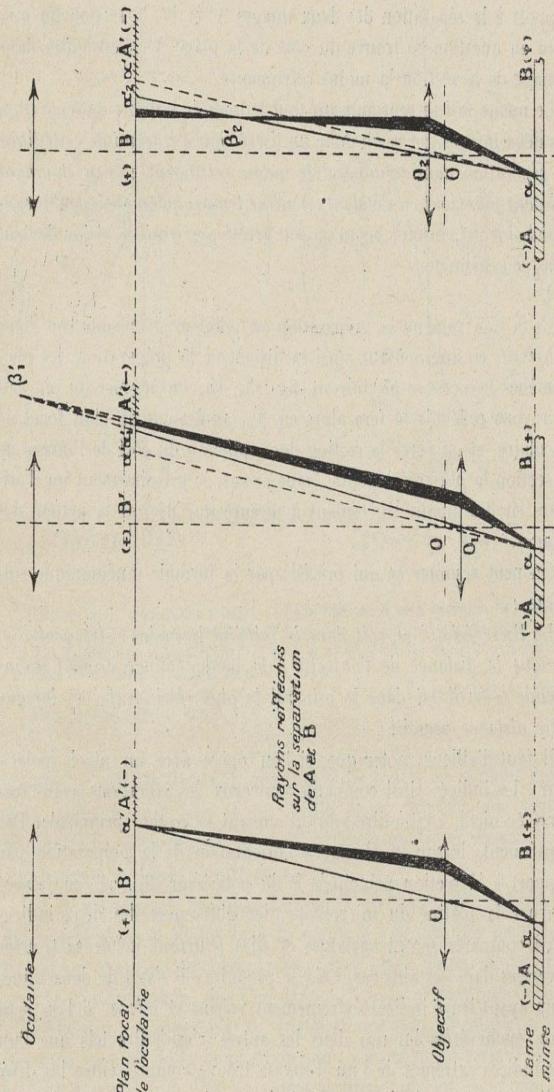


FIG. 23

FIG. 24

FIG. 25

focal de l'oculaire; mais l'œil verra *sa section par ce plan focal*, sous la forme d'un liseré éclairé, d'autant plus élargi que la convergence se fera plus loin de ce plan, c'est-à-dire que l'on déplacera davantage l'objectif. Il est facile de constater, sur la figure ci-jointe, que, par rapport à la séparation des deux images A' et B', la section du pinceau en question se trouve du côté de la plage A', c'est-à-dire dans l'image de la section la moins réfringente.

Le même fait se reproduisant tout le long de la ligne de séparation des deux images, *on verra donc un liseré clair s'écartant de cette ligne de séparation dans le minéral le moins réfringent et s'en éloignant d'autant plus (tout en s'étalant en même temps) qu'on abaissera davantage l'objectif*, jusqu'à ce qu'on soit arrêté parce que la vision devient trop peu distincte.

C) Si l'on ramène la préparation au point et si, ensuite, *on élève l'objectif*, en augmentant ainsi sa distance à la préparation, les phénomènes inverses se produiront (fig. 23). La convergence du pinceau de rayons réfléchis se fera alors en β'_2 , au-dessous du plan focal de l'oculaire, et on verra la section de ce pinceau du côté de l'image de la section *la plus réfringente*. Dans ce cas, le grossissement ira d'ailleurs en diminuant légèrement à mesure que décroît la netteté des images.

On peut résumer ce qui précède par la formule mnémonique suivante :

Le liseré éclairé se voit dans le minéral le moins réfringent (—) lorsque la distance de l'objectif à la plaque mince devient moins grande (—); il est dans le minéral le plus réfringent (+) lorsque cette distance grandit (+).

