



HAL
open science

Méthode d'étude des cristaux transparents par immersion

Jean Girault

► **To cite this version:**

| Jean Girault. Méthode d'étude des cristaux transparents par immersion. 1976. insu-00723817

HAL Id: insu-00723817

<https://insu.hal.science/insu-00723817>

Submitted on 14 Aug 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRES n° 10

Jean GIRAULT

Ingénieur géologue
Docteur ès sciences



**MÉTHODES D'ÉTUDE
DES CRISTAUX TRANSPARENTS
PAR IMMERSION**



15 JUIN 1976



LABORATOIRE ASSOCIÉ AU C N R S N°156
Pétrologie des formations cristallophylliennes
TRAVAUX DU LABORATOIRE DE GÉOLOGIE
MÉMOIRE N°10



INSTITUT DOLOMIEU
GRENOBLE
1976

Jean GIRAULT

Ingénieur géologue
Docteur ès sciences



**MÉTHODES D'ÉTUDE
DES CRISTAUX TRANSPARENTS
PAR IMMERSION**



LABORATOIRE ASSOCIÉ AU C N R S N° 156
Pétrologie des formations cristallophylliennes
TRAVAUX DU LABORATOIRE DE GÉOLOGIE
MÉMOIRE N° 10



INSTITUT DOLOMIÉU
GRENOBLE
1976

1976

© JEAN GRAULT 1976

1976

TABLE DES MATIERES

AVANT -PROPOS	1
SYMBOLES ET ABREVIATIONS	3
CHAPITRE I. - ORIENTATION DES PARTICULES	5
A - INTRODUCTION	5
1 - Cas général	6
2 - Cas particuliers importants	6
a - Tous cristaux optiquement anisotropes : sections parallèles à l'axe c (uniaxes) ou au plan des axes optiques (biaxes)	6
b - Cristaux uniaxes : sections normales à l'axe optique	6
c - Cristaux biaxes	6
Sections normales à un axe optique	6
Sections normales à une bissectrice	7
B - PARTICULES POSSEDANT AU MOINS UN BON CLIVAGE	8
1 - Orientation cristallographique et orientation optique	8
Cristaux uniaxes	8
Cristaux orthorhombiques	8
Cristaux monocliniques	8
Cristaux tricliniques	9
2 - Orientation d'un fragment de clivage	9
3 - Angle d'extinction dans un plan cristallographique donné	13
4 - Indices de réfraction d'une section d'orientation connue	14
Calcul	14
Indice non principal d'un uniaxe	14
Indices non principaux d'un biaxe	15
Solutions graphiques	17
5 - Indices principaux à partir d'indices non principaux	21
6 - Biréfringence d'une section d'orientation connue	22
7 - Angle des axes optiques	22
C - PARTICULES ORIENTEES DE FACON QUELCONQUE OU DEFAVORABLE	23
1 - Méthode générale	23
2 - Méthodes spéciales	24
a - Poudre de verre	24
b - Tube capillaire	24
c - Silicate de soude	24
d - Platine universelle	25
e - Lames de gélatine	25
f - Lamelles taillées	26
g - Platine à aiguille	26
CHAPITRE II. - METHODES DE COMPARAISON DES INDICES, SENSIBILITE, CORRECTIONS	27
A - CONDITIONS D'OPERATION	28
1 - Critères de comparaison des indices	28
a - Eclairage axial	28
b - Eclairage oblique	29
c - Double diaphragme	30
d - Méthodes utilisant la dispersion	30
2 - Erreurs d'orientation des particules	30

B - DISPERSION	33
1 - Généralités. Graphique de Hartmann	33
2 - Dispersion des liquides	34
3 - Dispersion des minéraux	34
C - TEMPERATURE	35
D - AUTRES FACTEURS DEPENDANT DES LIQUIDES D'IMMERSION	36
1 - Stabilité	36
2 - Calibration	36
E - AUTRES FACTEURS DEPENDANT DU CORPS ETUDIE	36
1 - Forme	36
2 - Hétérogénéité	37
3 - Biréfringence	38
4 - Absorption	38
CHAPITRE III. - DETERMINATION DES INDICES DES LIQUIDES	39
A - DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DU LIQUIDE	39
B - MESURE DE L'INDICE DU LIQUIDE AU MOMENT DE L'OBSERVATION	40
CHAPITRE IV. - DETERMINATION DES INDICES DES CRISTAUX	43
A - ENCADREMENT	43
B - EGALISATION	44
1 - Variation de la température	45
2 - Variation de la longueur d'onde	45
3 - Double variation	47
4 - Méthode de l'étalon interne	48
5 - Méthodes utilisant la dispersion en lumière blanche	50
a - Introduction	50
b - Méthode d'Emmons et Gates	51
c - Méthode de Dodge	52
d - Masquage focal ou coloration par dispersion	53
6 - Platine à aiguille	56
CHAPITRE V. - MILIEUX D'IMMERSION	61
Séries de liquides	61
Milieux d'indices élevés	69
Liquides de dispersion élevée	70
Préparation de liquides d'indices donnés	71
Liquides du commerce	71
CHAPITRE VI. - PREPARATION DES FROTTIS	73
CHAPITRE VII. - IDENTIFICATION DES PLAGIOCLASES PAR LA METHODE DE TSUBOI	76
A - SANS VARIATION DE LA LONGUEUR D'ONDE	77
B - AVEC VARIATION DE LA LONGUEUR D'ONDE	78
ANNEXE. - TRACE DES ARCS DE GRANDS CERCLES	81
Appareil de Penfield	82
BIBLIOGRAPHIE	83

ERRATA ET ADDENDA

Page	Ligne(s)	
14	6	Au lieu de : "N-S", Lire : "Nord-Sud".
48	14 à 16	Au lieu de : "Si la pente n'est pas connue, on peut la déterminer en introduisant deux verres différents dans la préparation", Lire : "Si la pente n'était pas connue, on pourrait la déterminer en introduisant deux verres différents dans la préparation comme il est indiqué plus bas".
49	17	Au lieu de : " λ m", Lire : " λ_m ".
56	23 et 24	Ajouter une virgule après "années" et une autre après "(2)".
60	8	Après "résultats.", intercaler : "Les résines du type de l'Araldite, notamment celles à durcissement rapide, sont entièrement satisfaisantes."
69	8 (du bas)	Au lieu de : "les indices donnés étaient alors trop faibles", Lire : "les indices donnés en 1934 étaient trop faibles".
86	1 et 2	Entre "WALLACE" et "WILCOX", intercaler : WEST, C.D. (1936). - Immersion liquids of high refractive index. Amer. Mineralogist, 21, 245.

AVANT-PROPOS

Les propriétés physiques des cristaux découlent de leur structure et de leur composition chimique, d'où leur valeur comme critères d'identification. Pour les corps transparents, les propriétés optiques sont parmi les plus caractéristiques.

En premier figurent les indices de réfraction. La reconnaissance des cristaux isotropes par des méthodes optiques repose essentiellement sur des mesures d'indices. De même, dans plusieurs cas simples, mais importants en pétrologie (plagioclases, pyroxènes orthorhombiques, périclites), la seule mesure d'un indice donne une bonne idée de la composition chimique. Lorsque les variations de composition sont plus complexes, la corrélation entre la composition et les indices est moins satisfaisante.

D'autres caractères importants des cristaux optiquement anisotropes sont l'uniaxialité ou la biaxialité et le signe optique. Parfois, l'existence de cas-limites ou d'"anomalies" (angle des axes optiques sensiblement égal à 90° , isotropie, uniaxialité ou biaxialité "anormales" - c'est à dire en apparence incompatibles avec la symétrie), introduit des ambiguïtés. La dispersion pourrait être très utile, mais les données quantitatives précises manquent trop souvent.

On peut calculer l'angle des axes optiques et la biréfringence maximale à partir des indices principaux. Cependant, surtout pour les angles des axes, qui dépendent de quotients de différences d'indices, il est préférable de les mesurer directement et de contrôler avec les valeurs calculées. On utilise aussi souvent les angles d'extinction, le signe de l'allongement et le pléochroïsme.

Parmi les autres propriétés physiques, la densité et le clivage, lorsqu'il est assez net, sont très utiles. Des propriétés moins généralement répandues, comme la piézoélectricité, la pyroélectricité, les diverses formes de luminescence et le pouvoir rotatoire, servent dans certains cas.

Les propriétés physiques des minéraux, et notamment leurs propriétés optiques, sont donc un excellent outil d'étude. Lorsqu'on examine un minéral dont on possède une analyse chimique complète, on s'efforcera de déterminer avec précision tous ses caractères optiques : c'est l'accumulation de données numériques précises qui aidera à mieux relier les propriétés physiques des minéraux à leur composition chimique.

L'accent est mis ici sur les minéraux, mais des techniques identiques ou analogues s'appliquent aux autres corps cristallisés transparents, notamment aux produits artificiels, inorganiques ou organiques. Les chimistes, en particulier, auraient souvent avantage à y recourir. Même si l'identification par un seul caractère est l'exception, on peut souvent reconnaître un corps cristallisé antérieurement décrit en déterminant quelques unes de ses constantes optiques et en se reportant aux diverses tables qui ont été publiées. Pour les seuls minéraux, on peut mentionner celles de Denaeyer (1951), Christophe-Michel-Lévy (1959), Tröger (1959), Roubault et al. (1963), Parfenoff et al. (1970), Larsen

et Berman (1934) et de Winchell (1939). A la date de leur publication, ces deux dernières avaient pour but de traiter de toutes les espèces minérales reconnues valables et dont on connaissait au moins certaines constantes optiques. Elles mériteraient d'être revues et mises à jour.

Les observations sont faites au microscope, sur des particules de granulométrie convenable (par exemple, de quelques micromètres à une centaine de micromètres), plongées dans un ou, successivement, dans plusieurs liquides d'indices de réfraction connus. Il ne sera pas question ici, sauf incidemment, des méthodes utilisant la platine universelle de Fédoroff, qui ont déjà fait l'objet de nombreuses publications. Dans ces conditions, la plus ou moins grande facilité avec laquelle peuvent être effectuées les déterminations de constantes optiques d'une particule anisotrope dépend tout d'abord de l'orientation qu'occupe, par rapport à l'axe optique du microscope, l'ellipsoïde qui représente les caractères optiques du corps.

Si cette orientation est quelconque, il faut examiner un assez grand nombre de particules pour obtenir des valeurs suffisamment approchées des constantes cherchées, se guider sur les caractères optiques pour sélectionner les grains favorablement orientés, ou encore recourir à des artifices pour imprimer à une particule une orientation appropriée.

Par ailleurs, de nombreux minéraux possèdent au moins un bon clivage. Si on les pulvérise, la poudre obtenue renferme toujours des fragments de clivage. Ce fait permet de rapporter les caractères optiques d'une particule à un plan cristallographique connu. Il simplifie souvent l'identification.

Dans tous les cas, les méthodes par immersion peuvent être d'une grande utilité, tout en présentant l'avantage de ne nécessiter qu'une minime quantité de matière, souvent d'ailleurs récupérable. Comme elles sont loin d'être connues et utilisées autant qu'elles le méritent, il a paru utile de réunir dans ces pages, à l'intention des étudiants, un certain nombre de techniques et de données susceptibles de faciliter l'identification des solides cristallins transparents à l'aide du microscope. Il s'agit donc ici d'un recueil sélectif destiné au laboratoire, non d'un traité systématique. En particulier, les techniques usuelles d'emploi du microscope polarisant, les opérations de pratique courante et les principes sur lesquels elles reposent sont supposés connus. De plus, cet opuscule a moins pour but d'exposer de façon détaillée des méthodes de travail que de signaler ou de rappeler leur existence et de montrer ce qu'on peut en attendre. Il y aura donc lieu, éventuellement, de se reporter aux traités et aux mémoires cités en bibliographie. La publication d'un texte plus étendu et plus détaillé pourra éventuellement se révéler opportune. Critiques et suggestions seront les bienvenues.

Quelques-unes des valeurs numériques utilisées dans les exemples ont pu être arrondies sans inconvénients.

La Mineralogical Society of America autorise la reproduction des figures et celle d'extraits des articles publiés dans "The American Mineralogist". C'est de cette revue que proviennent les figures 27, 28 et 32, les planches 2, 3 et 5 et les tableaux 4 à 10. Le canevas stéréographique d'Emmons (planche 1) a été publié initialement par la Geological Society of America. Le graphique de Hartmann (planche 4) et le tableau 2 ont été aimablement communiqués par S. A. Morse et par R. E. Wilcox respectivement. Enfin, C. E. Ehrström a bien voulu revoir les relations 18 à 21.

Indices de réfraction

Minéraux optiquement isotropes

L'indice est représenté par la lettre n. Ce symbole est également utilisé parfois pour désigner un indice non autrement précisé.

Minéraux optiquement anisotropes

- Indices principaux. - La notation française classique (n_p , n_m , n_g) est de moins en moins utilisée internationalement. Cependant, l'unanimité n'étant pas encore réalisée (1), nous continuerons à l'employer pour les minéraux biaxes, les directions de vibration correspondantes étant désignées par les lettres X (n_p ou α), Y (n_m ou β) et Z (n_g ou γ). Par contre, pour les uniaxes, il semble préférable d'utiliser les symboles n_o et n_e , qui présentent l'avantage d'indiquer en même temps le signe optique ($n_o < n_e$: positif, $n_o > n_e$, négatif).

- Autres indices de réfraction :

n_e' : indice extraordinaire non principal d'un uniaxe.

n_1 et n_2 ou n_p' et n_g' (α' et γ' des auteurs de langue anglaise) : indices non principaux d'un biaxe.

Autres symboles

- O.N. Ouverture numérique d'un objectif.
- a, b, c Axes cristallographiques.
- α, β, γ Angles entre les axes cristallographiques b et c, a et c, a et b respectivement.
- (-) 2V, (+) 2V Angle vrai des axes et signe optique.
- 2E, 2H Angle apparent des axes (dans l'air, dans l'huile).
- Vx, Vz Demi-angle vrai des axes, mesuré par rapport à X, à Z. Ces angles peuvent être supérieurs à 45°.
- X ^ c, etc. Angle entre la direction X et la direction c, etc.
- Y = b, etc. La direction Y est parallèle à l'axe cristallographique b, etc.
- ϕ hkl et ρ hkl Azimut et colatitude du plan cristallographique hkl. ϕ et ρ désignent également les coordonnées des directions principales de l'ellipsoïde dans les cristaux tricliniques (voir p.12 et fig. 4).

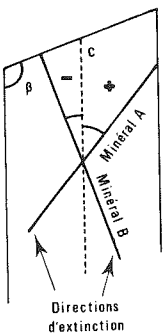


Fig. 1. - Convention de signe de Winchell

Angles d'extinction

Winchell (1951) a proposé de fixer le signe des angles d'extinction des cristaux monocliniques conformément au schéma ci-contre, c'est à dire en faisant précéder du signe (-) les angles mesurés dans β obtus. Beaucoup d'autres auteurs, notamment Palache et al. (1945, 1951) emploient la convention contraire. La convention choisie n'est pas toujours systématiquement observée par un même auteur, ni même parfois spécifiée dans les publications. Il serait préférable de préciser si l'angle d'extinction a été mesuré dans β aigu ou dans β obtus et de joindre un croquis d'orientation.

Les symboles soulignés dans le texte figurent en caractères italiques sur les figures correspondantes.

(1) - Par exemple :	Mineralogical Abstracts (a)		Winchell (1951)		Palache et al. (1945, 1951)		
	Uniaxes	Biaxes	Uniaxes	Biaxes	Uniaxes	Biaxes	
			(b)	(c)		(b)	(c)
n_g	ω (-) ϵ (+)	γ	N_o (-) N_e (+)	NZ Z	O (-) E (+)	nZ Z	
n_m		β		N_Y Y		n_Y Y	
n_p	ω (+) ϵ (-)	α	N_o (+) N_e (-)	N_X X	O (+) E (-)	n_X X	

(a) - Indice et direction de vibration; (b) - Indice; (c) - Direction de vibration.

CHAPITRE I

ORIENTATION DES PARTICULES

A - INTRODUCTION

Les traités donnent les constantes optiques d'un minéral anisotrope, déterminées suivant les directions principales de son ellipsoïde, ainsi que l'orientation de ce dernier par rapport aux axes cristallographiques. La présence d'un bon clivage peut rendre difficile la détermination directe de certaines de ces constantes sur frottis, car les particules tendent alors à se disposer de telle sorte que les surfaces planes de clivage reposent sur la surface de la lame.

Réciproquement, on peut tirer parti de ce fait dans de nombreux cas particuliers. En effet, l'orientation et la symétrie de l'ellipsoïde étant liées à la symétrie du cristal, les orientations privilégiées sont assez fréquentes. De plus, tout fragment d'un minéral obtenu par clivage parallèlement à un plan connu est une section orientée. Si la surface plane de clivage repose sur celle de la lame, le plan de clivage est normal à l'axe optique du microscope. L'orientation du fragment étant ainsi définie, on peut considérer ses constantes optiques comme tout aussi caractéristiques que celles déterminées suivant les directions principales de l'ellipsoïde. En principe, le fait que leurs valeurs numériques diffèrent de celles des paramètres qui définissent l'ellipsoïde ne présente pas d'inconvénients, lorsque le seul but cherché est l'identification d'un minéral (1).

C'est pourquoi il est regrettable que, à part quelques tentatives (par exemple, Buttgenbach, 1935; Taylor, 1948; Tröger, 1959), les caractères propres aux fragments de clivage, notamment leurs indices de réfraction et leurs angles d'extinction, ne soient pas publiés de façon systématique et complète.

En fait, tout dépend à la fois de l'orientation du clivage par rapport à l'ellipsoïde et de la nature des caractères optiques cherchés. Dans certains cas, il est impossible de déterminer directement une constante donnée sans recourir à des artifices (cas de l'indice n_p des micas, par exemple). Dans d'autres, l'orientation favorable d'un ou de plusieurs clivages permet de déterminer aisément certaines constantes (par exemple, $2V$ de la topaze, n_g et n_p du gypse). Il est important de pouvoir reconnaître ces orientations favorables, notamment lorsque l'identification repose sur des mesures d'indices de réfraction. On y parvient au moyen d'observations effectuées, soit en lumière parallèle, soit en lumière convergente, qui présentent l'intérêt de fournir elles-mêmes des données supplémentaires importantes sur le corps étudié : uniaxie ou biaxie, signe optique, angle des axes, etc. Le principe et la manière d'effectuer ces observations étant supposés connus, plusieurs cas peuvent se présenter :

(1) - Voir à ce sujet les remarques de Bouasse (1925, p. XIX).