Il faut d'ailleurs noter que, si l'on opère avec un nicol (polariseur), les indices ainsi comparés sont ceux des vibrations ayant traversé ce nicol, c'est-à-dire vibrant suivant sa section principale. Par conséquent, lorsqu'on changera l'orientation de la préparation par rapport à la section principale P du polariseur (fig. 24) en faisant tourner la platine du microscope, les différences des deux indices ainsi comparés seront variables et elles pourront même se trouver inversées dans certains cas. Cela se produira s'il s'agit de deux minéraux ayant leurs indices extrêmement voisins et même, si l'on peut dire, enchevêtrés les uns dans les autres (c'est-à-dire tels que l'un des indices extrêmes de l'un d'eux se trouve compris entre les deux indices extrêmes de l'autre minéral) ou bien encore, *a fortiori*, si l'on compare entre eux les indices de deux sections diversement orientées du même minéral et telles que, par exemple, le n'_g de l'une des sections soit voisin, comme direction, du n'_p de l'autre et inversement (fig. 24).

L'expérience montre facilement que, si l'on réduit convenablement l'intensité de l'éclairage de la préparation, on arrive, dans une roche formée d'une mosaïque de cristaux de quartz diversement

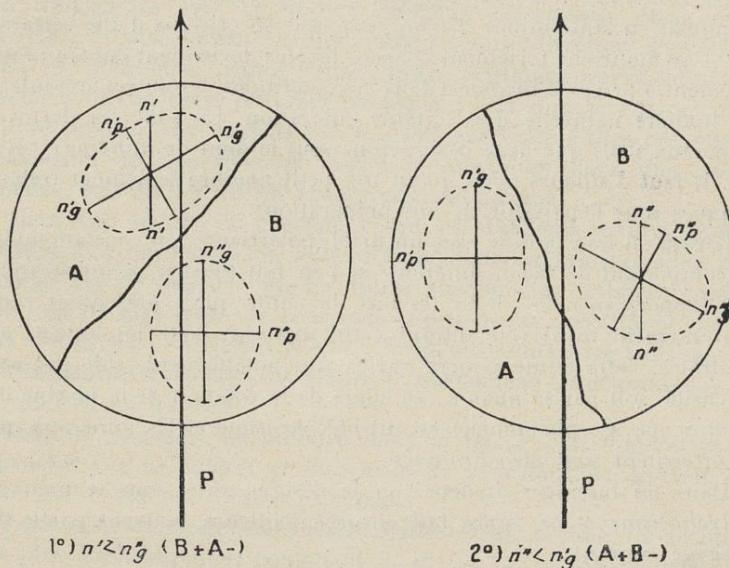


FIG. 24

Variations de la réfringence relative de deux sections A et B vues dans le champ du microscope muni du polariseur P lorsqu'on fait tourner la préparation.

1^o Les deux indices comparés sont n' pour A et n''_g pour B ; la section A paraît alors moins réfringente que B, si $n' < n''_g$;

2^o Les deux indices comparés sont n'_g pour A et n'' pour B ; la section A paraît alors plus réfringente que B, si $n'' < n'_g$.

orientés, à voir les liserés en question entre toutes les sections contiguës. Cela indique bien la sensibilité de ce procédé, par lequel, comme je l'ai dit précédemment, on arrive à mettre en évidence des différences d'indice de l'ordre de 0,001.

Par ce moyen, on arrive facilement à distinguer les indices des divers feldspaths et Michel-Lévy l'a employé à déterminer ces indices en valeur absolue, par comparaison avec celui d'une goutte d'un liquide d'indice connu, que l'on déposait sur la préparation (le couvre-objet étant enlevé) à côté du cristal en question. Si celui-ci n'était pas situé au bord de la préparation, on l'y amenait en faisant sauter à l'aide d'une aiguille fine les autres sections qui l'en séparaient. Ce procédé peut, dans tous les cas, être employé pour comparer à l'indice du baume ceux des minéraux situés au bord de la préparation ou des discontinuités qu'elle peut présenter. C'est là un moyen de contrôle qu'il ne faut pas négliger à l'occasion.



2^e Coloration des minéraux en lames minces.

Particularités de cette coloration (pléochroïsme).

Les minéraux incolores sur une certaine épaisseur le restent évidemment en lame mince. Parmi ceux qui, en cristaux d'une certaine taille, se montrent fortement colorés, les uns deviennent encore pratiquement à peu près incolores dans ces conditions, les autres présentent en lumière naturelle une certaine coloration. Ce sont ces derniers minéraux seuls que nous désignerons sous le nom de *minéraux colorés*. Il faut d'ailleurs noter qu'un très petit nombre seulement restent opaques sous l'épaisseur de nos préparations.

Lorsqu'on les examine avec un nicol (polariseur), on constate qu'ils se comportent de façon différente si l'on fait tourner la préparation par rapport au nicol. Pour les uns, la teinte qu'ils présentent reste pratiquement invariable durant cette rotation; pour les autres, au contraire, cette teinte pourra varier très notablement, soit par son intensité, soit par sa nuance, au cours de la rotation de la platine du microscope. Ce phénomène est dit *pléochroïsme* et les minéraux qui le présentent sont *pléochroïques*.

Dans les ouvrages anciens, on le désigne aussi sous le nom de *polychroïsme* et ce terme fait encore, d'ailleurs, souvent partie du langage courant.

Ce phénomène, qui nous fournira souvent de très utiles indications, est analogue au phénomène classique que présentent certains minéraux colorés qui, examinés par transparence, soit en grandes masses, soit en cristaux de taille réduite, à la lumière blanche ordinaire, montrent ainsi des teintes variables avec la direction suivant laquelle cette lumière les traverse (par exemple, bleue dans une direction, jaune dans une direction perpendiculaire); c'est là le polychroïsme classique.

Dans le pléochroïsme des sections minces au microscope polarisant muni de son polariseur, il n'y a pas de variation de la direction suivant laquelle la lame est traversée par la lumière. Mais cette lumière blanche est polarisée et il y a une inégalité dans l'absorption relative des radiations de longueurs d'onde différentes, suivant la direction du plan de vibration de la lumière incidente par rapport aux éléments de symétrie optique de la section envisagée. On observe donc, pour une même section, des teintes différentes suivant son orientation par rapport à la section principale du polariseur; alors que, sans nicol, on voit cette section avec une teinte moyenne et invariable.

La trace de cette section principale du polariseur, qui est le plan de vibration de la lumière incidente, coïncide avec l'un des fils du réticule (en général, c'est avec le fil orienté suivant le plan de symé-

trie du microscope, mais cela varie avec la construction de l'analyseur, qui règle naturellement la position du polariseur, et il est nécessaire de s'en assurer pour chaque microscope). Lorsqu'on amène en coïncidence avec ce fil une direction déterminée, on a ainsi la teinte de pléochroïsme correspondant à cette direction. Par exemple, les différentes teintes d'une section cristalline varieront d'une façon continue entre celle qui correspond à la direction n_g et celle qui se produit dans la direction n_p , soit que l'une d'elles présente le maximum de coloration et l'autre le minimum dans une même nuance, soit qu'il y ait un changement de nuance.

Dans tous les cas, on constate, ce qui est d'ailleurs naturel, que la distribution des teintes de pléochroïsme dans un minéral obéit aux mêmes lois de symétrie que les autres phénomènes optiques, c'est-à-dire que les directions des trois indices principaux constituent encore des directions privilégiées et que, lorsqu'on connaît les trois teintes correspondant à ces trois directions, le phénomène est déterminé pour le minéral en question.

Dans la pratique, on définira donc la teinte d'un minéral pléochroïque par sa nuance et l'intensité de sa coloration suivant les trois directions des indices principaux.

Pour cela, on cherchera d'abord, entre nicols croisés, les sections les plus biréfringentes, contenant n_g et n_p , et on déterminera les directions respectives de n_g et de n_p ; en enlevant ensuite l'analyseur, et amenant successivement les deux directions en question en coïncidence avec le fil du réticule qui sert de repère, on aura donc les teintes correspondant aux deux indices extrêmes n_g et n_p . Puis, en cherchant une section reconnaissable qui contienne n_m , c'est-à-dire une section perpendiculaire au plan des axes (soit perpendiculaire à une bissectrice, soit perpendiculaire à un axe optique), on déterminera la teinte de pléochroïsme correspondant à n_m .

Nous pouvons citer, parmi les minéraux les plus essentiels des roches qui sont colorés en lame mince, deux catégories qui se distinguent immédiatement par le seul caractère du pléochroïsme :

Minéraux très pléochroïques en lame mince : mica noir, amphiboles, quelques pyroxènes seulement (hypersthène, aegyrine), chlorites et chloritoïdes, tourmaline, etc.