1 - Cas général (tous corps cristallisés optiquement anisotropes)

Sur tout fragment ne demeurant pas constamment éteint entre nicols croisés, on peut déterminer deux indices (n_o et n_e' pour les uniaxes, n_1 et n_2 pour les biaxes), tels que :

$$\begin{aligned} n_o < n_e' \leq n_e & \quad (\text{uniaxes } +) \\ n_e \leq n_e' < n_o & \quad (\text{uniaxes } -) \\ n_p \leq n_1 < n_2 \leq n_g & \quad (\text{biaxes}) \end{aligned}$$

A noter que l'une des positions d'extinction de tout fragment uniaxe donne n_o .

2 - Cas particuliers importants

a - Tous cristaux optiquement anisotropes :

sections parallèles à l'axe c (uniaxes) ou au plan des axes optiques (biaxes)

Les fragments ayant cette orientation présentent la biréfringence maximale caractéristique du corps étudié. Par suite, dans une préparation constituée de particules de même épaisseur d'un même minéral, ces fragments sont ceux qui montrent les teintes d'interférences les plus élevées. Deux positions d'extinction consécutives correspondent respectivement au plus grand et au plus petit indices.

En lumière convergente, ces sections montrent des courbes d'égal retard à allure hyperbolique, qui tournent sans déformation par rotation de la platine. Quatre fois par tour, le champ est traversé (avec formation d'une pseudo croix noire) par des lignes noires très diffuses, dont l'aspect évoque celui des branches d'hyperboles des figures de bissectrices centrées, mais qui quittent le champ avec une grande rapidité dans la direction de la bissectrice aiguë, par une rotation de quelques degrés de la platine, d'où le nom de figures-éclair ("flash-figures") que leur donnent les auteurs de langue anglaise.

Bien que la figure-éclair ne permette pas de distinguer un uniaxe d'un biaxe, ces sections pourraient être utilisées plus souvent qu'elles ne le sont, car elles donnent deux indices principaux et peuvent permettre dans des cas favorables la détermination du signe optique. En effet, en position d'éclairement maximal et à partir du centre du champ, les teintes d'interférences baissent dans les deux quadrants opposés par lesquels passe la bissectrice aiguë (ou l'axe optique s'il s'agit d'un uniaxe). Connaissant la direction de l'axe optique (uniaxes) ou celle de la bissectrice aiguë (biaxes), le simple emploi d'une lame auxiliaire en lumière parallèle permet de déterminer le signe optique. Lorsque $2V$ tend vers 90° , la différence de teintes entre quadrants adjacents s'estompe et la méthode devient inapplicable.

b - Cristaux uniaxes : sections normales à l'axe optique

Si l'axe optique est normal au plan de clivage (001 ou 0001), la particule demeure éteinte entre nicols croisés. Quelle que soit la position de la platine, l'indice correspondant est n_o .

En lumière convergente, cette orientation se reconnaît à l'apparition d'une figure caractéristique, croix noire centrée et, si le retard est assez grand, courbes d'égal retard en forme de cercles concentriques. Ces figures permettent de déterminer le signe optique. Il peut y avoir ambiguïté quant au signe lorsque la croix noire occupe la plus grande partie du champ (retard très faible même sur le bord).

c - Cristaux biaxes

Sections normales à un axe optique

En lumière parallèle, ces sections demeurent éteintes ou, plus précisément, quasi-obscurées entre nicols croisés. Hartshorne et Stuart (1970) attirent en effet l'attention sur le fait qu'une section ayant cette orientation n'est pas rigoureusement éteinte entre nicols croisés : elle demeure très légèrement éclairée, l'intensité de l'éclairement ne variant pas ou variant peu par rotation de la platine. Le phénomène aide à reconnaître ces sections. Il est vraisemblablement dû, au moins en partie, à la dispersion des axes optiques. Quelle que soit la position de la platine, l'indice correspondant est alors n_m .

En lumière convergente, ces sections présentent une branche d'hyperbole tournant autour du centre du champ en sens inverse du mouvement imprimé à la platine, et devenant rectiligne quatre fois par tour. Si le retard est suffisant, on observe aussi des courbes d'égal retard.

Ces sections permettent d'estimer l'ordre de grandeur de l'angle des axes optiques, d'après la plus ou moins grande convexité de la branche d'hyperbole (Wright, 1907), et aussi de déterminer le signe optique. Il y a ambiguïté quant à ce dernier si $2V$ est grand, car la branche d'hyperbole est alors quasi-rectiligne. Il n'est donc pas possible de déterminer sa direction de convexité ni, par suite, celle de la bissectrice aiguë.

Sections normales à une bissectrice

La biréfringence de ces sections est d'autant plus faible que l'angle des axes (sections normales à la bissectrice aiguë) ou son supplément (sections normales à la bissectrice obtuse) sont plus petits.

En lumière convergente, elles montrent les branches d'hyperbole et, si le retard est suffisant, les lemniscates. Suivant la nature de la figure et celle du signe optique, elles permettent de déterminer les indices suivants :

Signe optique	Figure de bissectrice	
	Aiguë	Obtuse
+	n_m, n_p	n_g, n_m
-	n_g, n_m	n_m, n_p

On distingue les directions correspondant à ces indices avec une lame auxiliaire, ou par comparaison avec l'indice du liquide d'immersion.

Lorsque les deux branches d'hyperbole ne quittent pas les limites du champ par rotation de la platine, il n'y a aucune difficulté et on peut également déterminer $2E$ par la méthode de Mallard, ainsi que le signe optique. Par contre, il y a ambiguïté :

- lorsque $2V$ tend vers 90° : dans ce cas, il n'est pas possible de distinguer une figure de bissectrice aiguë d'une figure de bissectrice obtuse.
- lorsque $2V$ tend vers 0° , la figure de bissectrice obtuse ne se distingue pas de celle de la figure-éclair.

De plus, les sections en zone avec celles donnant ces deux figures ont, elles aussi, même aspect.

A titre indicatif, avec un objectif à sec (O.N. = 0,85), on peut admettre que les rotations ci-après de la platine sont nécessaires, à partir de la position de pseudo croix noire, pour que les hyperboles quittent les limites du champ :

$\geq 30^\circ$	figure de bissectrice aiguë
10-30°	figure de bissectrice obtuse
5-10°	figure-éclair,

mais l'observation est souvent entachée d'incertitude et, de toute façon, les indéterminations ci-dessus subsistent.

Les sections normales à la bissectrice aiguë d'un biaxe permettent aussi de déterminer indirectement la biréfringence maximale et le troisième indice principal. En effet, les relations approchées :

$$\sin^2 V = \frac{n_m - n_p}{n_g - n_p} (+) \quad \text{et} \quad \sin^2 V = \frac{n_g - n_m}{n_g - n_p} (-) \quad (1)$$

donnent :

$$n_g - n_p = \frac{n_m - n_p}{\sin^2 V} (+) \quad \text{et} \quad n_g - n_p = \frac{n_g - n_m}{\sin^2 V} (-) \quad (2)$$

Soit, par exemple, une section normale à la bissectrice aiguë d'un minéral optiquement négatif. On détermine les directions Y et Z comme on l'a vu plus haut et on mesure par immersion les indices n_m et n_g correspondants. La méthode de Mallard donne $\sin E$, d'où $\sin V$, connaissant n_m . On trouve sans calcul $\sin^2 V$ soit, connaissant V , dans les tables de Wright (1913), soit, connaissant $\sin V$, dans celles de Barlow (1940). Une des relations (2) ci-dessus donne $(n_g - n_p)$, d'où n_p , connaissant n_g .

On voit qu'une erreur relativement faible sur les indices mesurés ou sur V , s'il est petit, peut entraîner une erreur relativement considérable sur l'indice calculé. La méthode peut néanmoins suffire en pra-

tique dans de nombreux cas, au moins lorsqu'on n'a pas besoin de la plus grande exactitude (1). Elle est utile pour les minéraux qui possèdent un clivage parfait normal à la bissectrice aiguë et évite le recours aux artifices qui seront décrits plus loin.

Au lieu de mesurer séparément les deux indices situés dans le plan de clivage, il peut être préférable, notamment lorsque la biréfringence partielle est faible, d'en mesurer exactement un seul et de déterminer indirectement le second à l'aide de l'épaisseur et du retard mesurés du fragment de clivage.

B - PARTICULES POSSEDANT AU MOINS UN BON CLIVAGE

1 - Orientation cristallographique et orientation optique

Le plan de clivage d'une particule anisotrope étant supposé parallèle à la platine du microscope, il résulte de ce qui précède et des conditions imposées par la symétrie, les possibilités d'orientations privilégiées que voici.

Cristaux uniaxes

Les fragments de clivage 001 et 0001 permettent la détermination de n_o et celle du signe optique.

Les fragments de clivage 100, 010 et hk0 (quadratiques) et leurs équivalents hexagonaux permettent la détermination de n_o , de n_e et du signe optique.

Cristaux orthorhombiques

Chacun des trois axes qui définissent l'ellipsoïde doit coïncider avec l'un quelconque des axes cristallographiques. Par suite :

- tout clivage 100, 010 et 001 est :
 - soit normal à une bissectrice. Suivant la nature de celle-ci et suivant le signe optique du cristal, il permet, comme on l'a vu plus haut, de déterminer soit n_g et n_m , soit n_m et n_p , plus, éventuellement, le troisième indice.
 - soit parallèle au plan des axes optiques (figure-éclair), et permet de déterminer n_p et n_g (2). Dans les limites vues plus haut, il permet également la détermination du signe optique.
- tout clivage hk0, 0kl ou h0l permet de déterminer l'un des indices principaux (n_g , n_m ou n_p suivant l'orientation).

Cristaux monocliniques

Un des axes qui définissent l'ellipsoïde et un seul coïncide avec l'axe cristallographique b. Autrement dit, les deux autres axes sont toujours contenus dans le plan 010. Par suite :

- tout clivage 010 permet la détermination de deux indices principaux.
 - Si le plan des axes optiques est normal à 010, un clivage 010 constitue une section normale à une bissectrice, et les indices correspondants (n_g et n_m , ou n_p et n_m , plus, éventuellement, le troisième indice), seront déterminés comme on l'a vu plus haut.
 - Si le plan des axes optiques est parallèle à 010 (figure-éclair), la section permet de déterminer n_g et n_p et, éventuellement, le signe optique (2).

(1) - Par exemple, Dodd (in Hadni et al., 1969) donne pour le sulfate de glycolle :

$$n_p = 1,484$$

$$n_m = 1,556$$

$$n_g = 1,584$$

d'où (-) $2V = 64^\circ$ par la relation approchée, et $61^\circ 24'$ par la relation exacte. Une mesure directe, faite par la méthode de Mallard, sur une plaque taillée normalement à n_p (le microscope ayant été étalonné avec une plaque d'aragonite de qualité médiocre), donne $2V = 62^\circ 5'$, d'où $n_g - n_p = 0,104$ et $n_p = 1,480$ au lieu de 1,484. Le résultat est encore satisfaisant.

(2) - Si on dispose d'une platine à aiguille, ces clivages permettent la détermination directe des trois indices principaux et celle de $2V$.

- tout clivage 100, 001 ou h0l permet de déterminer l'indice principal correspondant à la direction de vibration parallèle à l'axe cristallographique b (n_g , n_m ou n_p suivant l'orientation). Il ne permet qu'occasionnellement de déterminer deux indices (cas des micas).
- à noter que les clivages hk0 (plus particulièrement, 110), si fréquents dans les cristaux monocliniques, ne permettent généralement la détermination d'aucun des indices principaux.

Cristaux tricliniques

Aucune relation, sinon fortuite, entre l'orientation des axes qui définissent l'ellipsoïde (eux-mêmes variables en grandeur et en orientation avec la longueur d'onde de la lumière utilisée) et celle des axes cristallographiques et des clivages.

Les figures de lumière convergente non exagérément excentrées demeurent utilisables, dans les limites vues précédemment, pour la détermination de l'uniaxiale ou de la biaxiale et pour celle du signe optique. Par contre, les indices correspondant à cette orientation ne sont plus des indices principaux, seul demeure alors déterminable l'indice n_o des uniaxes. Loupekine (1947) a montré l'emploi des indices non principaux pour l'identification des carbonates rhomboédriques. De plus, si l'excentrement des figures de lumière convergente et la biréfringence ne sont pas trop grands, les indices non principaux pourront être suffisamment voisins des indices principaux pour être utilisables. Les graphiques de Gillberg (p. 30 et fig. 20 et 21) aideront à évaluer l'erreur qui pourra résulter de leur emploi.

Rappelons enfin qu'à condition de disposer de liquides appropriés, il est toujours possible de déterminer l'indice n_o d'un uniaxe, et que plusieurs orientations faciles à reconnaître permettent la détermination de l'indice n_m des biaxes. Il semble donc indiqué d'utiliser ces deux indices pour classer les minéraux anisotropes par ordre de réfringence croissante.

2 - Orientation d'un fragment de clivage

Dans de nombreux cas, il suffit de s'aider des remarques qui précèdent, des schémas d'orientation qui accompagnent souvent les descriptions ou qu'on dessine facilement soi-même en cas de besoin d'après les données, enfin, des observations effectuées en lumière convergente. Exemples (données de Palache et al., 1951) :

1 - Anhydrite (Fig. 2). Orthorhombique. Clivages 010 parfait, 100 presque parfait, 001 de qualité variable. Plan des axes 100. $X = b$ (donc $Z = c$). $(+)$ $2V = 44^\circ$. On en déduit :

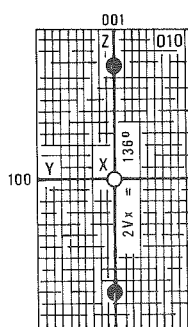


Fig. 2. - Orientation d'un fragment de clivage 010 d'anhydrite.

- un fragment de clivage 010 contient les directions Y et Z. Celles-ci ayant été préalablement déterminées à l'aide d'une lame auxiliaire, on peut déterminer les indices n_m et n_g correspondants. Le minéral étant optiquement positif et la direction X normale au clivage, celui-ci montrera une figure de bissectrice obtuse centrée en lumière convergente.
- un fragment 100 contient les directions X et Z. Celles-ci ayant été déterminées comme précédemment, on peut mesurer sur un tel fragment les indices n_p et n_g , d'où la biréfringence maximale.
- le plan 001 est parallèle aux directions X et Y. Le clivage 001, s'il est bon, permet donc la détermination des indices n_p et n_m . La direction Z, qui est celle de la bissectrice aiguë, lui est normale. Le fragment donne donc, en lumière convergente, une figure centrée de bissectrice aiguë et permet (connaissant n_m) la mesure de $2V$ par la méthode de Mallard.

Dans ce cas, évidemment favorable, chaque indice principal peut être déterminé deux fois.

2 - Barytine. - Orthorhombique. Clivages 001 parfait, 210 bon, 010 de qualité variable. Plan des axes 010. $Z = a$ (donc $X = c$). $(+)$ $2V = 37^\circ$. Ce cas est analogue au précédent.

- un fragment de clivage 001 contient les directions Y et Z et permet la détermination des indices n_m et n_g correspondants. La barytine étant optiquement positive et la direction X normale au clivage 001, celui-ci montre en lumière convergente une figure de bissectrice obtuse centrée.
- la direction de vibration X étant parallèle à c, une des positions d'extinction d'un fragment de clivage 210 permet la détermination de l'indice n_p correspondant. Le clivage étant incliné sur les directions Y et Z, sa deuxième position d'extinction correspond à un indice non principal n_1 , compris entre n_m et n_g (1). En lumière convergente, le fragment ne donne pas de figure centrée.
- le plan 010 est parallèle au plan des axes et correspond donc à la biréfringence maximale. Si le clivage est assez bon, il permet la détermination de n_p et de n_g .

Il n'y a pas de clivage permettant la détermination directe de $2V$ par la méthode de Mallard.

Dans les cas moins simples, il est commode de recourir à la projection stéréographique. Pour compléter les indications ci-après, on pourra se reporter à Buttgenbach (1935), De Jong (1959), Haff (1940), Johannsen (1918), Penfield (1901), Terpstra (1961) et Wright (1911).

En projection stéréographique, on s'aide généralement du canevas bien connu dit de Wulff. Celui de Fédoroff, plus complet, présente l'inconvénient d'être confus. Celui d'Emmons (1943), que reproduit la planche 1, constitue un compromis entre les deux. Les tracés sont faits sur une feuille de papier calque appliquée sur le canevas; il est commode de s'arranger pour que le papier ou le canevas puissent tourner l'un par rapport à l'autre autour du centre de ce dernier. Les constructions sont facilitées lorsque les orientations sont données en coordonnées angulaires : azimut (ϕ) et colatitude (ρ). L'origine des azimuts est placée à l'extrémité E du diamètre E-W (horizontal) du canevas, projection du pôle de la face 010; ils sont comptés positivement dans le sens des aiguilles d'une montre, négativement en sens inverse. Les colatitudes varient de 0° au centre du canevas (axe cristallographique c), à 90° sur la circonférence. Les constructions, généralement sans grandes difficultés, découlent de ce qui suit.

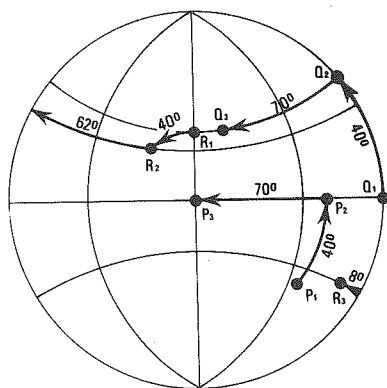
En projection sphérique, il est évident que les relations angulaires mutuelles des éléments (points et cercles) qui constituent la projection ne sont pas modifiées par rotation de la sphère. Il en est de même pour leur projection stéréographique, celle-ci conservant les angles.

On construira donc d'abord la projection stéréographique des pôles des axes cristallographiques, du ou des clivages, des éléments de l'ellipsoïde et, éventuellement, des faces de référence, tous dans leur orientation cristallographique conventionnelle. Il suffit ensuite, par des rotations appropriées, d'amener au centre du stéréogramme la projection du pôle du plan de clivage choisi, puis d'imprimer exactement les mêmes rotations à tous les points et

(1) - Lorsque, comme c'est ici le cas, le clivage est normal à une section principale de l'ellipsoïde, la connaissance d'un indice principal et d'un indice intermédiaire n_1 , tous deux situés dans cette section principale, et celle de l'angle que fait le clivage avec l'un des axes de cette dernière, permet de calculer son second indice principal. Ainsi, dans le cas présent, il serait possible de déterminer n_m à partir de n_1 et de n_g , ou n_g à partir de n_1 et de n_m . L'extrapolation peut être faite graphiquement, par exemple au moyen de l'abaque d'Emmons (1929 b, 1943).

lignes de la projection. On obtient ainsi une nouvelle projection qui représente les mêmes directions cristallographiques et optiques que la projection initiale, mais vues suivant une direction perpendiculaire au plan de clivage choisi. Pour cela (Fig. 3) :

1 - Faire tourner l'ensemble de la projection stéréographique initiale autour



du centre du canevas jusqu'à ce que le point P₁, représentant la projection du pôle du plan de clivage, arrive en P₂ sur le diamètre horizontal du cercle de projection. La même rotation amène Q₁ en Q₂ et R₁ en R₂. Si ϕ est l'azimut du plan de clivage, ceci revient à imprimer une rotation de $-\phi^\circ$ à tous les points de la projection initiale. En projection sphérique, ceci correspond à une rotation de $-\phi^\circ$ autour de l'axe vertical de la sphère.