Minéraux à peine ou non pléochroïques : la plupart des pyroxènes, péridot, cordiérite, andalousite, disthène, etc.

Il est à noter que la cordiérite, dont la variété dichroïte est classique depuis si longtemps pour le phénomène du polychroïsme (d'ailleurs en fragments de grande taille seulement), est très peu pléochroïque en lame mince. Mais elle nous fournit un exemple d'un phénomène spécial, celui des *auréoles pléochroïques*, qui se produit autour de certains minéraux de petite taille (zircon, apatite) se rencon-

trant parfois en inclusions à son intérieur; on y voit se différencier une zone dans laquelle le pléochroïsme apparaît en évidence, donnant une teinte jaune bien marquée suivant une direction et bleuâtre dans la direction perpendiculaire, alors qu'il est inappréciable dans le reste de la section de la cordiérite, qui est pratiquement à peu près incolore avec l'épaisseur normale des lames minces.

Le même phénomène se retrouve dans quelques autres minéraux; il est particulièrement net et fréquent dans le mica noir, qui se présente dans nos préparations avec une teinte variant depuis un brun plus ou moins foncé et rougeâtre, suivant sa teneur en fer, dans la direction de son clivage, jusqu'à un brun très clair dans la direction perpendiculaire. Or, autour des inclusions de zircon ou même d'apatite qu'il renferme assez souvent, on voit une exagération très marquée des teintes en question et du pléochroïsme; leur degré de fonçage se trouve, pour ainsi dire, multiplié par un certain coefficient, en sorte que la teinte suivant le clivage peut devenir à peu près noire et celle suivant la direction perpendiculaire brun foncé. Dans les deux cas que je viens de citer, les teintes de pléochroïsme deviennent, dans l'auréole en question, celles qui correspondraient à une épaisseur bien plus grande du minéral.

La cause et la nature de ce phénomène très curieux sont d'ailleurs encore inconnues; on l'a parfois attribué à une radioactivité des minéraux en inclusion à leur intérieur, mais sans preuve bien démonstrative.

3° Autres observations en lumière naturelle (ou avec un nicol).

L'examen avec un seul nicol fournit, comme on le voit, toute une série d'indications utiles, et *il est toujours très avantageux de procéder à un examen soigneux des préparations dans ces conditions, avant de procéder aux déterminations entre nicols croisés.* On y observe ainsi encore la **forme des sections** des minéraux, l'absence ou la présence de **clivages** ou de **cassures** distribuées d'une façon plus ou moins régulière, le degré de **transparence** ou de **luminosité** du minéral, l'existence d'**inclusions** parfois caractéristiques, etc. On verra, à propos des diverses espèces minérales que l'on aura à envisager, quels sont les caractères qu'on peut utilement observer à cet égard.

RÉSUMÉ

En résumé, les déterminations purement optiques que l'on peut faire au microscope polarisant sur les sections de roches, naturelles ou artificielles, sont les suivantes :

1° *Avec un seul nicol (polariseur) :*

Coloration des minéraux par transparence en lame mince; présence ou absence de pléochroïsme chez les minéraux colorés;

Forme des sections, présence ou absence de clivages ou de cassures plus ou moins régulières, d'inclusions spéciales, etc.;

Réfringence moyenne du minéral (relief obtenu en baissant le condenseur); comparaison des indices du minéral, soit entre eux, soit à ceux de minéraux connus, soit avec le baume ou avec un liquide d'indice connu (procédé de Becke).

2° *Entre nicols croisés :*

Distinction des corps *monoréfringents* (non cristallisés et cristaux du système cubique) et *biréfringents* (cristaux des autres systèmes).

Examen des sections de minéraux biréfringents :

a) *En lumière parallèle* : Biréfringence des sections cristallines. Biréfringence absolue du minéral. Situation respective des indices n'_g et n'_p d'une section. Angles d'extinction des sections par rapport à un repère cristallographique (allongement, traces de clivages); signe d'allongement d'une section. Présence ou absence de mâcles.

b) *En lumière convergente* : Distinction des minéraux *uniaxes* et *biaxes*. Sections d'orientation caractéristique. Détermination du signe optique. Valeur approchée de l'angle des axes optiques dans les corps biaxes.

Le tableau suivant résume les conclusions relatives au système cristallin auquel appartient le minéral :

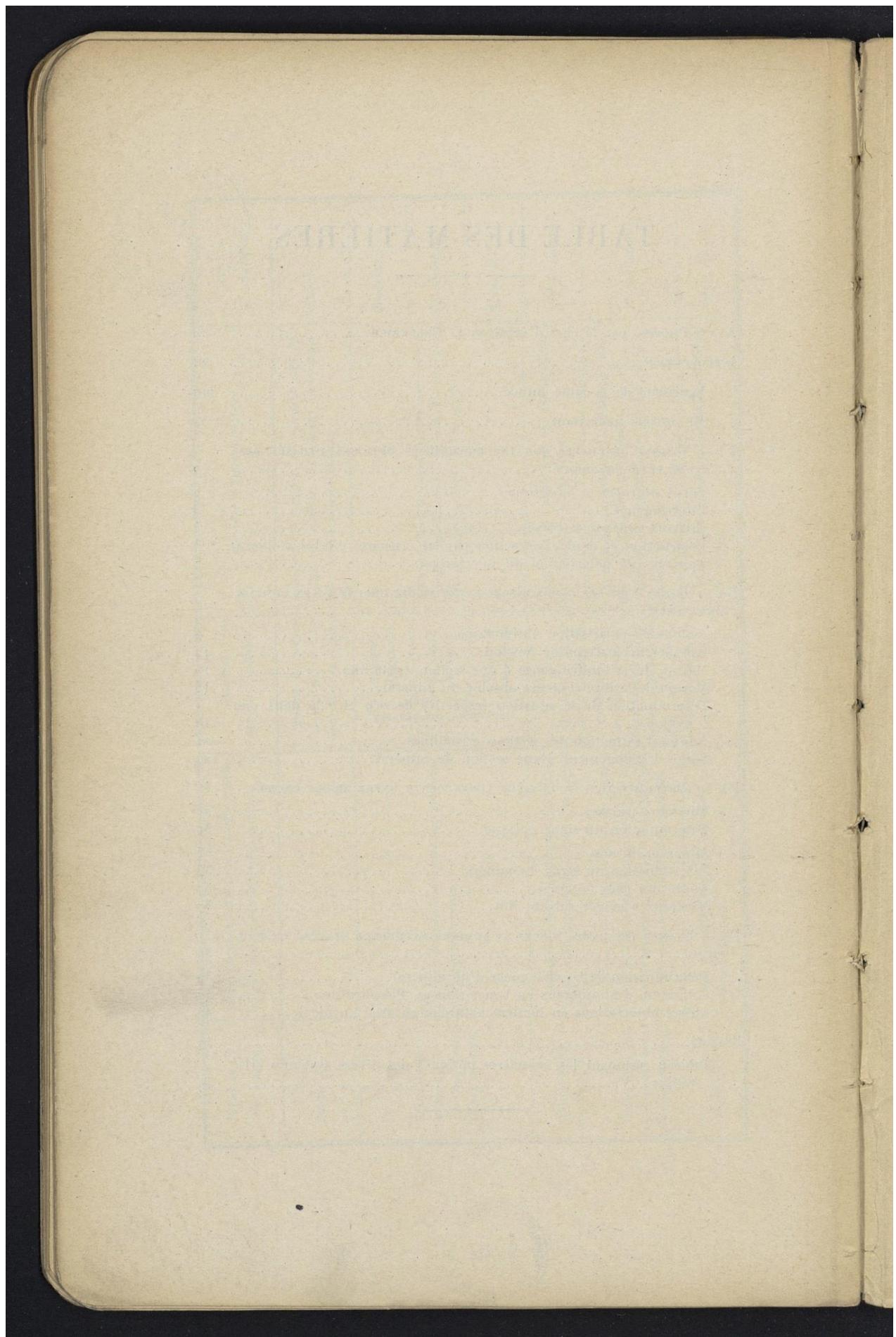
FORME DE L'E. DES INDICES	RELATION ENTRE LES AXES DE L'E. DES INDICES ET LES AXES CRYSTALLOGRAPHIQUES	SECTIONS TOUJOURS ÉTINTES	SECTIONS À FORMES DÉFINIES	SISTÈME CRYSTALLIN			
Sphère.		Toutes les sections constamment éteintes. Ne donner rien en lumière convergente. (Rechercher contours polygonaux ou divagés pour avoir la certitude que ce sont bien des cristaux).		C cubique.			
Ellipsoïde de révolution. Un axe optique. (Crist. uniaxes.)	L'axe optique coïncide avec l'axe principal de symétrie du cristal.	<p style="text-align: center;">(en limite de névéghette)</p> <table border="0" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: right;">Symétrie quaternaire</td> <td style="text-align: center;">Symétrie ternaire</td> <td style="text-align: left;">Symétrie hexagonale</td> </tr> </table>	Symétrie quaternaire	Symétrie ternaire	Symétrie hexagonale	<p>Sections toujours symétriques avec extinction parallèle à leur allongement (si elles sont rectangulaires) ou à leur axe de symétrie.</p>	I rhomboédrique.
Symétrie quaternaire	Symétrie ternaire	Symétrie hexagonale					
Ellipsoïde à trois axes inégaux.	Les trois indices principaux coïncident en direction avec les trois axes cristallographiques.	Branche d'hyperbole en limite convergente (les autres sections donnent deux branches d'hyperbole, pouvant former une pseudo-ellipse noire dans certains cas).	Les sections symétriques ont une extinction parallèle à leur allongement.	O orthorhombique.			
Deux axes optiques (directions d'uniréfringence). (Crist. biaxes.)	Un des indices principaux coïncide avec l'axe unique de symétrie cristallographique, les deux autres dans le plan de symétrie. Pas de relation (puisque pas d'axe cristallographique).		<p>1^o Sections symétriques (zone ph') à extinction parallèle à leur allongement.</p> <p>2^o Sections dissymétriques à extinction quelconque.</p>	M monoclinique.			
			Sections toutes dissymétriques à extinction quelconque.	T triclinique.			