2 - Le long de ce diamètre horizontal, amener P₂ en P₃ (centre de la projection), puis imprimer ce même déplacement angulaire à tous

les autres points de la projection, en suivant les parallèles du canevas sur lesquels les a amenés la rotation $-\phi$. Q₂ et R₂ viennent en Q₃ et R₃. Si ρ est la colatitude du plan de clivage, ceci revient à appliquer une nouvelle rotation de $-\rho^\circ$ à tous les points de la projection. En projection sphérique, ceci correspond à une rotation de $-\rho^\circ$ autour du diamètre de la sphère de projection normal au plan du méridien-origine de celle-ci, le diamètre horizontal E-W étant la projection de ce méridien-origine.

La projection est terminée. En vue de l'examen du fragment de clivage en lumière convergente, on indiquera les limites du champ en traçant, autour du centre du canevas, un ou plusieurs cercles de rayon angulaire égal à :

$$\text{arc sin } \frac{O.N.}{n_m}$$

O.N. représentant l'ouverture numérique de chaque objectif utilisé.

Remarques

L'ouverture numérique O.N. d'un objectif est donnée par :

$$O.N. = n \sin u$$

n étant l'indice de réfraction du milieu situé entre la préparation et la lentille frontale de l'objectif, et u la demi-ouverture angulaire de ce dernier.

D'après les lois de la réfraction, la déviation des rayons lumineux correspondant à des différences dans les indices n_1, n_2 , des milieux traversés, est de la forme :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \dots$$

Par suite, si l'on examine en lumière convergente une figure de bissectrice aiguë centrée, il faut, pour que les deux points d'émergence des axes optiques apparaissent dans le champ :

$$\sin E = n_m \sin V \leq n \sin u, \quad \text{ou} : \sin V \leq \frac{n \sin u}{n_m}$$

c'est à dire, dans tous les cas : $\sin V \leq \frac{O.N.}{n_m}$

Voici, pour deux ouvertures numériques couramment utilisées en lumière convergente, les valeurs maximales de V correspondant à quelques valeurs de n_m :

n_m	V maximum	
	0,85	1,3
1,4	37°5	68°5
1,5	34°5	60°
1,6	32°	54°
1,7	30°	49°5
1,8	28°	46°
2,0	25°	40°5

Ceci montre l'avantage que présente, pour ces opérations, l'emploi d'objectifs d'ouverture numérique élevée. Ainsi, lorsque $2V$ est grand, l'objectif ayant une ouverture numérique de 1,3 permet, dans une certaine mesure, de distinguer une figure de bissectrice obtuse d'une figure de bissectrice aiguë, toutes deux étant supposées non exagérément excentrées. Par contre, si $2V$ est petit, l'emploi d'une ouverture numérique plus faible a l'avantage d'augmenter l'écartement des branches d'hyperbole.

Dans l'examen des figures de lumière convergente non centrées, notamment si on les observe sur des particules relativement épaisses, l'emploi de lumière monochromatique facilite souvent l'interprétation.

Enfin, les traités donnent l'angle vrai ($2V$) des axes optiques, mais la méthode de Mallard donne l'angle apparent ($2E$). Pour en tirer $2V$, n_m doit être connu. Au moins lorsque l'angle des axes optiques est utilisé uniquement comme critère d'identification, il semble que l'emploi direct de $2E$, qui ne nécessite pas la connaissance de n_m , serait tout aussi efficace, plus simple et même plus exact.

Exemple

Soit à déterminer (fig. 4) l'orientation du clivage 100 de l'amarantite. Données de Penfield, Ungemach et Bandy (in Palache et al., 1951).

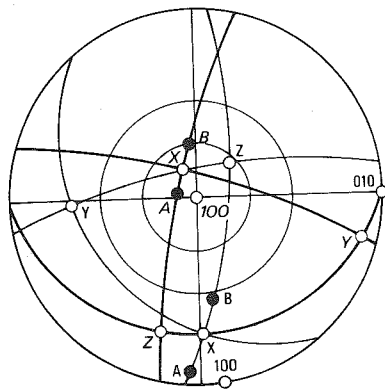


Fig. 4. - Orientation du clivage 100 de l'amarantite.

Amarantite, $\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Triclinique. $n_m = 1,598$. (-) $2V = 30^\circ$

Orientation	Φ	ρ
010	0°	90°
100	83°	90°
X	82°	72°
Y	178°	68°
Z	-44°	29°

Porter sur le calque, dans l'orientation habituelle, la projection du pôle de 010. A $\Phi = +83^\circ$ et $\rho = 90^\circ$, porter celle de 100. Amener 010 par rotation du calque jusqu'à $\Phi = -82^\circ$ et porter la projection de X sur le diamètre E-W à 72° du centre. Faire de même pour Y et Z.

Par rotation du calque, amener X et Z sur un même arc de grand cercle du canevas et tracer cet arc sur le calque. Sur cet arc, et à 15° de part et d'autre de X, porter les projections A et B des pôles des axes optiques.

Par rotation du calque d'environ -83° autour du centre, amener 100 sur l'équateur du canevas. Un déplacement de -90° le long de l'équateur l'amène au centre. Imprimer le même déplacement de -90° à tous les autres points de la projection, le long des parallèles du canevas sur lesquels les a amenés la rotation de -83° . Ainsi, 100, X, Y, Z, A et B sont venus en 100, X, Y, Z, A et B.

Compléter en traçant deux cercles ayant pour centre le centre du canevas et pour rayons angulaires 32° (arc sin $0,85/1,598$) et 54° (arc sin $1,3/1,598$). Comme le montre la nouvelle projection :

- l'objectif d'ouverture numérique 0,85 donne une figure de bissectrice aiguë négative excentrée. Un des axes émerge à l'extrême limite du champ; il peut ou non y apparaître suivant les variations d'un échantillon à un autre.
- l'objectif d'ouverture numérique 1,3 donne une figure de bissectrice aiguë excentrée. Les deux axes émergent dans le champ, X est à environ 20° du centre.

3 - Angle d'extinction dans un plan cristallographique donné

Il est souvent utile de pouvoir comparer un angle d'extinction, mesuré dans un plan optiquement non principal (face naturelle ou clivage connus), à l'angle que l'on obtient par le calcul, pour la même orientation, à partir des données contenues dans les tables. Autrement dit, il s'agit de trouver, pour la section considérée, l'angle que font ses directions de vibration avec la direction cristallographique de référence. D'après Biot et Fresnel, ces directions de vibration sont les traces des plans bissecteurs de l'angle que font entre eux les deux plans déterminés chacun par un axe optique et par la normale à la section. En d'autres termes, les directions de vibration sont les bissectrices de la projection des axes optiques sur le plan de la section.

La solution peut être trouvée graphiquement ou par le calcul. Voici les formules dans le seul cas de sections $hk0$ de cristaux monocliniques. Ce cas est important, car de nombreux minéraux appartenant à ce système possèdent un bon clivage $hk0$.

Si $Y = b$ (relations 3. Tomita, 1934) :

$$c \wedge Z'_{hk0} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad \text{avec}$$

$$\text{tg } x_1 = \text{tg } (c \wedge Z) + Vz \cos \phi_{hk0} \quad \text{et}$$

$$\text{tg } x_2 = \text{tg } (c \wedge Z) - Vz \cos \phi_{hk0}.$$

Si $X = b$ (relations 4. Gazzi, 1963) :

$$c \wedge Z'_{hk0} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad \text{avec}$$

$$\text{tg } x_1 = \frac{\cos \phi_{hk0} \cdot \sin (c \wedge Z) + \sin \phi_{hk0} \cdot \text{tg } Vz}{\cos (c \wedge Z)} \quad \text{et}$$

$$\text{tg } x_2 = \frac{\cos \phi_{hk0} \cdot \sin (c \wedge Z) - \sin \phi_{hk0} \cdot \text{tg } Vz}{\cos (c \wedge Z)}$$

Si $Z = b$ (relations 5. Gazzi, 1963) :

$$c \wedge X'_{hk0} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad \text{avec}$$

$$\text{tg } x_1 = \frac{\cos \phi_{hk0} \cdot \sin (c \wedge X) + \sin \phi_{hk0} \cdot \text{tg } Vx}{\cos (c \wedge X)} \quad \text{et}$$

$$\text{tg } x_2 = \frac{\cos \phi_{hk0} \cdot \sin (c \wedge X) - \sin \phi_{hk0} \cdot \text{tg } Vx}{\cos (c \wedge X)}$$

Avec les amphiboles et les pyroxènes, on peut, sans erreur appréciable, prendre respectivement $\phi_{110} = 62^\circ$ et $\phi_{110} = 43^\circ, 5$. Pour les amphiboles et pyroxènes monocliniques ayant 010 pour plan des axes, c'est à dire pour la plupart de ces minéraux, Gazzi (1963) a publié des courbes reliant $2V$, $Z \wedge c$ et $Z' \wedge c$, qui permettent de déterminer graphiquement une de ces grandeurs, connaissant les deux autres.

Voici un exemple de solution graphique (Fig. 5) :

Spodumène. $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$. Données de Grip, in Winchell (1951). Monoclinique. Bon clivage 110.
 $\Phi_{110} = 43^\circ$. Plan des axes 010. $Z \wedge c = -25^\circ$ (convention de Winchell). (+) $2V = 66^\circ$. Soit à déterminer l'angle d'extinction $Z \wedge c$ dans 110.

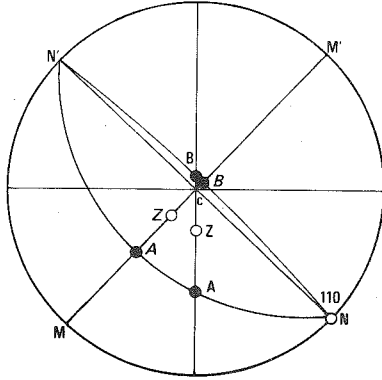


Fig. 5. - Angle d'extinction d'un fragment de clivage 110 de spodumène.

Sur le diamètre N-S (vertical) du canevas, trace de 010, porter Z tel que $Z \wedge c = -25^\circ$, puis, de part et d'autre de Z, A et B tels que $A \wedge Z = B \wedge Z = 33^\circ = V$.

Porter en N sur la circonférence, à $\Phi = 43^\circ$, la projection du pôle de 110 et tracer le diamètre NN', projection de la normale à 110. Le diamètre MM', qui lui est normal, est la trace de 110 sur le plan de projection.

Par A et B, faire passer deux arcs de grands cercles, NAN' et NBN', projections des deux plans perpendiculaires à la section et renfermant chacun un axe optique. Ils recoupent MM' en A' et B', séparés par une distance de $55^\circ, 5$. A mi-distance angulaire entre A' et B', porter Z'. Le canevas donne $Z' \wedge c = 21^\circ 3/4$. Le calcul donne $21^\circ, 8$.

4 - Indices de réfraction d'une section d'orientation connue

Il est difficile de déterminer directement sur frottis les indices principaux d'un minéral qui possède un bon clivage non orienté de façon privilégiée par rapport à l'ellipsoïde. Par contre, on mesure aisément les indices d'un fragment de clivage, qui sont également caractéristiques. Comme les traités ne donnent en général que les indices principaux, on est souvent amené à résoudre le problème suivant : connaissant les indices principaux et l'orientation optique d'un minéral, déterminer les indices d'un de ses fragments de clivage, d'orientation connue par rapport à l'ellipsoïde. La résolution de ce problème permet une comparaison rapide entre les valeurs non principales mesurées sur un fragment de clivage et les valeurs principales publiées.

On sait qu'une onde plane d'orientation quelconque, traversant une lame cristalline, découpe dans l'ellipsoïde des indices une ellipse dont les axes représentent en direction les directions de vibration dans la lame et sont en grandeur proportionnels aux indices de réfraction correspondants. Ce sont ces axes qu'il faut déterminer. Les solutions reposent sur l'équation de l'ellipse. Elles reviennent à calculer la longueur d'un rayon vecteur faisant avec l'un des axes de l'ellipse un angle donné, connaissant la longueur des deux demi-axes principaux de celle-ci. La détermination peut se faire entièrement par le calcul ou à l'aide de diverses méthodes graphiques.

Calcul

Indice non principal d'un uniaxe

Soit ρ la colatitude d'un plan hkl. L'un des deux indices est toujours n_o . Quel que soit le signe optique du cristal, l'indice non principal n_e' dans hkl est donné par :

$$\frac{1}{n_e'^2} = \frac{1}{n_o^2} \cos^2 \rho + \frac{1}{n_e^2} \sin^2 \rho = \frac{1}{n_e^2} + \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2} \right) \cos^2 \rho \quad (6)$$

Indices non principaux d'un biaxe

Soient une section hkl, a et b les angles que fait la normale à la section avec les axes optiques A et B du cristal, n_p et n_g les deux indices extrêmes.

Si a et b sont mesurés par rapport aux extrémités des axes optiques qui ont Z (n_g) pour bissectrice (aiguë ou obtuse), les deux indices non principaux sont donnés par :

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_p'^2} &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n_g^2} + \frac{1}{n_p^2} + \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos (a - b) \right] \\ &= \frac{1}{n_p^2} \cos^2 \frac{a - b}{2} + \frac{1}{n_g^2} \sin^2 \frac{a - b}{2} \\ &= \frac{1}{n_g^2} + \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos^2 \frac{a - b}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

et :

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_g'^2} &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n_g^2} + \frac{1}{n_p^2} + \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos (a + b) \right] \\ &= \frac{1}{n_p^2} \cos^2 \frac{a + b}{2} + \frac{1}{n_g^2} \sin^2 \frac{a + b}{2} \\ &= \frac{1}{n_g^2} + \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos^2 \frac{a + b}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

Si a et b sont mesurés par rapport aux extrémités des axes optiques qui ont X (n_p) pour bissectrice (aiguë ou obtuse), on a :

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_p'^2} &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n_g^2} + \frac{1}{n_p^2} - \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos (a + b) \right] \\ &= \frac{1}{n_p^2} \sin^2 \frac{a + b}{2} + \frac{1}{n_g^2} \cos^2 \frac{a + b}{2} \\ &= \frac{1}{n_p^2} - \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos^2 \frac{a + b}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

et :

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_g'^2} &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n_g^2} + \frac{1}{n_p^2} - \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos (a - b) \right] \\ &= \frac{1}{n_p^2} \sin^2 \frac{a - b}{2} + \frac{1}{n_g^2} \cos^2 \frac{a - b}{2} \\ &= \frac{1}{n_p^2} - \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos^2 \frac{a - b}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

Dans les sections de cristaux orthorhombiques ayant une caractéristique nulle (sections $hk0$, $Ok1$ ou $h01$), il est inutile de déterminer a et b . L'un des deux indices est un indice principal. Soit θ l'angle entre la normale à la section et la direction du plus grand des deux indices restants.

- Sections parallèles à X. L'un des indices est n_p . L'autre est donné par :

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{n_m^2} \cos^2 \theta + \frac{1}{n_g^2} \sin^2 \theta \quad (11)$$

- Sections parallèles à Y. L'un des indices est n_m . L'autre est donné par :

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{n_p^2} \cos^2 \theta + \frac{1}{n_g^2} \sin^2 \theta \quad (12)$$

- Sections parallèles à Z. L'un des indices est n_g . L'autre est donné par :

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{n_p^2} \cos^2 \theta + \frac{1}{n_m^2} \sin^2 \theta \quad (13)$$

Noter que θ est égal à l'un des angles ϕ ou ρ de la section (ou à son complément).

Dans les cristaux monocliniques, l'un des deux indices des sections parallèles à l'axe b (sections $h01$) est un indice principal (n_p , n_m ou n_g suivant l'orientation de l'ellipsoïde). L'autre est donné par les relations (11) à (13) ci-dessus, mais θ n'est plus égal à ϕ ou à ρ (ou à leurs compléments).

Pour déterminer les angles a et b , le plus simple est de recourir à la projection stéréographique (voir p. 19). Les figures 9 et 10 illustrent les deux cas (mesure par rapport à Z ou par rapport à X) pour le clivage parfait 111 de la kiesérite, dans l'orientation optique de Winchell.

On peut également calculer les angles a et b . Voici les formules dans le seul cas de sections $hk0$ de cristaux monocliniques. Ces sections correspondent à un bon clivage pour de nombreux minéraux monocliniques, notamment les amphiboles.

Si $X = b$ (Tomita, 1934), on applique pour les indices les relations (7) et (8), dans lesquelles :

$$\begin{aligned} \cos a &= \sin Vz. \cos \Phi_{hk0} + \cos Vz. \sin \Phi_{hk0}. \sin (Z \wedge c) \\ \cos b &= - \sin Vz. \cos \Phi_{hk0} + \cos Vz. \sin \Phi_{hk0}. \sin (Z \wedge c) \end{aligned} \quad (14)$$

Si $Y = b$ (Tsuboi, 1924), on applique pour les indices les relations (7) et (8), dans lesquelles :

$$\begin{aligned} \cos a &= - \sin [Vz - (Z \wedge c)]. \sin \Phi_{hk0} \\ \cos b &= \sin [Vz + (Z \wedge c)]. \sin \Phi_{hk0} \end{aligned} \quad (15)$$

Si $Z = b$ (Parker, 1961), on applique pour les indices les relations (9) et (10), dans lesquelles :

$$\begin{aligned} \cos a &= \sin Vx. \cos \Phi_{hk0} + \cos Vx. \sin \Phi_{hk0}. \sin (X \wedge c) \\ \cos b &= - \sin Vx. \cos \Phi_{hk0} + \cos Vx. \sin \Phi_{hk0}. \sin (X \wedge c) \end{aligned} \quad (16)$$

A défaut de calculatrice, l'emploi de tables facilite les calculs. Celles de Barlow (1940) donnent notamment les carrés, les racines carrées et les inverses de tous les entiers de 1 à 10.000. Celles de Wright (1913) donnent, de degré en degré, les carrés des sinus des angles de 0 à 90° et, de 0,001 en 0,001, les valeurs, à 6 décimales, de $1/n^2$ pour toutes les valeurs de n allant de 1,400 à 2,480.

Solutions graphiques

Les calculs ont été souvent remplacés, en tout ou en partie, par des solutions graphiques (projections stéréographiques et nomogrammes), dont l'exactitude est en général suffisante. Il est bon de connaître ces solutions, bien qu'elles aient perdu de leur intérêt depuis que les calculatrices électroniques ont rendu aisés et rapides des calculs auparavant fastidieux. Elles sont immédiates pour les uniaxes et peuvent être étendues au cas général des biaxes (Saucier, 1961).