TABLE DES MATIÈRES

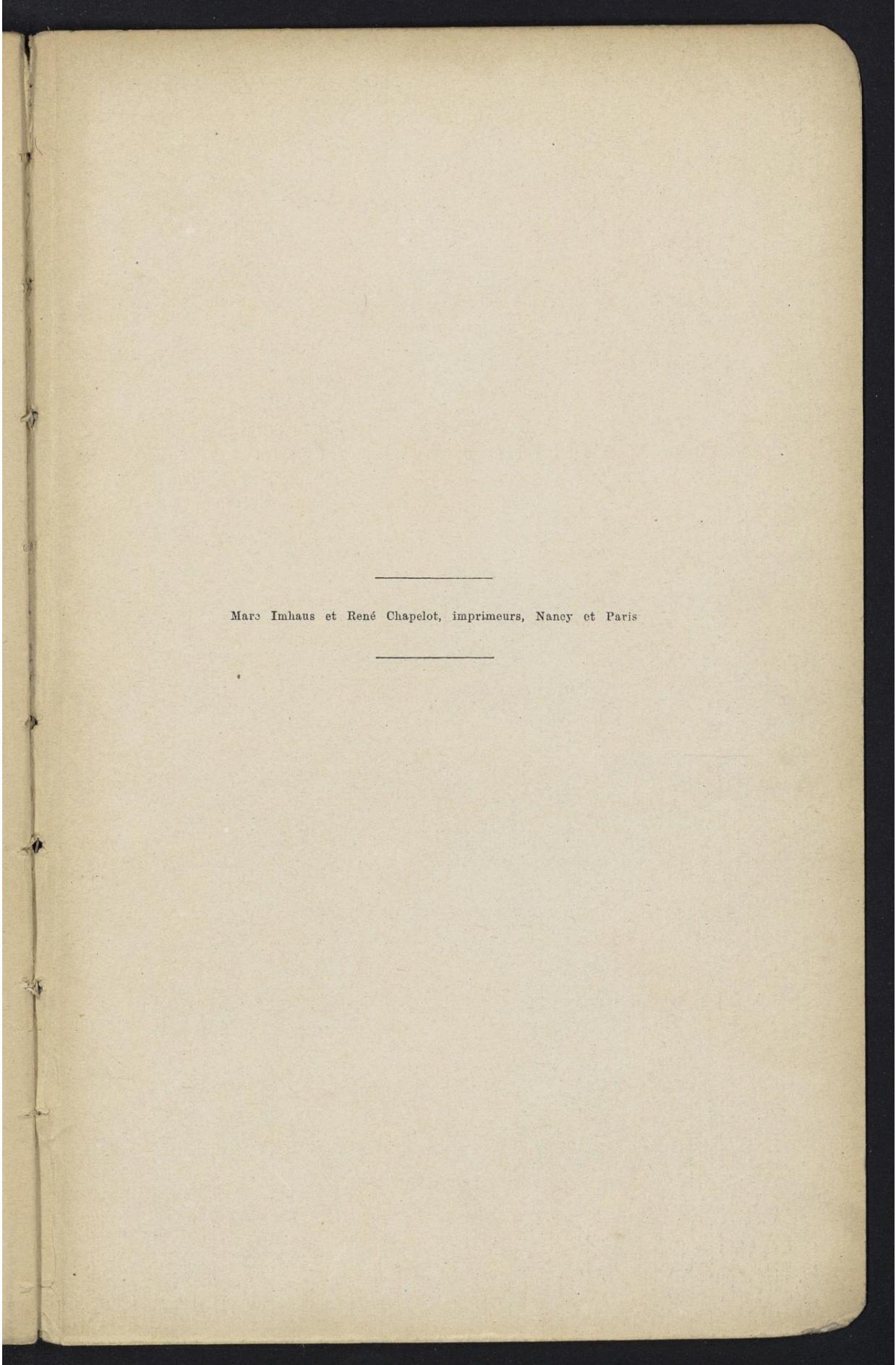


AVANT-PROPOS, par le chef d'escadron F. CELLERIER.....	III
INTRODUCTION.....	VII
Epaisseur de la lame mince.....	VIII
Microscope polarisant.....	IX
I. — NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES PHÉNOMÈNES OPTIQUES UTILISÉS DANS L'ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE.....	I
Corps isotropes et anisotropes.....	2
Biréfringence.....	3
Cristaux uniaxes et biaxes.....	5
Polarisation et double réfraction par les cristaux uniaxes et biaxes.	6
Appareils de polarisation du microscope.....	7
II. — OBSERVATION DES LAMES MINCES ENTRE NICOLS CROISÉS ET EN LUMIÈRE PARALLÈLE.....	9
Teintes de polarisation chromatique.....	9
Echelle chromatique de Newton.....	12
Mesure de la biréfringence d'une section cristalline.....	15
Mesure de la biréfringence absolue du minéral.....	18
Détermination de la situation respective de $n'g$ et $n'p$ dans une section.....	19
Angles d'extinction des sections cristallines.....	21
Signe d'allongement d'une section de minéral.....	24
III. — DÉTERMINATION EN LUMIÈRE CONVERGENTE ENTRE NICOLS CROISÉS..	26
1 ^o Minéraux uniaxes.....	27
Détermination du signe optique.....	30
2 ^o Minéraux biaxes.....	33
Détermination du signe du minéral.....	36
Angle des axes optiques.....	37
Minéraux allongés suivant Nm.....	37
IV. — EXAMEN DES LAMES MINCES EN LUMIÈRE NATURELLE ET AVEC UN SEUL NICOL.....	39
Détermination de la réfringence d'un minéral.....	39
Coloration des minéraux en lames minces. Pléochroïsme.....	46
Autres observations en lumière naturelle ou avec un nicol.....	48
RÉSUMÉ.....	49
Tableau résumant les caractères optiques des divers systèmes cris- tallins.....	50

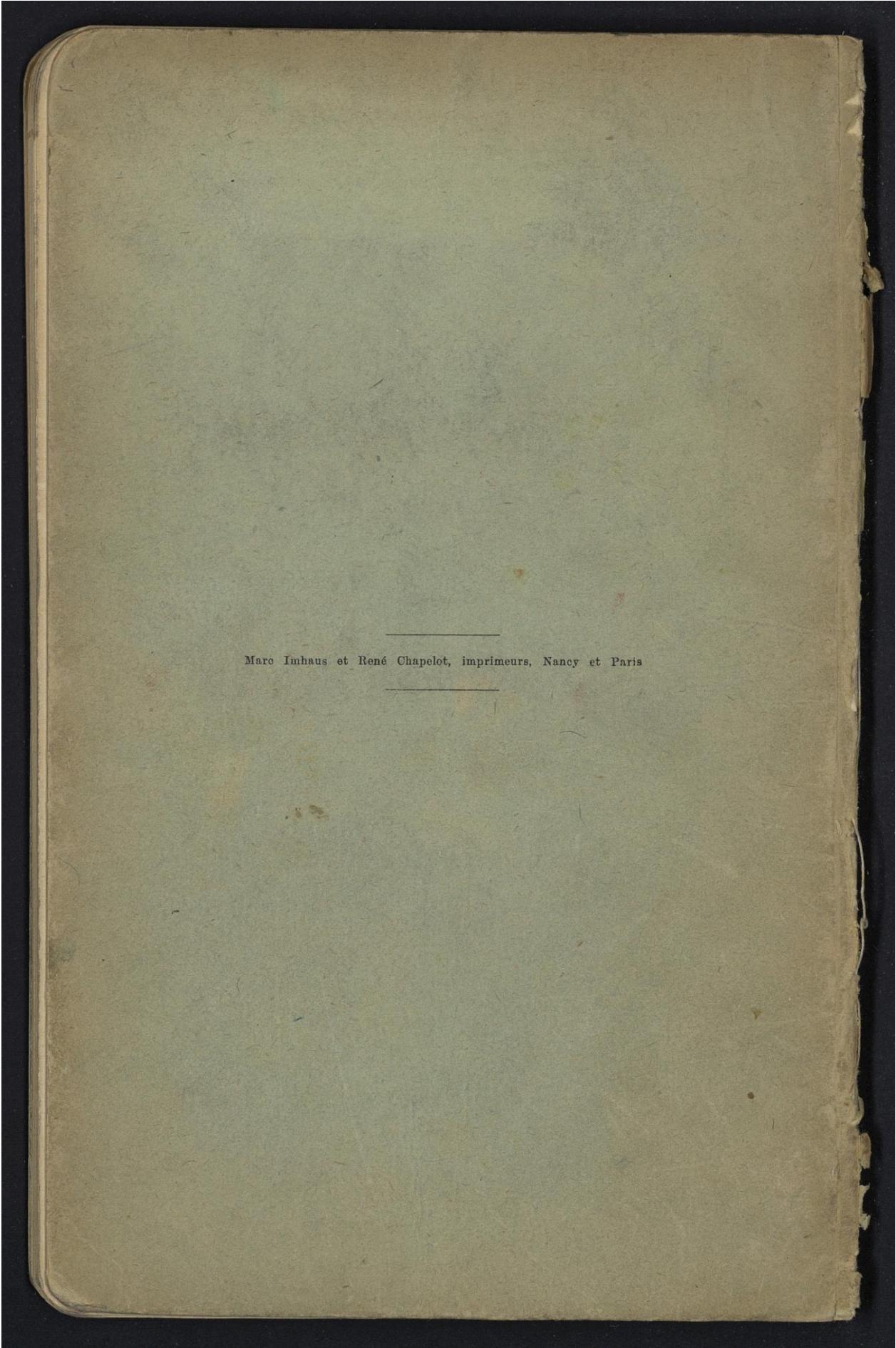




Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



Marc Imhaus et René Chapelot, imprimeurs, Nancy et Paris



Marc Imhaus et René Chapelet, imprimeurs, Nancy et Paris