Pour les uniaxes, soit n_e' l'indice non principal cherché, θ l'angle entre la normale à l'onde et la direction du plus grand indice. On a :

$$\frac{1}{n_e'^2} = \frac{1}{n_g^2} \sin^2 \theta + \frac{1}{n_p^2} \cos^2 \theta \quad (17)$$

Des abaques permettent d'éviter ce calcul. Ils sont utilisables directement pour les uniaxes, et aussi pour les biaxes lorsque le plan de clivage est normal à une des sections principales de l'ellipsoïde. Ceux de Wright (1911), de Schuman (1942) et d'Emmons (1929 b, 1943) donnent la biréfringence partielle de la section en fonction de θ et de la biréfringence maximale, d'où l'indice non principal. Celui de Mertie (1942), que reproduit la Planche 2 et dont la fig. 8 illustre l'emploi (1), offre l'avantage de donner directement l'indice non principal. Construit pour résoudre les équations qui relient le demi-angle des axes optiques aux trois indices principaux, il peut aussi bien servir à déterminer un indice non principal, connaissant l'angle que fait sa direction avec l'un des deux indices extrêmes et la grandeur de ces derniers. En effet, si l'on prend, par exemple :

$$\sin^2 V_z = \frac{\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_m^2}}{\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2}},$$

on en tire :

$$\frac{1}{n_m^2} = \frac{1}{n_p^2} \cos^2 V_z + \frac{1}{n_g^2} \sin^2 V_z = \frac{1}{n_g^2} + \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \cos^2 V_z .$$

Ces relations et les autres analogues sont de la même forme que les relations (7) à (10), et il suffit de remplacer n_m par n_e' , n_p' ou n_g' et V par θ , $(a + b)/2$ ou $(a - b)/2$ pour pouvoir résoudre ces dernières à l'aide de l'abaque.

Dans le cas général des biaxes, les solutions graphiques consistent à déterminer les coordonnées angulaires des directions de vibration désirées par rapport aux axes qui définissent l'ellipsoïde et à utiliser ces valeurs pour déterminer les indices. L'exemple suivant illustre leur emploi.

(1) - Divers autres auteurs, notamment Wood et Ayliffe (1936) et Hartshorne et Stuart (1970) ont proposé des abaques analogues.

Exemple

Soit à déterminer les indices d'un fragment de clivage 111 de kiesérite ($\phi = 60^\circ$, $\rho = 63^\circ$), sachant que $n_p = 1,520$, $n_m = 1,533$, $n_g = 1,584$, $(+)2V = 55^\circ$, $Z \wedge c = -76^\circ$ dans l'angle β obtus (orientation optique de Winchell).

La construction se fait comme suit (Fig. 6) :

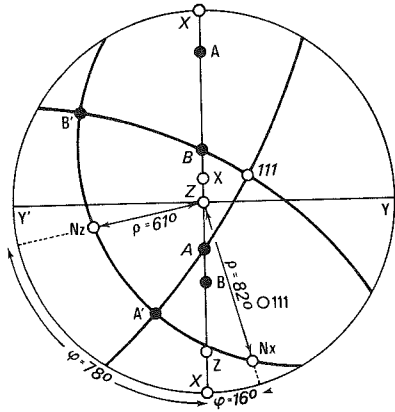


Fig. 6. - Orientation d'un fragment de clivage 111 de kiesérite.

- 1 - Dans l'orientation cristallographique conventionnelle, porter sur le calque les projections des pôles de X, de Z, des axes optiques A et B et de 111.
- 2 - Rendre la direction Z verticale (c'est à dire normale au centre du canevas) par rotation de -60° autour du centre, puis déplacement de -63° sur le diamètre horizontal. Imprimer les mêmes déplacements aux autres points de la projection. X, Z, A, B et 111 viennent en X' , Z' , A' , B' et $111'$.
- 3 - Amener $111'$ sur le diamètre horizontal du canevas et, à -90° , tracer l'arc de grand cercle correspondant.
- 4 - Tracer les arcs de grands cercles $111', A'$ et $111', B'$, qui recourent le grand cercle précédent en A'' et B'' , projections des axes optiques sur le plan de projection 111. A mi-distance angulaire entre A'' et B'' , porter Nz , qui est une des directions de vibration cherchées et à 90° de Nz la seconde, Nx .

- 5 - Les indices de réfraction n_1 et n_2 sont représentés dans l'ellipsoïde par des rayons-vecteurs ONx et ONz . La figure 7 illustre en perspective pour ONz ce qui précède. On lit sur la projection les valeurs suivantes pour les coordonnées angulaires de Nz et de Nx :

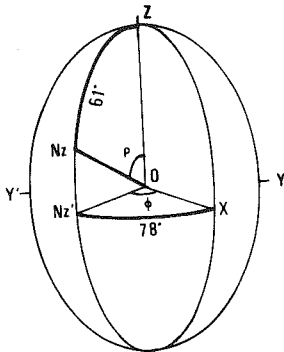


Fig. 7. - Orientation d'un indice non principal dans l'ellipsoïde de la kiesérite.

	ϕ	ρ
Nz	78°	61°
Nx	16°	82°

Solutions

Bloss (1961) introduit les valeurs de ϕ et de ρ dans la relation :

$$n' = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sin^2 \rho \cdot \cos^2 \phi}{n_p^2} + \frac{\sin^2 \rho \cdot \sin^2 \phi}{n_m^2} + \frac{\cos^2 \rho}{n_g^2}}}$$

ce qui donne ici $n_p' = 1,522$ et $n_g' = 1,544$, mais, même avec l'aide de tables, les calculs sont assez fastidieux. Les solutions entièrement graphiques sont préférables.

Celle de Saucier (1961) consiste à résoudre successivement deux ellipses. Il porte d'abord sur l'un des abaques précités l'angle ϕ et la biréfringence partielle $(n_m - n_p)$. Il en tire un indice n_z' , représenté dans l'ellipsoïde par ONz' , à la fois rayon-vecteur de l'ellipse XOY et de mi petit axe de l'ellipse ZONz', dont ONz , représentant l'indice n_z cherché, est un rayon-vecteur. Avec $(n_m - n_p) = 0,013$ et $\phi = 78^\circ$, on obtient $n_z' = 1,532$; puis, avec $(n_g - n_z') = 0,052$ et $\rho = 61^\circ$, on en tire $n_z = 1,544$. On obtient de même $n_x = 1,522$.

On doit à Sabatier (1961) une simplification de la méthode de Saucier. Après avoir porté sur le calque les projections des axes optiques et du pôle du plan de clivage, c'est à dire celle de la normale à l'onde, il mesure sur la projection les angles α_1 et α_2 que fait cette normale avec chacun des axes optiques, Z (n_g) étant bissectrice de l'angle qu'ils font entre eux. Les indices cherchés sont donnés par les relations (7) et (8) ci-dessus, relations "formellement identiques à l'expression qui donne, dans un cristal uniaxe positif, l'indice extraordinaire d'une onde dont la normale fait avec l'axe optique l'angle

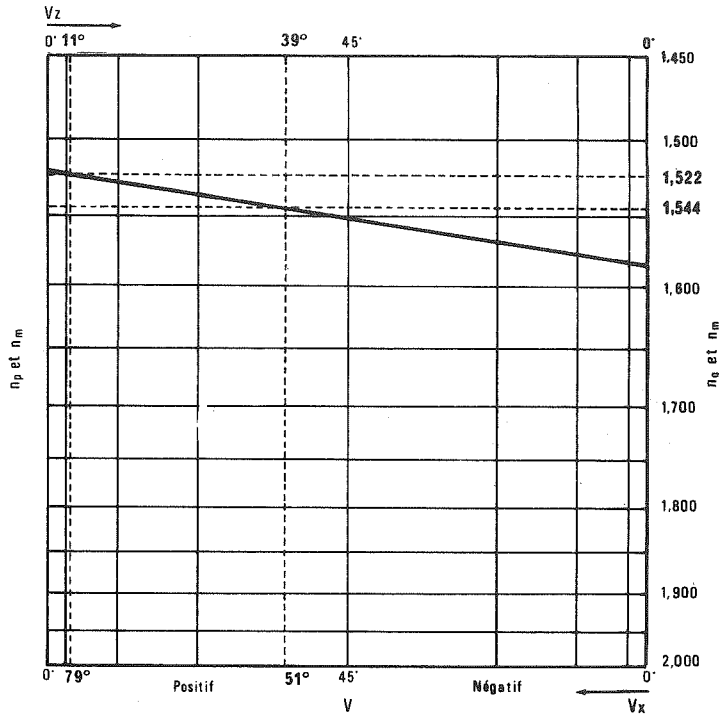


Fig. 8. - Emploi de l'abaque de Mertie

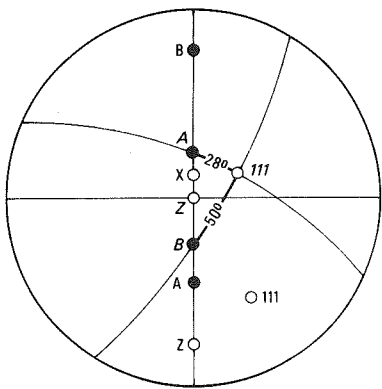


Fig. 9. - Mesure des angles par rapport à Z.

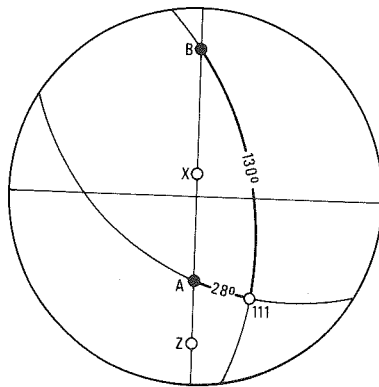


Fig. 10. - Mesure des angles par rapport à X.

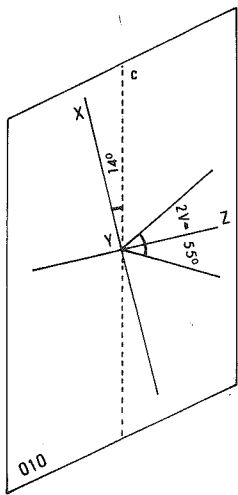


Fig. 11
Kiesérite (Palache et al.)

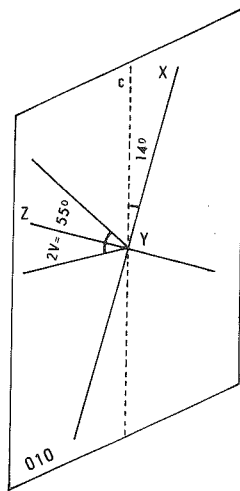


Fig. 12
Kiesérite (Winchell)

β . Ces indices cherchés sont donc les mêmes que les indices extraordinaires de deux ondes traversant un cristal fictif uniaxe positif, avec $n_e = n_g$, $n_o = n_p$ et dont les normales font avec l'axe optique les angles $(\alpha_1 + \alpha_2)/2$ et $(\alpha_1 - \alpha_2)/2$. En d'autres termes, il suffit de mesurer α_1 et α_2 sur la projection et de reporter la moitié de leur somme et de leur différence sur l'abaque pour obtenir les indices n_p' et n_g' cherchés.

Pour appliquer la solution de Sabatier telle qu'elle est donnée, il faut ici amener Z au centre de la projection et imprimer les mêmes déplacements à A, B et 111 (Fig. 9). On obtient alors, par rapport à Z, $\alpha_1 = 50^\circ$ et $\alpha_2 = 28^\circ$, d'où $(\alpha_1 + \alpha_2)/2 = 39^\circ$ et $(\alpha_1 - \alpha_2)/2 = 11^\circ$ ce qui donne $n_p' = 1,522$ et $n_g' = 1,544$.

On peut éviter cette opération et mesurer α_1' et α_2' par rapport à X, aussitôt après avoir porté X, Z, A, B et 111 sur le canevas (Fig. 10). On obtient $\alpha_1' = 28^\circ$ et $\alpha_2' = 130^\circ$. Or $\cos^2(\alpha_1' + \alpha_2')/2 = \sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)/2$ et $\cos^2(\alpha_1' - \alpha_2')/2 = \sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)/2$. Lorsque α_1' et α_2' ont été mesurés par rapport à X, l'abaque de Mertie donne les mêmes valeurs pour les indices non principaux si on lit les angles de la droite vers la gauche (Fig. 8).

La kiesérite permet une autre illustration de ce qui précède. Elle a été initialement choisie comme exemple parce qu'elle possède plusieurs clivages, dont deux clivages parfaits non orientés de façon privilégiée par rapport à l'ellipsoïde. D'autre part, avec des conventions opposées pour le signe de l'angle d'extinction, Palache et al. et Winchell donnent tous deux pour ce minéral $Z \sim c = -76^\circ$ (Fig. 11 et 12). Par suite, sauf cas d'orientation privilégiée, les indices non principaux de fragments de clivage de même orientation cristallographique ne peuvent être identiques dans les deux orientations optiques. Il avait paru intéressant de déterminer expérimentalement les indices et l'orientation optique des deux clivages parfaits et de les comparer à ce que permettent de prévoir les méthodes qui précèdent, afin de déterminer laquelle des deux orientations il convenait d'adopter. Ceci a été une occasion de constater que la situation était assez confuse, diverses orientations cristallographiques et optiques ayant été proposées (voir Friedrich et al., 1961).

Données cristallographiques

Clivage	Φ	ρ	Remarques
111	60°	63°	Clivage parfait (Palache et al., Winchell)
110	51°	90°	Clivage parfait (Palache et al., Winchell)
$\bar{1}01$	-90°	36°	Clivages "imparfaits"
011	26°5	47°5	(Palache et al.),
$\bar{1}11$	-36°5	50°5	non mentionnés par Winchell

Données optiques

n_p	1,520	Ces valeurs, reproduites par Palache et al. et par Winchell, sont une moyenne, par Schaller et		
n_m	1,533	Henderson (1932) des valeurs extrêmes suivantes :		
n_g	1,584	$n_p = 1,518-1,523$	$n_m = 1,531-1,535$	$n_g = 1,582-1,586$
Y = b				
Z \wedge c	-76°	Même signe dans Palache et al. et dans Winchell.		

Leonhardt et Weiss (in Friedrich et al.) ont proposé une autre orientation cristallographique, suivant laquelle :

Palache et al.		Leonhardt et Weiss		
hkl	=	hkl	Φ	ρ
111	=	$\bar{1}12$	-11°	27°
110	=	$\bar{1}11$	-36°	51°
$\bar{1}01$	=	100	90°	90°
011	=	011	28°	48°
$\bar{1}11$	=	110	51°	90°

L'orientation optique de Leonhardt et Weiss est sensiblement celle que donnent Palache et al.

Incidentement, les indices de la kiesérite ne paraissent pas avoir été mesurés souvent, car ce sont toujours les valeurs ou la moyenne ci-dessus que reproduisent les traités consultés. Au moins pour la kiesérite des évaporites, il est d'ailleurs peu probable que les indices de ce minéral de composition simple varient beaucoup.

En se limitant aux clivages parfaits, les constructions que l'on a vues montrent ce qu'on devrait observer dans chaque cas (P = Palache et al., W = Winchell) :

Clivage	n_p'	n_g'	En lumière convergente :	
			Objectif O.N. = 0,85	Objectif O.N. = 1,3
111 (P)	1,527	1,559	Un axe au bord du champ.	Un axe à mi-distance du centre, X et Z dans le champ.
111 (W)	1,522	1,544	Z et un axe au bord du champ.	Bissectrice aiguë excentrée, deux axes dans le champ.
110 (P et W)	1,521	1,554	Axe et Z hors du champ, non loin du bord.	Bissectrice aiguë très excentrée, axes près du bord du champ.

Les observations ont été faites sur des fragments de clivage d'aussi bonne qualité que possible, choisis sous la loupe binoculaire. Elles concordent mal avec les prévisions ci-dessus. En effet, les meilleurs clivages observés sont de deux sortes :

- soit des fragments très biréfringents, avec environ $n_p' = 1,530$ et $n_g' = 1,580$. En lumière convergente, avec l'objectif à immersion, ils montrent une figure de bissectrice obtuse excentrée, avec un axe dans le champ.
- soit des fragments un peu moins biréfringents, avec environ $n_p' = 1,527$ et $n_g' = 1,562$. En lumière convergente, avec l'objectif à immersion, ils montrent un axe assez excentré, la convexité, donc Z, étant dirigée vers l'extérieur du champ.

De plus, on observe des fragments peu biréfringents dont l'aspect en lumière convergente évoque ce que montreraient les clivages 111 dans l'orientation de Winchell. Mais, bien que leur orientation sensiblement constante d'une particule à l'autre montre qu'il s'agit bien de fragments de clivage, leur qualité est nettement moins bonne que celle des deux autres, leur n_g' n'est que de 1,53 environ au lieu de 1,544 et leurs figures de lumière convergente sont mieux centrées.

Par contre, si l'on admet que les trois clivages ci-dessus sont le $\bar{1}12$, le $\bar{1}11$ et le 100 de Leonhardt et Weiss (respectivement 111, 110 et $\bar{1}01$ de Palache et al.), ces observations s'expliquent bien. Les indices calculés pour ces fragments sont :

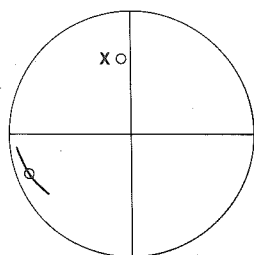


Fig. 13. - Kiesérite, $\bar{1}12$

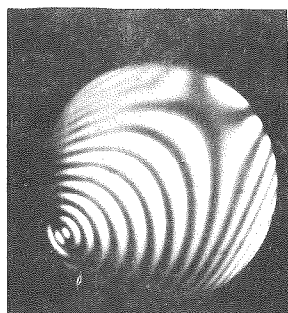


Fig. 14

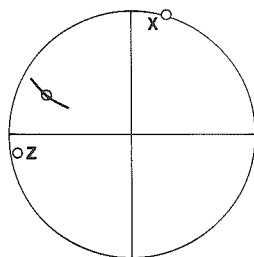


Fig. 15. - Kiesérite, $\bar{1}11$

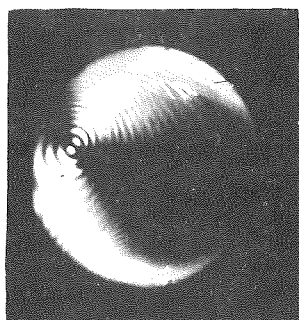


Fig. 16

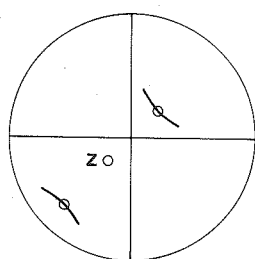


Fig. 17. - Kiesérite, 100

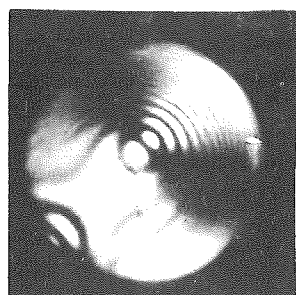


Fig. 18

hkl	n_p'	n_g'
$\bar{1}12$	1,531	1,579
$\bar{1}11$	1,525	1,564
100	1,523	1,533

Les figures 13, 15 et 17 montrent en projection orthogonale ce qu'on devrait observer dans cette hypothèse. Les cercles marquent les limites du champ de l'objectif (O.N. = 1,3). Les photos correspondantes (Fig. 14, 16 et 18) représentent ce que montrent effectivement, en lumière convergente (O.N. = 1,3), les fragments de clivage étudiés. La concordance apparaît. Il semble donc que l'orientation à adopter soit celle de Leonhardt et Weiss. Il serait intéressant de le vérifier sur des sections orientées taillées dans des cristaux automorphes de kiesérite.

Par suite de la présence de plusieurs directions de clivage, les fragments de clivage suffisamment étendus pour pouvoir être examinés en lumière convergente sont relativement épais et non nécessairement d'épaisseur uniforme, ce qui complique la mise au point avec l'immersion et cause des déformations dans les figures de lumière convergente (Fig. 18).

De plus, il a été constaté que le seul fait de cliver un grain de kiesérite produit assez souvent des variations locales d'orientation dans un même fragment de clivage, et il n'est pas toujours facile d'en trouver un dont l'orientation optique soit uniforme dans toute l'étendue du champ (Fig. 16).

5 - Indices principaux à partir d'indices non principaux

On peut avoir à résoudre le problème inverse : calculer les indices n_g et n_p , connaissant les indices n_g' et n_p' d'une section d'orientation donnée, ainsi que les angles a et b que fait la normale à la section avec les axes optiques. Soient $A = (a - b)$, $B = (a + b)$. Des relations de la page 15, on tire :

Si a et b sont mesurés par rapport à Z :

$$n_g^2 = \frac{n_p'^2 \cdot n_g'^2 (\cos A - \cos B)}{n_p'^2 (1 + \cos A) - n_g'^2 (1 + \cos B)} \quad (18)$$

$$n_p^2 = \frac{n_p'^2 \cdot n_g'^2 (\cos A - \cos B)}{n_g'^2 (1 - \cos B) - n_p'^2 (1 - \cos A)} \quad (19)$$

Si a et b sont mesurés par rapport à X :

$$n_g^2 = \frac{n_p'^2 \cdot n_g'^2 (\cos A - \cos B)}{n_p'^2 (1 - \cos B) - n_g'^2 (1 - \cos A)} \quad (20)$$

$$n_p^2 = \frac{n_p'^2 \cdot n_g'^2 (\cos A - \cos B)}{n_g'^2 (1 + \cos A) - n_p'^2 (1 + \cos B)} \quad (21)$$

6 - Biréfringence d'une section d'orientation connue

La biréfringence partielle d'une section est donnée par la relation :

$$\frac{1}{n_p'^2} - \frac{1}{n_g'^2} = \left(\frac{1}{n_p^2} - \frac{1}{n_g^2} \right) \sin a \cdot \sin b,$$

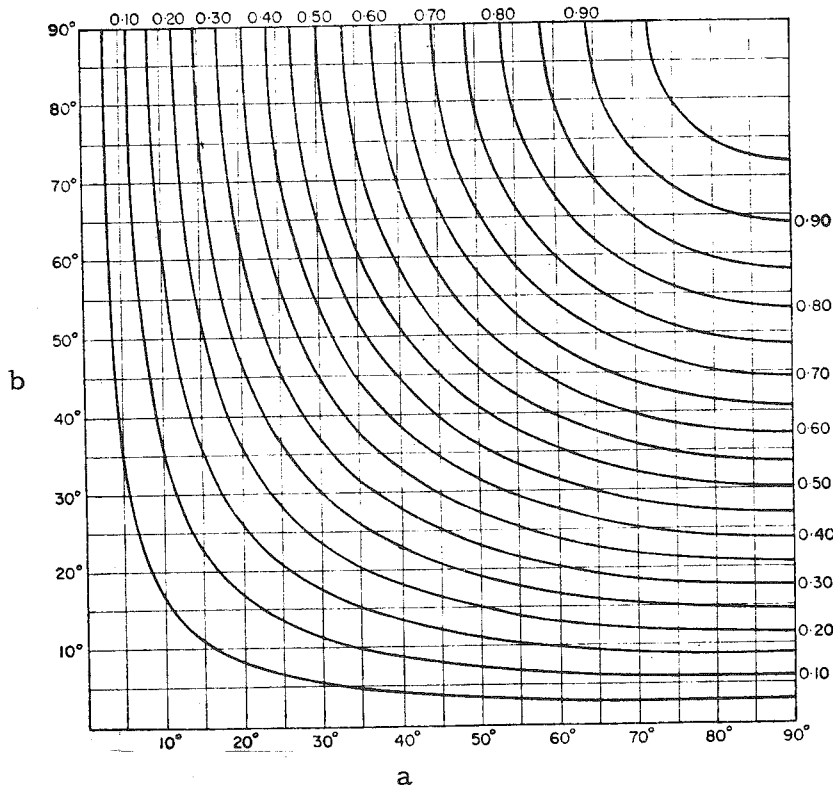


Fig. 19. - Abaque de Wright (d'après Johannsen, 1918).

ou, plus rapidement, par la relation approchée :

$$n_g' - n_p' = (n_g - n_p) \sin a \cdot \sin b$$

a et b ayant même signification que plus haut.

Pour les uniaxes, la relation devient :

$$|n_e' - n_o| = |(n_e - n_o) \sin^2 a|,$$

a étant ici l'angle que fait la normale à la section avec l'axe optique.

Sauf pour les corps fortement biréfringents, ces deux dernières relations suffisent souvent. Wright (1911) en a donné la solution graphique ci-contre (Fig. 19), où le point d'une branche d'hyperbole de coordonnées a et b donne le produit sin a · sin b par lequel il

faut multiplier la biréfringence maximale pour avoir la biréfringence partielle.

7 - Angle des axes optiques

Dans les sections normales ou quasi-normales à la bissectrice aiguë, on mesure commodément 2V par la méthode de Mallard, qui repose sur le fait que la figure de lumière convergente peut être considérée sensiblement comme la projection orthogonale du phénomène. Si D est la demi-distance entre les sommets des branches d'hyperbole, mesurée en unités arbitraires (graduations d'un micromètre oculaire), le demi-angle apparent E est donné (avec un objectif à sec) par la relation bien connue :

$$D = K \sin E.$$

On détermine K pour le système optique utilisé au moyen d'une section normale à la bissectrice aiguë d'un cristal dont l'angle des axes est connu avec précision. On emploie souvent l'aragonite et la barytine.

2E est lié à 2V par la relation :

$$\sin E = n_m \sin V,$$

dont il existe de nombreuses solutions graphiques. Celle de Winchell (1946), que reproduit la Planche 3, donne directement $2V$ ou $2E$ en fonction de $2D$, de K et de n_m .

Wright (1911) a montré que, dans les sections normales ou quasi-normales à un axe optique, la plus ou moins grande convexité de la branche d'hyperbole donne un ordre de grandeur de l'angle des axes. Son dessin, souvent reproduit, illustre le cas pour diverses valeurs de $2V$, n_m étant constant et égal à 1,6. Bordet (1968) donne une figure d'usage plus commode, car elle montre la courbure et l'azimut de la branche d'hyperbole pour plusieurs valeurs de n_m et pour deux ouvertures numériques (0,65 et 0,85).

De nombreuses méthodes pour la détermination directe ou indirecte de $2V$ à l'aide de la platine à aiguille ont été décrites. On se reportera aux publications citées plus loin (voir p.60).

Enfin, $2V$ peut être calculé à partir des indices de réfraction, au moyen des relations données aux pages 7 et 17.

C - PARTICULES ORIENTÉES DE FACON QUELCONQUE OU DEFAVORABLE

Outre le cas des minéraux dépourvus de clivage, on examine ici quelques cas dans lesquels l'existence d'un bon clivage imprime aux particules une orientation privilégiée qui rend difficile la détermination de certaines constantes.

Diverses méthodes, d'efficacité et de commodité d'emploi inégales, permettent de traiter le cas de ces minéraux. Abstraction faite des autres causes d'erreurs, plusieurs de ces méthodes ne peuvent, par leur principe même, donner que des résultats approchés.

1 - Méthode générale

Soit une préparation constituée de particules pouvant être considérées comme orientées de façon quelconque, et sensiblement de même épaisseur. Sur les particules montrant les teintes d'interférences les plus élevées, on pourra déterminer n_o et des valeurs très approchées de n_e (ou de n_g et de n_p); dans des conditions favorables, elles donneront également le signe optique. Les particules éteintes ou quasi-éteintes entre nicols croisés permettent la détermination de n_o (ou de n_m), celle de l'uniaxial ou de la biaxial et, dans les limites vues plus haut, celle du signe optique.

On peut également tirer parti du fait que les deux indices d'un fragment biaxial ne peuvent être tous deux inférieurs, ou tous deux supérieurs à n_m (on voit facilement que ceci découle de la symétrie de l'ellipsoïde). Par suite, soit une série de préparations dans une gamme de liquides d'indices compris entre des valeurs n_1 et n_2 telles que :

$$n_1 \leq n_p \quad \text{et} \quad n_2 \geq n_g.$$

Pour chaque préparation, comparer les indices d'un certain nombre de grains à celui du liquide. Si, dans un liquide d'indice n_3 , le plus grand indice d'une particule est inférieur ou égal à n_3 et que, dans un liquide d'indice $n_4 > n_3$, le plus petit indice d'une particule est supérieur ou égal à n_4 , on a :

$$n_m \geq n_3 \quad \text{et} \quad n_m \leq n_4.$$

A la limite, si l'on trouve un liquide d'indice n tel que le plus petit indice d'une particule et le plus grand indice d'une autre particule lui soient tous deux égaux, on a :

$$n_m = n.$$

On obtient de façon analogue des valeurs approchées de n_p et de n_g .

2 - Méthodes spéciales

Les méthodes qui suivent s'appliquent plus particulièrement aux minéraux dont la morphologie ou l'orientation défavorable d'un bon clivage par rapport à l'ellipsoïde empêchent la détermination directe de la constante cherchée. C'est par exemple le cas des micas, dans lesquels la présence du clivage parfait 001 nécessite le recours à des artifices pour la mesure de n_p ; de même, la détermination directe de l'angle maximum d'extinction et celle des indices principaux n'est pas possible sur un fragment de clivage 110 d'amphibole.

a - Poudre de verre

La poudre à examiner est additionnée de poudre de verre (Larsen et Berman, 1934). Les particules de verre empêchent celles du minéral de reposer toutes sur la lame dans une orientation privilégiée, et il devient possible de trouver une particule dont l'orientation permette la détermination de la constante désirée.

b - Tube capillaire

Winchell (1929) a proposé une méthode d'orientation applicable aux minéraux fibreux ou aciculaires. Elle consiste à introduire une fibre du minéral dans un tube capillaire de diamètre convenable. Le tube est placé sur une lame, sur laquelle ont été collés deux fragments de lamelle destinés à le guider. Le tout est rempli d'un liquide d'indice approprié et recouvert d'un couvre-objet. La fibre pouvant ainsi tourner de n'importe quel angle autour de sa direction d'allongement, il est possible d'amener successivement dans le plan de la platine chacune des directions principales de vibration et, par suite, à l'aide d'un choix de liquides, de déterminer les indices correspondants. Il peut y avoir des réflexions gênantes lorsque l'indice du liquide d'immersion diffère notablement de celui du verre.

c - Silicate de soude

Lindbergh (1946) propose la méthode suivante. Une goutte de silicate de soude est placée dans une petite dépression ménagée à la surface de la lame, et agitée avec une aiguille pour empêcher la formation d'une pellicule pendant que le liquide devient progressivement plus visqueux. On continue d'agiter jusqu'à ce que les sillons tracés par l'aiguille cessent de se remplir au fur et à mesure de leur formation. On laisse reposer 30 secondes et on saupoudre le silicate des particules à examiner. On laisse reposer une minute avant de recouvrir la préparation du liquide choisi. Il est nécessaire d'intercaler un mince anneau entre lame et lamelle, afin que le poids de cette dernière ne change pas l'orientation quelconque des particules. La méthode est d'autant plus satisfaisante que les particules sont de plus petites dimensions.

d - Platine universelle

Pour les minéraux micacés, Ferguson et Peacock (1943) déterminent d'abord n_g de la manière habituelle. Ils placent ensuite une mince paillette du minéral entre les hémisphères de la platine universelle, dans un liquide d'indice n tel que

$$n_p < n < n_g.$$

Après avoir orienté la direction Y parallèlement à l'axe E-W, ils déterminent l'angle de rotation à imprimer à la préparation autour de cet axe pour que la frange de Becke disparaisse, autrement dit, pour que l'indice correspondant à cette position soit égal à n . Si r est cet angle, on a :

$$n_p^2 = \frac{n_g^2 \cdot n^2 \sin^2 r}{n_g^2 - n^2 \cos^2 r}$$

D'après les auteurs, les angles de rotation peuvent être connus à 1° ou $3^\circ, 5$ près, et les indices correspondants à $\pm 0,001$ près. En fait, dans les conditions courantes d'opération, les résultats sont moins bons.

e - Lames de gélatine

Fairbairn (1943) a attiré l'attention sur une méthode intéressante, due à Vedeneeva et Melancholin, utilisant initialement des plaques photographiques. Une goutte d'eau est déposée sur la gélatine sèche. Après quelques secondes, on enlève l'eau, on saupoudre des particules à examiner la gélatine ramollie et on laisse sécher au frais jusqu'à ce que la gélatine ait durci. Les particules sont ainsi distribuées au hasard, d'où possibilité de trouver des orientations favorables. On recouvre ensuite la préparation du liquide d'indice choisi et d'un couvre-objet. Pour changer de liquide, on retire le couvre-objet, incline la lame et la lave avec un mince jet de tétrachlorure de carbone ou d'acétone, projeté par une pissette. Olcott (1960) donne la formule suivante pour la préparation des lames :

Solution A	Gélatine à 1 % dans l'eau distillée	
Solution B	Eau distillée	10 ml
	Acétone	5 ml
	Formaldéhyde à 2 %	2 ml.

Ces solutions se conservent environ 3 semaines. Voici leur emploi :

- 1 - Avec un compte-gouttes, verser plusieurs gouttes de solution A sur une lame.
- 2 - Faire sécher sur plaque chauffante à $75-80^\circ\text{C}$.
- 3 - Verser 1-2 gouttes de solution B sur la gélatine sèche et les étendre légèrement. Lorsque le liquide s'est suffisamment évaporé pour que la gélatine soit collante, saupoudrer avec les grains à étudier.
- 4 - Faire sécher sur plaque chauffante et continuer comme précédemment.

Jeffries (1961) signale que la formaldéhyde décompose les carbonates. Langford (1962) utilise une technique analogue, en remplaçant la gélatine par une pellicule aussi mince que possible de résine synthétique (genre Araldite), à laquelle les particules adhèrent mieux. Le collodion et, dans certains cas, le phtalate de glycol, ont également donné des résultats satisfaisants.

f - Lamelles taillées

Pour mesurer n_p dans les micas et les chlorites, Girault (1950) taille avec une lame de rasoir une étroite (0,2 mm) lamelle dans le minéral, normalement au clivage parfait. Une des extrémités de la lamelle est engagée dans une encoche pratiquée dans un grain de plomb et celle-ci refermée avec des pinces fines. La malléabilité du plomb permet de rendre le plan de clivage bien vertical. Ces opérations se font sous la loupe binoculaire. Le grain de plomb est alors placé dans un godet en verre, lui-même posé sur une platine chauffante et rempli d'un liquide d'indice approprié. On oriente la direction d'allongement de la lamelle normalement au plan de vibration du polariseur et fait varier la température jusqu'à égalisation des indices. Les observations sont faites en lumière du sodium et un réfractomètre intercalé sur le circuit d'eau thermostatée de la platine permet de lire l'indice du liquide à la température d'égalité.

g - Platine à aiguille

Cet accessoire, sommairement décrit plus loin, permet d'imprimer à une particule un mouvement de rotation autour d'un axe situé dans le plan de la platine du microscope. Il est particulièrement utile pour l'étude des cristaux fibreux ou aciculaires, notamment ceux qui possèdent un clivage parfait non orienté de façon privilégiée par rapport à l'ellipsoïde des indices.

CHAPITRE II
METHODES DE COMPARAISON DES INDICES,
SENSIBILITE, CORRECTIONS

Les déterminations se font par immersion dans des liquides d'indices connus, que l'on compare aux indices à déterminer.

Soit n un indice cherché. Sans prendre en considération la sensibilité de l'oeil, variable avec les observateurs, et en opérant dans les meilleures conditions réalisables, on peut toujours trouver deux liquides dont les indices n_1 et n_2 soient respectivement inférieur et supérieur à n et tels que les différences $(n_1 - n)$ et $(n_2 - n)$ soient sensiblement égales en valeur absolue et tout juste décelables au moyen du critère de comparaison utilisé. En d'autres termes, n_1 et n_2 représentent les valeurs les plus approchées possibles, respectivement par défaut et par excès, de l'indice n cherché. n est certainement compris entre n_1 et n_2 , et peut s'écrire :

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2},$$

avec une incertitude inférieure ou au plus égale à

$$\pm \frac{n_2 - n_1}{2}$$

La différence $(n_2 - n_1)$ dépend de nombreux facteurs, dont les principaux peuvent être classés comme suit :

- A - Conditions d'opération.
 - 1 - Critère choisi pour la comparaison des indices.
 - 2 - Erreurs d'orientation des particules.
- B - Dispersion.
 - 1 - Généralités. Graphique de Hartmann.
 - 2 - Dispersion des liquides.
 - 3 - Dispersion des solides.
- C - Température.
 - 1 - Liquides.
 - 2 - Solides.
- D - Autres facteurs dépendant des liquides d'immersion.
 - 1 - Stabilité.
 - 2 - Calibration.
- E - Autres facteurs dépendant du corps étudié.
 - 1 - Forme des particules.
 - 2 - Hétérogénéité.
 - 3 - Biréfringence.
 - 4 - Absorption.

On admet dans ce qui suit que les conditions opératoires n'affectent pas les propriétés optiques des minéraux, et que ces derniers sont inertes par rapport aux liquides d'immersion. Il en est ainsi dans la grande majorité des cas (1). De plus, en raison des phénomènes de dispersion, ce qui suit ne s'applique en toute rigueur - sauf indication contraire -, qu'à des observations faites en lumière monochromatique.

A - CONDITIONS D'OPERATION

1 - Critères de comparaison des indices

Ils dépendent des méthodes d'éclairage utilisées. Saylor (1935) a publié une excellente étude expérimentale des méthodes classiques (éclairage axial et éclairage oblique, ainsi qu'un perfectionnement de ce dernier), dont les principaux résultats sont résumés ci-après. On examinera ensuite d'autres méthodes, relativement récentes, qui font usage de la dispersion différentielle des liquides et des solides.

a - Eclairage axial (2)

La préparation est éclairée par un faisceau de rayons très peu inclinés sur l'axe optique du microscope. Lorsque l'indice du solide diffère de celui du liquide, un liséré lumineux apparaît au contact entre ces deux milieux. Il est plus visible si l'on diminue la luminosité du fond en fermant le diaphragme. La mise au point étant faite exactement sur le contact, le liséré paraît se déplacer vers le milieu dont l'indice est le plus élevé lorsqu'on augmente la distance objectif-préparation au moyen de la vis micrométrique du microscope; si l'on diminue cette distance, le liséré paraît se déplacer vers le milieu dont l'indice est le moins élevé. C'est la classique frange de Becke. L'intensité de la frange est fonction de la différence entre les indices des deux milieux; avec l'habitude, on observe des différences de l'ordre de 0,001 ou moins.

En principe, le critère d'égalité des indices est la disparition de la frange de Becke. En pratique, on a vu qu'il y a toujours un certain étalement, qui est une mesure de l'approximation de la détermination. D'ailleurs, en toute rigueur, la disparition de la frange ne peut avoir lieu qu'en lumière monochromatique ou, si l'on opère en lumière blanche, à la condition rarement réalisée que solide et liquide aient même dispersion (3).

D'après la plupart des traités, la méthode permet de comparer deux indices à environ $\pm 0,001$ près. En fait, Saylor trouve que l'approximation varie beaucoup suivant :

-
- (1) - Il existe des exceptions. Ainsi, les propriétés optiques de la glaubérite, du gypse, de certaines zéolites varient de façon parfois appréciable dans les intervalles de températures utilisés couramment; les indices des minéraux argileux peuvent être affectés par les liquides d'immersion; le soufre natif est soluble dans le diiodométhane; plusieurs minéraux peu réfringents sont solubles dans les liquides d'immersion renfermant de l'eau; d'autres minéraux sont attaqués par les liquides d'indices élevés.
 - (2) - "Central illumination" des auteurs de langue anglaise.
 - (3) - Lorsqu'il existe une différence appréciable entre la dispersion du liquide et celle du solide, l'égalité n'est réalisée que pour une longueur d'onde. On observe alors en lumière blanche des effets colorés sur lesquels nous reviendrons.

L'ouverture numérique de l'objectif. Saylor constate que la précision est meilleure avec les objectifs d'ouverture numérique plutôt faible (1). Il observe que, dans ce cas, une déviation angulaire donnée d'un rayon lumineux correspond à une fraction plus grande de l'ouverture de l'objectif.

La forme des grains influence considérablement la précision. On obtient les meilleurs résultats lorsque la surface contre laquelle se produit la frange de Becke est située dans le cône lumineux, autrement dit, quand elle est sensiblement verticale, de telle sorte que la lumière puisse atteindre ses deux faces.

L'angle d'ouverture et l'intensité du faisceau lumineux. De préférence à un faisceau de rayons rigoureusement parallèles, Saylor recommande l'emploi d'un cône lumineux d'angle au sommet très inférieur à l'ouverture de l'objectif, focalisé approximativement dans le plan de la préparation. L'angle et l'intensité lumineuse les plus favorables doivent être déterminés dans chaque cas particulier.

La biréfringence, comme on le verra plus loin, n'introduit d'erreurs notables que si elle est très élevée, et avec les fortes ouvertures.

Saylor conclut de ses expériences que, dans le cas (le plus favorable) des corps isotropes incolores, à température connue et en lumière monochromatique, la précision de la méthode par éclairage axial peut varier de $\pm 0,001$ à $\pm 0,0002$ environ.

b - Eclairage oblique (2)

Avec ce mode d'éclairage, une particule plongée dans un liquide d'indice moins élevé que le sien paraît normalement (3) plus claire du côté d'où arrive la lumière et plus sombre du côté opposé; le contraire se produit lorsque c' est l'indice du liquide qui est le plus élevé. D'après Saylor, la meilleure façon de réaliser ce mode d'éclairage est la suivante.

Focaliser l'image de la source lumineuse dans le plan de la préparation. Régler le diaphragme du condensateur de telle sorte que l'ouverture de ce dernier soit légèrement supérieure à celle de l'objectif. Intercaler la lentille de Bertrand et introduire un cache dans le système optique du condensateur, à un niveau tel qu'il en apparaisse une image nette dans le plan focal arrière de l'objectif. Pousser le cache jusqu'à ce que son image recouvre environ les 4/5 de la surface arrière de l'objectif. Retirer la lentille de Bertrand. Le champ du microscope est alors faiblement, mais uniformément éclairé. Ce montage n'est pas réalisable avec tous les types de microscopes, en raison de particularités de construction propres à chacun.

(1) - Ford (1932), Hartshorne et Stuart (1970), Larsen et Berman (1934), Kerr (1959), d'autres encore recommandent des ouvertures numériques moyennes ou fortes. Muir (1967) préconise les faibles ouvertures. L'auteur estime, lui aussi, que le phénomène est plus net avec les ouvertures faibles ou moyennes. Bien entendu, avec les particules de très petites dimensions, l'emploi d'objectifs puissants, (donc, généralement, de grande ouverture numérique) est inévitable.

(2) - "Inclined illumination" des auteurs de langue anglaise.

(3) - Le sens du phénomène dépend de la position verticale du condensateur. Une fois réglé, celui-ci ne doit donc plus être déplacé. De plus, il est bon de vérifier le réglage à l'aide d'un liquide et d'un solide d'indices connus.

La sensibilité de la méthode varie avec les dimensions et la forme des particules, l'ouverture numérique et la perfection avec laquelle les parties périphériques de l'objectif sont corrigées, l'intensité de l'éclairage et le réglage des diaphragmes. La précision des résultats, acceptable avec les faibles ouvertures numériques, devient médiocre lorsque celles-ci augmentent, et même pratiquement illusoire, dans ce dernier cas, pour les corps fortement biréfringents. La méthode a cependant son utilité, soit comme moyen de confirmation, soit lorsque l'éclairage axial donne des résultats ambigus (fausses franges de Becke, etc.). Certains observateurs la préfèrent même à l'éclairage axial.

c - Double diaphragme

Elaborée par Saylor, dont on consultera le mémoire, c'est une variante de la méthode par éclairage oblique, quelque peu plus précise, suivant son auteur, que celle par éclairage axial. Tous les microscopes ne se prêtent pas également à son emploi.

d - Méthodes utilisant la dispersion

Diverses méthodes utilisent la dispersion différentielle des indices des liquides et des solides afin de les égaliser pour une certaine longueur d'onde, d'où :

- en lumière monochromatique, disparition de la frange de Becke ou des effets d'ombre et de lumière.
- en lumière blanche, apparition d'effets colorés caractéristiques.

Ces méthodes seront décrites plus loin.

2 - Erreurs d'orientation des particules

Pour les corps optiquement anisotropes, une mesure d'indice de réfraction n'a de signification que si on peut la rapporter à une direction connue. Le choix d'une particule d'orientation convenable se fait entre nicols croisés, en s'aidant des remarques précédentes, des caractères cristallographiques du corps étudié (faciès, clivages, etc.) et de la lumière convergente.

Même après recours à l'un des artifices indiqués plus haut, il peut arriver qu'on ne puisse obtenir rigoureusement l'orientation voulue, mais seulement une orientation approchée. Dans ces conditions, les indices mesurés diffèrent plus ou moins des indices cherchés. Autrement dit, une erreur d'orientation donnée entraîne, pour l'indice, une certaine erreur dont la grandeur dépend de la biréfringence de la section et, dans une faible mesure, de ses indices.

On peut parfois - ou on y est parfois contraint - se contenter de particules imparfaitement orientées, lorsque l'erreur qui résulte de leur emploi demeure entre les limites jugées acceptables.

Gillberg (1960) a calculé les erreurs angulaires maximales d'orientation acceptables, suivant que la précision désirée est $\pm 0,001$, $\pm 0,0005$ ou $\pm 0,0001$. Elle a représenté graphiquement ses résultats sur trois diagrammes dont les deux premiers, redessinés, apparaissent ici (fig. 20 et 21). Ces diagrammes présentent un double intérêt :

- 1 - Ils indiquent quantitativement l'écart maximal tolérable entre l'orientation idéale et l'orientation réelle, pour une erreur et une biréfringence données.
- 2 - Ils permettent d'apprécier l'erreur commise dans le cas d'une orientation défavorable connue (cas de certains fragments de clivage, par exemple).

Voici quelques exemples numériques :

Précision	Biréfringence	Erreur tolérable
0,001	0,010	18°
	0,035	10°
	0,100	6°
0,0005	0,010	13°
	0,035	7°
	0,100	4°
0,0001	0,001	20°
	0,010	6°
	0,035	3°
	0,100	2°

En résumé :

- pour une précision de $\pm 0,001$, l'erreur d'orientation est petite par rapport aux autres erreurs, sauf pour les minéraux fortement biréfringents tels que les carbonates rhomboédriques.
- pour une précision de $\pm 0,0005$, l'erreur d'orientation est petite pour les minéraux de biréfringence moyenne ou faible.
- pour une précision de $\pm 0,0001$, l'erreur n'est négligeable que pour les minéraux très faiblement biréfringents.

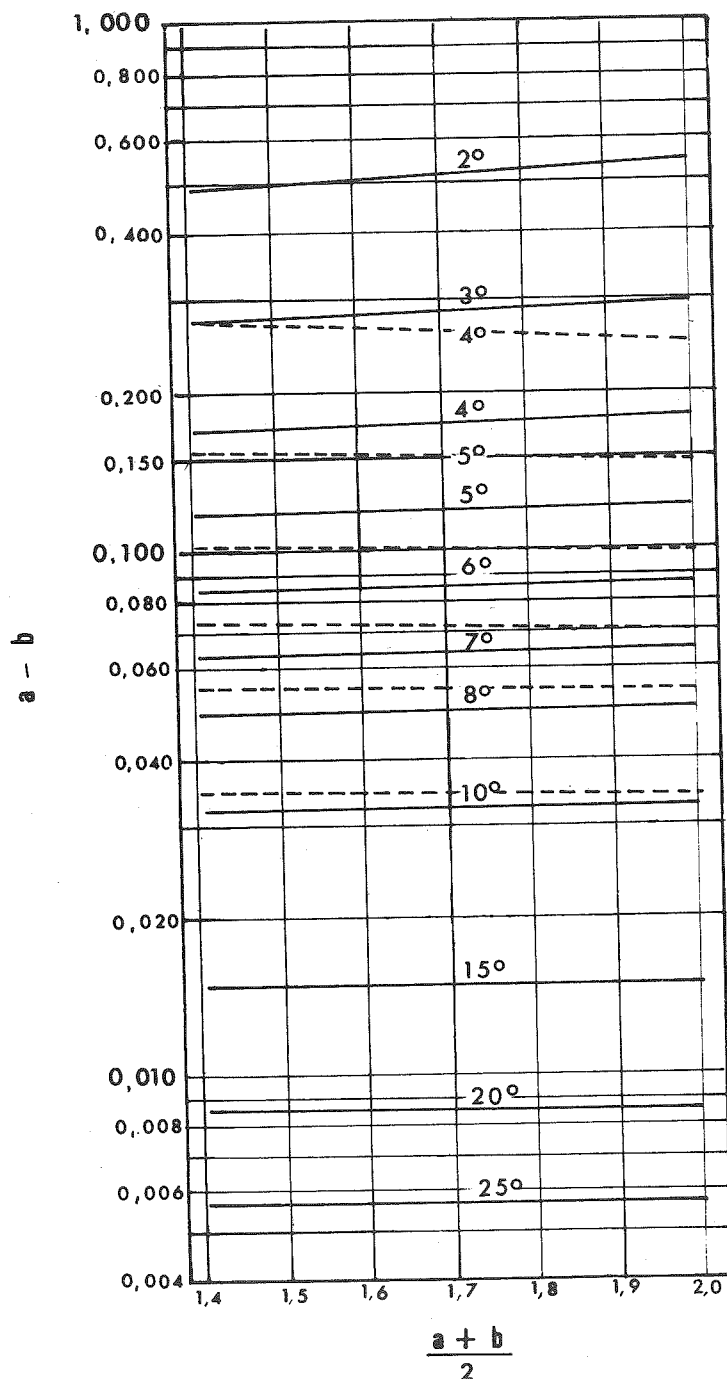


Fig. 20. - Erreur maximale d'orientation tolérable pour une approximation de 0,001 sur la mesure. (D'après Gillberg, 1960).

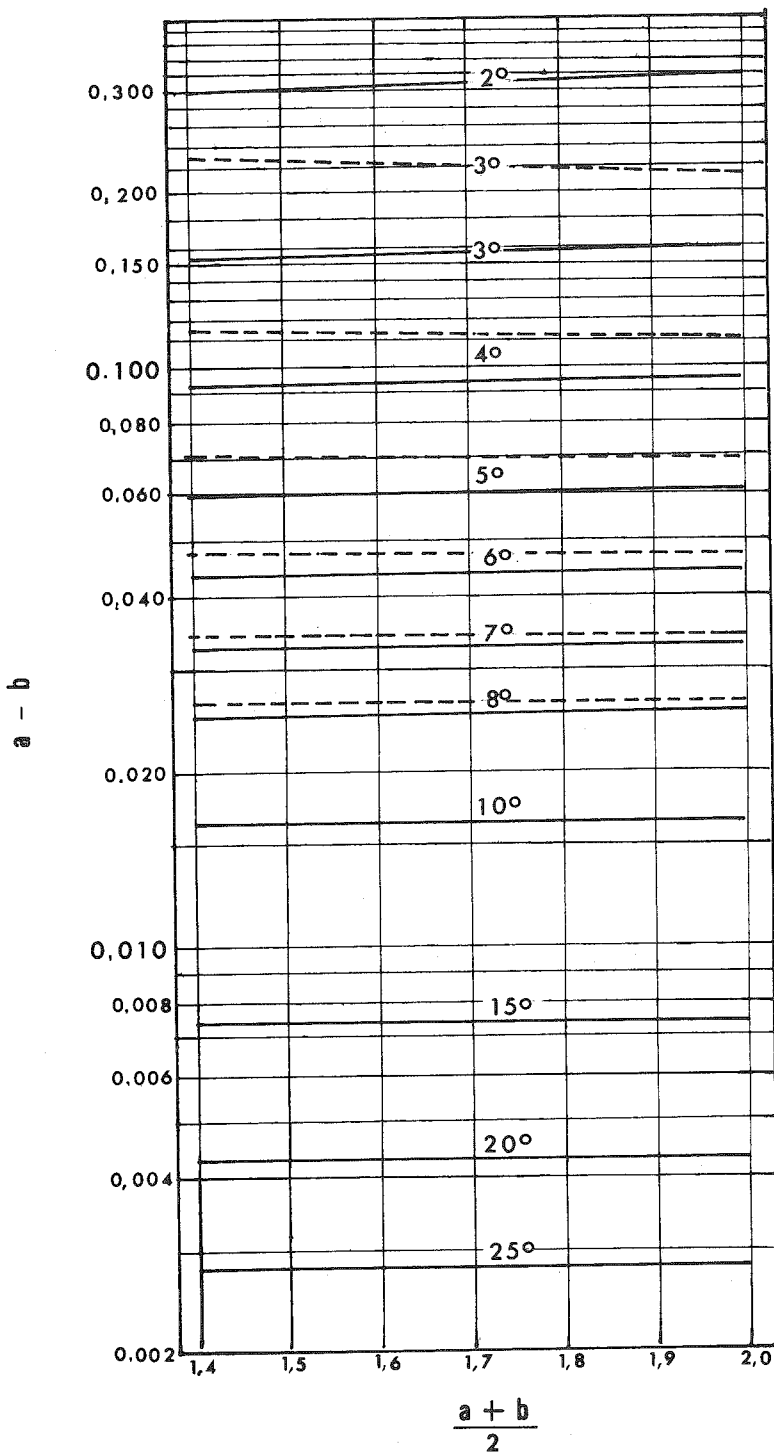


Fig. 21. - Erreur maximale d'orientation tolérable pour une approximation de 0,0005 sur la mesure. (D'après Gillberg, 1960).

Au lieu des indices principaux n_g et n_p , Gillberg utilise les indices de la section, appelés a et b (a et b étant les demi-axes de l'ellipse découpée dans l'ellipsoïde par le plan de la section), et prend pour variables les grandeurs $(a + b)/2$ et $(a - b)$ au lieu de $(n_g + n_p)/2$ et de $n_g - n_p$. Les fonctions, étant presque horizontales, sont pratiquement indépendantes de $(a + b)/2$ et on peut négliger la différence entre cette grandeur et $(n_g + n_p)/2$. D'autre part, comme on a toujours $n_g - n_p \geq a - b$, l'erreur tolérable réelle est supérieure ou égale à l'erreur tolérable lue.

Dans les graphiques, les traits pleins correspondent à n_g et les tirets à n_p .

B - DISPERSION

1 - Généralités. Graphique de Hartmann

On appelle dispersion d'un indice de réfraction sa variation en fonction de la longueur d'onde de la lumière utilisée : $n = f(\lambda)$. Pour les déterminations minéralogiques courantes, faites dans le spectre visible, on l'exprime généralement par la grandeur $n_F - n_C$, n_F étant l'indice de réfraction pour la raie F (486 nm) et n_C l'indice pour la raie C (656 nm).

Sauf cas de dispersion dite "anormale", l'expression ($n_F - n_C$) est positive, c'est à dire que, pour un corps donné, l'indice pour les courtes longueurs d'onde est supérieur à l'indice pour les grandes longueurs d'onde.

La fonction $n = f(\lambda)$ n'est pas linéaire. Elle peut l'être rendue par un choix convenable de l'échelle des longueurs d'onde, ce qui facilite le tracé des courbes de dispersion, ainsi transformées en droites, et permet de résoudre graphiquement de façon simple divers problèmes dans lesquels intervient la dispersion.

Dans le graphique de Hartmann (planche 4), dont l'emploi a été préconisé par Tsuboi (1930), les longueurs d'onde sont portées en abscisses, dont les graduations sont proportionnelles à l'expression :

$$\frac{1}{\lambda - \lambda_0}$$

dans laquelle, les longueurs d'onde étant exprimées en nanomètres,

$$\lambda_0 = 200 \text{ nm (1)}$$

Portées sur un tel graphique, les courbes de dispersion de nombreux corps sont sensiblement des droites, l'erreur qui en résulte étant le plus souvent négligeable. Voici un exemple de l'emploi du graphique.

Soit à connaître l'indice $n_{\lambda}^{t^{\circ}}$ d'un liquide, connaissant $n_D^{t^{\circ}}$ et $n_F - n_C$, également à t° :

- 1 - Porter une graduation appropriée sur l'axe des ordonnées.
- 2 - Si l'on a choisi pour les ordonnées 1 division = 0,001, repérer sur l'échelle des dispersions le segment de droite correspondant à $n_F - n_C$ et le joindre par une droite au point correspondant à $\lambda = 656 \text{ nm}$, situé sur l'axe des abscisses. La droite obtenue représente la dispersion du liquide.
- 3 - Par le point de coordonnées $\lambda = 589, n = n_D^{t^{\circ}}$, mener une parallèle à cette droite. On y parvient commodément en faisant glisser une équerre sur une autre.
- 4 - Sur l'axe des ordonnées, lire l'indice correspondant au point d'abscisse λ de la nouvelle droite.
- 5 - Pour obtenir la courbe de dispersion du même liquide à toute autre température t' , il suffit de déplacer la droite précédente parallèlement à elle-même, de telle sorte que la nouvelle droite passe par le point correspondant au nouvel indice $n_D^{t'}$.

La précision est généralement suffisante pour tout usage courant.

(1) - Lorsque l'axe portant les longueurs d'onde est gradué proportionnellement à $1/\lambda^2$, la relation entre indices et longueur d'onde est encore représentée sensiblement par une droite (Brown et McCrone, 1963).

2 - Dispersion des liquides

La dispersion est généralement d'autant plus grande que l'indice de réfraction est plus élevé. Pour les liquides d'usage courant, elle varie de 0,005 à 0,04 environ. Exemples :

	n_D	n_F	n_C	$n_F - n_C$
Phosphate de triéthyle (à 25°C)	1,405	1,4089 ⁽¹⁾	1,4033 ⁽¹⁾	0,00056
Diiodométhane (à 20°C)	1,7383	1,7647	1,7282	0,0365

Par suite, une mesure d'indice de réfraction n'a de signification précise que si elle est faite en lumière monochromatique. Une méthode dite "de simple variation" permet d'égaliser l'indice d'un liquide à l'indice à mesurer, par variation continue de la longueur d'onde de la lumière utilisée (voir p. 45).

3 - Dispersion des minéraux

Comme pour les liquides, le ou les indices des minéraux sont généralement d'autant plus élevés que la longueur d'onde de la lumière utilisée est plus courte. En général, la dispersion est d'autant plus forte que les indices sont plus élevés et, à indices comparables, plus faible pour les solides que pour les liquides (sauf pour de nombreux minéraux d'indices très élevés). La dispersion des minéraux varie entre de larges limites. Exemples :

	n_D	$n_F - n_C$
Villiaumite	1,328	0,00039
Sylvite	1,4904	0,0112
Sidérite	1,875 (n_o)	0,023 (environ)
Zincite	2,029 (n_o)	0,07 (environ)
Anatase	2,5612 (n_o)	0,1245 (calculée)
Ténorite	~ 2,84 (n_m)	0,55 (environ)

Bien que de nombreux minéraux aient une dispersion relativement peu élevée (2) et qu'il soit possible de la négliger dans de nombreuses déterminations courantes, il est regrettable que les traités donnent encore souvent les indices des minéraux, soit uniquement pour la raie D, soit même parfois sans aucune indication, et que les données quantitatives précises sur la dispersion des minéraux soient encore trop peu nombreuses dans la littérature. Quelques tentatives ont cependant été faites. Ainsi, Winchell et Meek (1947) ont montré que la dispersion de la biréfringence pouvait être utilisée comme critère de discrimination des carbonates rhomboédriques.

Pour de nombreux minéraux anisotropes d'indices et de biréfringence relativement peu élevés, les courbes de dispersion des indices principaux sont sensiblement parallèles. Par suite, connaissant, par exemple pour un minéral uniaxe, la courbe de dispersion de n_o et la valeur de n_e pour une raie quelconque du spectre visible, une courbe parallèle à celle de n_o et passant par le point correspondant à n_e représente, sans erreur appréciable, la cour-

(1) - Valeur déterminée sur graphique de Hartmann.

(2) - Pour les 2/3 environ des minéraux dont Winchell (1939) donne la dispersion, celle-ci est inférieure à 0,020.

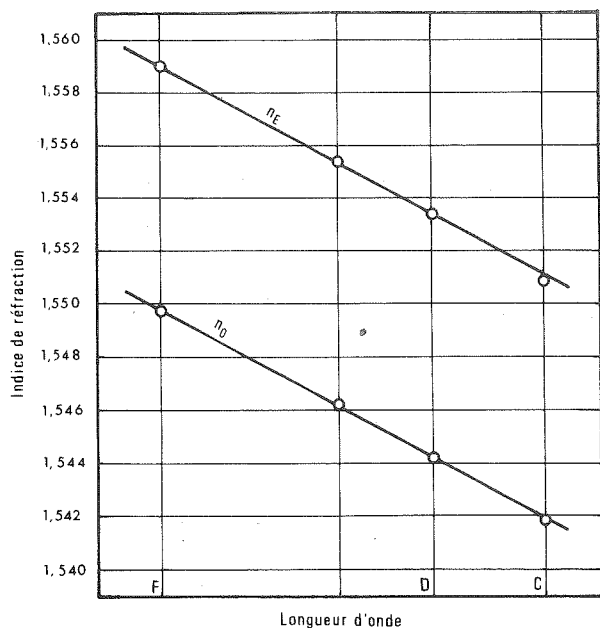


Fig. 22. - Dispersion des indices du quartz

be de dispersion de n . Exemple : quartz (Fig. 22).

Raie ou λ	n_o	n_e	$ n_e - n_o $
F	1,5497	1,5590	0,0093
546 nm	1,5462	1,5554	0,0092
D	1,5442	1,5534	0,0092
C	1,5419	1,5509	0,0090
$n_F - n_C$	0,0078	0,0081	0,0003

Il n'en est plus de même pour les biréfringences élevées. Exemple : calcite (Fig. 23).

	F	D	C
n_F	1,6678	1,6583	1,6544
n_C	1,6678	1,4864	1,4846
$n_F - n_C$	0,0134	0,0061	0,0073

arrive que le graphique de Hartmann ne suffise pas à anamorphoser en droites les courbes de dispersion des indices.

Enfin, dans des cas où indices et dispersion sont très élevés, il

C - TEMPERATURE

Dans les intervalles utilisés pour les déterminations optiques courantes, les variations de température affectent, au plus, la quatrième décimale des indices de réfraction des solides. Ces indices peuvent donc être considérés constants. Exemples pour la raie D :

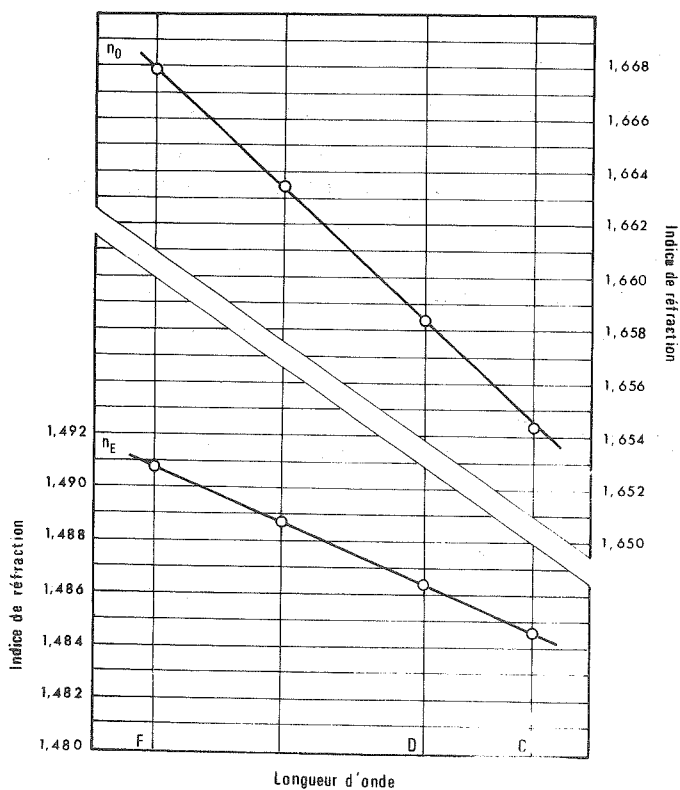


Fig. 23. - Dispersion des indices de la calcite

	n_o	n_e
Quartz (23°)	1,5537	1,5446
Quartz (115°)	1,5532	1,5441
Différence	-0,0005	-0,0005
Calcite (22°)	1,6585	1,4865
Calcite (89°)	1,6585	1,4873
Différence	0,0000	+0,0008
Rutile (25°)	2,6124	2,8993
Rutile (110°)	2,6087	2,8920
Différence	-0,0037	-0,0073

Les indices de réfraction des liquides sont beaucoup plus sensibles aux variations de température que ceux des minéraux. Pour une longueur d'onde donnée et dans les intervalles de températures usuels, la variation d'indice est sensiblement en raison inverse de la température. La valeur numérique de cette variation est généralement représentée, pour un changement de

température de 1°C, par l'expression :

$$-\frac{dn}{dt},$$

dans laquelle le signe (-) rappelle qu'à une élévation de température correspond une diminution de l'indice, et réciproquement. Pour de nombreux liquides, la valeur numérique de $-dn/dt$ est de l'ordre de 0,0004 à 0,0005. Pour le 1-chloronaphtalène, par exemple :

$$n_D^{20^\circ} = 1,6328 \text{ et } -dn/dt = 0,00042 \text{ (valeur moyenne entre } 15^\circ \text{ et } 30^\circ).$$

A 25°, ce corps a pour indice :

$$n_D^{25^\circ} = 1,6328 - (0,00042 \times 5) = 1,6328 - 0,0021 = 1,6307$$

et à 15° :

$$n_D^{15^\circ} = 1,6328 + (0,00042 \times 5) = 1,6328 + 0,0021 = 1,6349.$$

Pour de nombreux liquides, une variation de température de 2° entraîne une variation d'indice de près de 0,001. Ceci suffit à montrer la nécessité de tenir compte de ce facteur (voir p. 39).

D - AUTRES FACTEURS DEPENDANT DES LIQUIDES D'IMMERSION

1 - Stabilité

Les liquides du commerce, comme ceux qui constituent les séries décrites plus loin, ont pour la plupart une excellente stabilité. Celle-ci tend à décroître pour les indices élevés, notamment lorsque les liquides renferment des solides en solution; la stabilité diminue aussi aux températures notablement supérieures à la température ambiante. Dans tous les cas, une vérification périodique est désirable.

2 - Calibration

Les indices des liquides du commerce sont généralement garantis exacts à $\pm 0,0002$ près (1), ce qui correspond à ce qu'on peut attendre d'un bon réfractomètre Abbe. L'opérateur qui prépare lui-même ses mélanges peut obtenir des résultats analogues s'il dispose d'un réfractomètre équipé d'un contrôle de la température et d'une source lumineuse monochromatique. La méthode du minimum de déviation permet des mesures plus précises. Il existe des liquides et des solides-étalons qui permettent de vérifier l'exactitude du réfractomètre.

E - AUTRES FACTEURS DEPENDANT DU CORPS ETUDIE

1 - Forme

Quand on opère sur des minéraux pulvérisés, la forme des particules est fonction de la présence ou de l'absence de clivages ou de plans de séparation, facteurs sur lesquels on ne possède aucun contrôle. Il arrive parfois (notamment avec les particules relativement volumineuses et présentant des

(1) - Ou parfois, suivant la composition, à $\pm 0,0005$ ou même $\pm 0,001$.

surfaces diversement inclinées sur le plan de la lame) qu'il apparaisse une "fausse frange de Becke" dont la présence est gênante, puisqu'en déplaçant le tube on observe deux lisérés lumineux se déplaçant en sens inverse (1). On recommande souvent d'abaisser le condensateur et de fermer le diaphragme pour éliminer ou atténuer cette "fausse frange". Il est préférable, toutes les fois qu'on le peut, de choisir, pour observer la frange de Becke, les particules ou les régions d'une particule qui ne présentent pas cet effet parasite. On peut aussi utiliser l'éclairage oblique. Afin d'éliminer l'effet des phénomènes lumineux parasites ou accidentels, Saylor observe les deux bords opposés de chaque grain et prend seules en considération les paires de résultats qui indiquent la même relation entre l'indice de la particule et celui du liquide.

2 - Hétérogénéité

Dans un même cristal zoné, les propriétés optiques varient parfois de façon très considérable d'un point à un autre. Dans certains cas, ou en usant de techniques particulières, on peut déterminer séparément par immersion certaines constantes optiques des diverses parties d'un cristal zoné (Hurlbut et Wenden, 1951; Wright, 1965).

D'autre part, des particules minérales en apparence homogènes, et tirées d'un même échantillon, peuvent présenter des variations non négligeables. Depuis longtemps déjà, Duparc et Pearce (1903) ont montré la variabilité des "constantes" optiques de divers minéraux ferromagnésiens provenant d'une même roche. C'est également le cas pour des plagioclases étudiés par Hess (1960), dans lesquels cet auteur a trouvé des variations de 2 à 4 % dans la teneur en anorthite; il signale des fluctuations comparables de la valeur, déterminée optiquement, du rapport Fe : Mg dans certains pyroxènes. Plus récemment, Hagner et al. (1965) ont constaté des variations appréciables dans les indices de biotites, de hornblendes et de pyroxènes orthorhombiques provenant d'un même échantillon d'amphibolite à pyroxène (de 1,600 à 1,620 pour l'indice n_m de la biotite, de 1,650 à 1,665 pour l'indice n_g' de fragments de clivage 110 de hornblende, et de 1,698 à 1,708 pour l'indice n_g de l'orthopyroxène).

Il faut alors mesurer un nombre de grains suffisant pour obtenir une moyenne acceptable. On peut d'abord déterminer les limites entre lesquelles varie l'indice cherché, puis faire quelques préparations avec une gamme de liquides couvrant cet intervalle, déterminer séparément dans chacune le nombre de particules pour lesquelles :

$$\begin{aligned} n &< \text{liquide} \\ n &\sim \text{liquide} \\ n &> \text{liquide} \end{aligned}$$

et représenter graphiquement les résultats.

(1) - Ceci se produit également, mais pour une tout autre raison, lorsque les directions de vibration de la particule examinée ne sont pas situées dans les plans de vibration des nicols, c'est à dire lorsque la particule n'est pas éteinte entre nicols croisés, et que ses deux indices sont situés de part et d'autre de celui du liquide d'immersion. Il est facile de le vérifier en examinant un fragment de clivage de calcite ($n_o = 1,658$, $n_e' = 1,566$), plongé dans un liquide d'indice $n_D = 1,60$ ou $1,61$.

3 - Biréfringence

On a vu plus haut les erreurs que peut entraîner, dans les mesures d'indices, l'orientation incorrecte d'une particule biréfringente.

A la suite d'une série d'observations portant sur du cyanure mercurique - quadratique, uniaxe négatif, $(n_o - n_e) = 0,1563$ -, Saylor conclut que, pour une orientation correcte des cristaux, l'erreur due à la biréfringence tient à la grandeur de cette dernière, au mode d'éclairage employé et à l'ouverture numérique de l'objectif. Avec l'éclairage axial ou la méthode du double diaphragme, l'erreur ne cesse d'être négligeable qu'avec les grandes ouvertures numériques employées avec des cristaux fortement biréfringents. Avec l'éclairage oblique, l'erreur est plus considérable et l'exactitude devient presque illusoire avec les ouvertures numériques et les biréfringences très fortes.

4 - Absorption

L'influence de l'absorption et celle de la couleur ne paraissent pas avoir fait l'objet d'études quantitatives systématiques. La sensibilité est moindre lorsque l'absorption est considérable. Le cas idéal est celui d'un corps transparent et incolore.

CHAPITRE III

DETERMINATION DES INDICES DES LIQUIDES

Les déterminations étant faites par comparaison, les indices des liquides d'immersion doivent être connus avec exactitude au moment même où est effectuée l'observation. Les constantes qui permettent de calculer l'indice d'un liquide pour une longueur d'onde et une température données sont généralement connues. Dans le cas contraire, il est facile de les déterminer si on dispose d'un réfractomètre avec prismes d'Amici et réglage thermostatique.

En pratique, la façon de procéder dépend de l'exactitude désirée et de l'équipement disponible. En ce qui concerne la dispersion, le graphique de Hartmann (voir p. 33) permet de déterminer aisément la correction, connaissant la dispersion du liquide et la longueur d'onde de la lumière utilisée. En ce qui concerne la température, on peut :

- soit déterminer la température t_1 du liquide au moment de l'observation et, connaissant son coefficient de température et son indice à la température t_0 , faire la correction appropriée.
- soit faire en sorte de pouvoir mesurer à tout moment l'indice du liquide, ce qui supprime la nécessité d'une correction.

A - DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DU LIQUIDE

Si l'on peut maintenir la préparation à une température connue, mais que cette dernière diffère de celle à laquelle le liquide a été étalonné, il suffit de faire la correction voulue. Ainsi, dans son montage, qui comprend un réfractomètre, Smith (1960) évite les différences de température en maintenant l'ensemble à température ambiante au moyen d'une circulation d'eau.

Par extension, on voit que, si l'on dispose d'un moyen d'amener la préparation à une température déterminée, il est possible d'égaliser l'indice d'un liquide convenablement choisi à l'indice à mesurer et, par suite, d'en déduire ce dernier (Gaubert, 1922); c'est là une autre des méthodes par "simple variation" que nous verrons plus loin.

A défaut d'un dispositif de contrôle, il faut soustraire autant que possible la préparation aux variations irrégulières de température et déterminer cette dernière aussi exactement que possible, juste au moment où l'on fait l'observation. En effet, dans ces conditions, les indices des liquides sont affectés par la température ambiante (si elle diffère de la température d'étalonnage), par la chaleur que dégage la source lumineuse, et même par la proximité de l'observateur. Dans un cas précis, Micheelsen (1957) trouve que ces deux derniers facteurs entraînent une élévation de 3° à 4°C, et que l'indice du 1-bromonaphtalène (1,6573 à 20°, 5) ne se stabilise (autour de 1,655) qu'après une quarantaine de minutes.

Traitant de mesures d'indices de plagioclases et d'orthopyroxènes, Hess (1960) indique, sans plus de détails, que l'erreur provenant de la chaleur dégagée par la source lumineuse peut être de $\pm 0,015$, et qu'il est possible de l'

éliminer en majeure partie en intercalant un filtre anticalorifique sur le trajet des rayons lumineux. Avec un système de contrôle, il évalue à $\pm 0,0002$ l'erreur provenant de l'incertitude quant à la température exacte.

Saylor (1935) détermine la température de la préparation au moyen d'un thermocouple, construit et disposé de telle sorte que la soudure, placée entre lame et lamelle, ne les sépare que de 0,1 mm et soit située juste à la limite du champ d'un objectif grossissant 45 fois. Morse (1968) la détermine à $0,1^\circ$ près au moyen d'un petit thermomètre dont le réservoir est situé à 6-8 mm au-dessus de la platine. Il ne trouve aucune différence appréciable entre les températures ainsi lues et celles qu'indique un thermocouple dont la soudure repose sur le couvre-objet.

Plusieurs séries d'observations ont été effectuées avec le montage de Morse, un filtre anticalorifique étant placé sur le trajet des rayons, et dans les conditions défavorables d'un local à chauffage intermittent par air pulsé. Il a été constaté que la température qu'indique le thermomètre suit, avec un retard quasi-négligeable, le début des cycles de chauffage; elle s'élève rapidement avec celle du local; à la fin d'un cycle, elle diminue de plus en plus lentement, jusqu'au début du cycle suivant. A ces variations se superpose une élévation progressive de la température, bien visible au cours des observations de longue durée et due, au moins en grande partie, à l'échauffement général du microscope par sa source lumineuse incorporée. Cette élévation, dans l'ensemble assez régulière, peut atteindre de 4° à 5° après plusieurs heures de travail continu.

Les conditions optimales de travail (local à température quasi-constante, contrôle précis de la température, etc.) ne sont pas toujours réalisables. On peut néanmoins obtenir des résultats très satisfaisants si l'on s'attache à bien connaître les causes de variation de la température et à en minimiser les effets. Il faut notamment se placer à l'abri des courants d'air et utiliser un filtre anticalorifique efficace. Il serait également désirable que la source lumineuse soit séparée du microscope. Il semble indiqué de laisser la lampe allumée pendant un certain temps avant d'entreprendre une série d'observations. Dans un local à chauffage intermittent, il convient d'opérer de préférence pendant les périodes qui précèdent le début d'un cycle, la température étant alors raisonnablement stable pendant assez longtemps. Bien qu'elle n'offre pas a priori les mêmes garanties d'exactitude que celle de Saylor, la méthode de Morse pour la détermination des températures est plus simple, et paraît satisfaisante en pratique. Il est très souhaitable de disposer d'un réfractomètre qui permette de contrôler périodiquement les indices des liquides. Enfin, il est recommandé aux observateurs d'expérimenter systématiquement, afin de déterminer par eux-mêmes les précautions et le mode opératoire les mieux adaptés à leur travail.

B - MESURE DE L'INDICE DU LIQUIDE AU MOMENT DE L'OBSERVATION

Si on peut mesurer l'indice du liquide au moment même où on effectue l'observation, la connaissance de sa température devient inutile. Bien entendu, la mesure doit porter directement sur le liquide de la préparation ou, à défaut, sur le même liquide, porté exactement à la même température. Cette mesure peut être faite de diverses façons.

En intercalant un réfractomètre sur le circuit d'eau thermostatée qui permet de faire varier la température de la préparation, la simple variation (p. 45) ou la double variation (p. 47) permettent de connaître à tout moment l'indice du liquide. On peut aussi employer un réfractomètre pour microscope, ou recourir à la méthode de l'étalon interne (p. 48).

Les méthodes qui précèdent nécessitent un équipement qui n'est pas toujours disponible. Dans ce cas, il peut être avantageux de réaliser ce qu'on pourrait appeler un réfractomètre à cristal. Pour le construire, il suffit de disposer d'une platine à aiguille munie d'un tambour gradué en degrés (ou, mieux, avec vernier) et d'un cristal limpide, fortement biréfringent et d'indices connus. Le cristal, de quelques dixièmes de millimètre, est fixé à l'extrémité de l'aiguille, dans une orientation telle que l'axe de celle-ci soit normal à son axe optique (si le cristal est uniaxe) ou au plan de ses axes optiques (s'il est biaxe). Si l'on oriente ensuite la platine de telle sorte que l'axe de l'aiguille soit normal au plan de vibration du polariseur, une rotation convenable du tambour permet d'égaliser un indice du cristal à celui du liquide, tant que ce dernier est compris entre les indices extrêmes du cristal. Connaissant l'angle de rotation nécessaire, l'équation de l'ellipse permet de calculer l'indice correspondant. On peut aussi construire une fois pour toutes une courbe de calibration ou utiliser un des abaques dont il a été question plus haut. On détermine le zéro de la graduation à l'aide de la lumière convergente et, éventuellement, d'un liquide étalon.

Le seul cristal employé systématiquement jusqu'ici a été la calcite, qu'il est facile d'obtenir en cristaux bien limpides, et dont les indices et la dispersion sont connus avec beaucoup d'exactitude. Voici les indices n_e' de la calcite, calculés de 5° en 5° pour les raies C, D et F, d'après les mesures de Hastings (in Palache et al., 1951). Avec ces valeurs et le graphique de Hartmann, il est facile de construire un abaque donnant n_e' pour toute inclinaison du cristal et pour toute longueur d'onde.

	C	D	F
0°	1,6544	1,6584	1,6678
5°	1,6529	1,6568	1,6662
10°	1,6484	1,6523	1,6615
15°	1,6411	1,6449	1,6539
20°	1,6315	1,6351	1,6438
25°	1,6198	1,6232	1,6316
30°	1,6065	1,6098	1,6177
35°	1,5922	1,5954	1,6028
40°	1,5774	1,5804	1,5873
45°	1,5626	1,5653	1,5719
50°	1,5482	1,5507	1,5568
55°	1,5345	1,5369	1,5426
60°	1,5221	1,5243	1,5297
65°	1,5111	1,5132	1,5183
70°	1,5018	1,5038	1,5086
75°	1,4943	1,4963	1,5009
80°	1,4889	1,4908	1,4953
85°	1,4857	1,4875	1,4919
90°	1,4846	1,4864	1,4907

La calcite permet de couvrir l'intervalle compris entre les valeurs extrêmes ci-dessus. Elle n'est pas affectée par les liquides organiques correspondants. Les autres carbonates communs permettraient de couvrir d'autres intervalles. Le réfractomètre à cristal serait particulièrement utile avec les liquides d'indices élevés, mais le choix de cristaux convenables n'est pas encore résolu de façon totalement satisfaisante. La cérusite, qui conviendrait très bien ($n_p = 1,80$, $n_g = 2,07$), est malheureusement attaquée par les liquides renfermant du tribromure d'arsenic. Certains cristaux artificiels, dont plusieurs organiques, ont donné des résultats encourageants. Il serait peut-être possible de protéger les cristaux employés par une très mince pellicule inerte, dont la présence n'affecterait pas les phénomènes optiques qui permettent de conclure à l'égalité des indices.

Les indices des solides pouvant être considérés constants dans les intervalles de température couramment utilisés (voir p. 35), le réfractomètre à cristal apporte une solution simple et élégante au problème de la mesure de l'indice d'un liquide dans la préparation elle-même et au moment même où on effectue l'observation. Bien entendu, sa sensibilité est celle du critère qu'on utilise pour la comparaison des indices.

CHAPITRE IV

DETERMINATION DES INDICES DES CRISTAUX

Le corps à étudier est plongé dans un liquide d'indice connu. On sélectionne une particule d'orientation convenable pour la détermination du ou des indices cherchés et on compare à l'indice du liquide par l'un ou l'autre des procédés que l'on a vus. La détermination peut se faire soit par encadrement, soit par égalisation.

A - ENCADREMENT

C'est le procédé le plus simple, mais le moins précis. Il consiste à déterminer l'indice n cherché en le comparant à ceux d'une série de liquides jusqu'à ce qu'on en trouve deux, d'indices n_1 et n_2 tels que :

$$n_1 < n < n_2,$$

la différence $n_2 - n_1$ étant une mesure de l'approximation du résultat.

Pour obtenir des résultats acceptables, il faut :

- 1 - Disposer d'une gamme de liquides à intervalles rapprochés (par exemple, espacés de 0,005 en 0,005 ou, mieux, de 0,002 en 0,002) et bien calibrés.
- 2 - Connaître, au moins de façon approximative, la température de la préparation au moment de l'observation, et corriger comme on l'a vu les indices trouvés.
- 3 - Si possible, opérer en lumière monochromatique, en intercalant un filtre jaune sur le trajet des rayons. Pour les dispersions relativement faibles, l'erreur commise en assimilant la lumière blanche à celle du sodium est de l'ordre de + 0,001 à + 0,002.

En lumière blanche, l'apparition d'effets colorés dus à la dispersion différentielle du liquide et du solide indique que les indices de ces deux corps sont égaux pour une longueur d'onde du visible. Ceci signifie généralement que la différence entre les deux indices est faible et, pour les minéraux peu dispersifs, peut être considéré approximativement comme un critère d'égalité.

Avec un peu d'habitude, on peut améliorer les résultats en observant l'intensité de la frange de Becke. Supposons qu'on ait trouvé :

$$1,580 < n < 1,590.$$

Si la frange de Becke est bien visible dans le premier liquide et nettement moins intense dans le second, l'inégalité ci-dessus peut s'écrire :

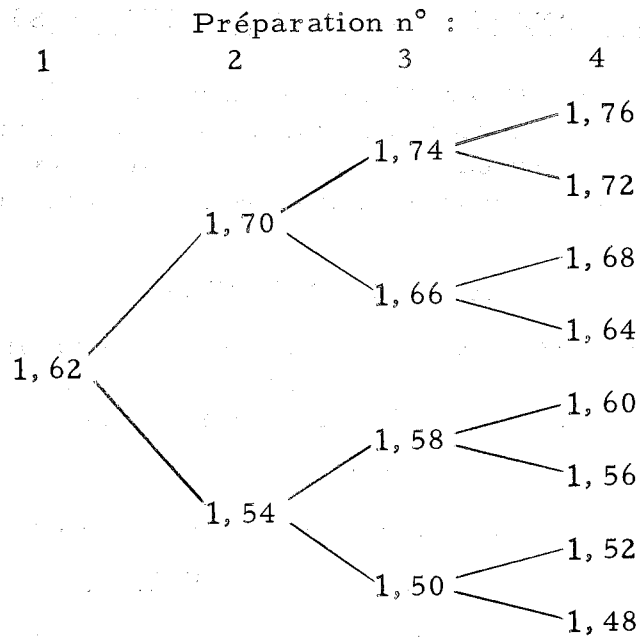
$$1,580 \ll n < 1,590,$$

d'où

$$n \approx 1,587-1,588.$$

La méthode par encadrement convient lorsqu'une précision relativement médiocre suffit. C'est à elle qu'on recourt pour obtenir une valeur approchée de l'indice cherché, avant d'entreprendre sa mesure par les méthodes plus

précises. Si l'on n'a à l'avance aucune idée de l'ordre de grandeur de l'indice, on peut l'obtenir rapidement en examinant une série de préparations selon un schéma tel que le suivant :



Ce schéma est facile à modifier suivant les besoins. Tel quel, il permet, pour un grand nombre de minéraux, de localiser en quatre opérations l'indice cherché dans un intervalle de deux unités de la seconde décimale. Cette méthode est particulièrement avantageuse lorsqu'on utilise des tables de détermination dans lesquelles les minéraux sont classés par ordre de réfringence croissante.

B - EGALISATION

Ces méthodes découlent de ce qu'on a vu plus haut sur la dispersion et sur les coefficients de température des liquides et des solides.

On admet qu'on dispose d'une gamme de liquides dont la dispersion et le coefficient de température sont connus. On a préalablement déterminé, en procédant comme ci-dessus, l'intervalle dans lequel est situé l'indice à mesurer. Le solide étant plongé dans un liquide d'indice voisin, on peut amener les deux indices à égalité :

- 1 - En modifiant la température de la préparation, ce qui fait varier l'indice du liquide sans affecter sensiblement celui du solide. C'est la méthode par simple variation de Gaubert (1922).
- 2 - En faisant varier la longueur d'onde de la lumière, jusqu'à ce qu'on en trouve une pour laquelle les deux indices sont égaux. C'est la méthode par simple variation de Merwin et Larsen (1912) (voir aussi Posnjak et Merwin, 1922). A noter qu'on obtient ici, pour l'indice du solide, une valeur $n_{\lambda} \neq n_D$, sauf si l'égalité des indices a lieu pour $\lambda = 589 \text{ nm}$.

Souvent, dans la pratique, ces deux méthodes générales sont diversement combinées. On peut songer à améliorer la première en opérant en lumière monochromatique de longueur d'onde variable (par degrés ou de façon

continue). Pour que la seconde donne des résultats satisfaisants, il faut connaître l'indice du liquide au moment de l'observation; on le déduit en général de sa température, qui doit donc être connue; on peut ensuite songer à la stabiliser ou, mieux, à la rendre variable à volonté. Les combinaisons publiées sont nombreuses. Nous en décrirons quelques unes, pour montrer les solutions adoptées par divers auteurs.

1 - Variation de la température

En lumière monochromatique (filtre jaune ou lampe au sodium), cette méthode, assez longue, donne des résultats très exacts. Les particules à étudier sont recouvertes d'un liquide dont l'indice n_D , à température ambiante, est quelque peu supérieur à l'indice à mesurer. La préparation étant placée sur une platine chauffante et la particule correctement orientée, on élève la température (1) jusqu'à ce que le critère choisi (par exemple, la disparition de la frange de Becke) indique l'égalité des indices. Soit t_1 la température correspondante. Connaissant l'indice n_D du liquide à la température t_0 et son coefficient de variation $- dn/dt$, l'indice n cherché est :

$$n = n_D - (t_1 - t_0) \frac{dn}{dt}$$

Lorsque les variations de température sont obtenues par circulation d'eau thermostatée, on peut intercaler dans le circuit un réfractomètre, qui permet de lire à tout moment l'indice du liquide et rend inutile la connaissance de sa température.

Saylor (1935) décrit en détail les précautions à prendre pour obtenir les meilleurs résultats possibles. Il élève graduellement la température jusqu'à ce que la différence entre l'indice du liquide et celle du solide ($n_{\text{liquide}} > n_{\text{solide}}$) soit à peine perceptible, et note l'indice correspondant. Il fait de même dans les conditions inverses ($n_{\text{liquide}} < n_{\text{solide}}$). Le même processus est répété plusieurs fois et les résultats présentés sous la forme qu'illustre le Tableau 1.

Au lieu d'une circulation d'eau, on peut utiliser des surplatinés ou des platines à chauffage électrique, dont on trouve plusieurs modèles dans le commerce. Une des plus satisfaisantes est fabriquée par Leitz, mais elle présente l'inconvénient de n'être pas adaptable à tous les modèles de ce constructeur. On peut espérer que l'emploi de "modules" thermoélectriques utilisant l'effet Peltier permettra de résoudre de façon simple et efficace le problème de la variation contrôlée de la température.

2 - Variation de la longueur d'onde

On sait que la dispersion des liquides d'immersion est généralement supérieure à celle des solides d'indices comparables. Par suite, si une particule convenablement orientée est plongée dans un liquide de dispersion connue et dont l'indice n_D diffère peu de l'indice à mesurer, on peut amener les deux indices à égalité en faisant varier la longueur d'onde de la lumière utilisée. On détermine ainsi pour le solide un indice n_λ . Deux cas peuvent se présenter :

(1) - Ce changement doit se faire par étapes, pour donner à la température du système le temps de se stabiliser, surtout si on intercale un réfractomètre, dont la capacité calorifique est considérable.

TABLEAU 1
 INDICE DE REFRACTION DU CHLORURE DE POTASSIUM
 (D'après Saylor, simplifié)

Objectif	Indice de réfraction	Eclairage axial
3,2 x O.N. 0,11	1,491	+ + + + +
	1,490	- - - - -
	1,489	
45 x O.N. 0,85	1,492	
	1,491	+ + + + +
	1,490	
	1,489	- - - - -

Diamètre approximatif du cristal : 0,065 mm

Température moyenne : 38°,88

D'après International Critical Tables : $n_{578}^{38°,88} = 1,49034$

- 1 - La valeur numérique de la dispersion du solide est connue. Dans ce cas, après avoir tracé sur graphique de Hartmann la droite qui représente la dispersion du liquide, il suffit de faire passer, par le point de cette droite ayant pour abscisse λ_1 (longueur d'onde d'égalité) et pour ordonnée $n\lambda_1$, une droite de pente définie par la dispersion du cristal. Cette droite est la courbe de dispersion de l'indice mesuré : elle donne celui-ci pour n'importe quelle longueur d'onde. Tsuboi (1930) en a fait une excellente application à la détermination des plagioclases (chapitre VII).
- 2 - On ne connaît pas la dispersion du solide. Dans ce cas, une seconde mesure, faite avec un liquide d'indice et, éventuellement, de dispersion différents, donnera un second point, de coordonnées λ_2 et $n\lambda_2$. La droite qui passe par ce point et par le point $\lambda_1, n\lambda_1$, est la courbe de dispersion de l'indice mesuré.

Cette méthode présente l'avantage de donner la courbe de dispersion de l'indice. Son principal inconvénient tient à ce qu'elle nécessite une connaissance exacte de l'indice du liquide au moment précis où il est égal à l'indice

cherché, alors que les indices des liquides sont très sensibles aux variations de température. Outre les moyens vus plus haut, deux méthodes permettent d'éviter les inconvénients dus à une connaissance imprécise de la température. Ce sont la méthode par double variation et la méthode de l'étalon interne.

3 - Double variation

Conçue par Emmons (1928, 1929 a), la méthode découle directement de ce qui précède. Elle utilise un montage permettant de faire varier de façon continue et connue la température de la préparation (par circulation d'eau thermostatée) et la longueur d'onde de la lumière (au moyen d'un monochromateur). La particule examinée se trouve dans un liquide d'indice voisin, dont on connaît la dispersion et le coefficient de température (1). On étend ainsi l'intervalle dans lequel peut varier l'indice du liquide (voir p. 61).

Pour effectuer une détermination, l'ensemble est stabilisé à une température convenable t_1 . On fait ensuite varier la longueur d'onde jusqu'à ce que le critère choisi indique l'égalité de l'indice du liquide à l'indice à mesurer. Soit λ_1 la longueur d'onde d'égalité. On recommence à une température t_2 , d'où une nouvelle longueur d'égalité λ_2 . Les points M_1 (coordonnées $\lambda_1, n \lambda_1$) et M_2 (coordonnées $\lambda_2, n \lambda_2$), sont chacun situé respectivement sur une courbe de dispersion du liquide à la température correspondante. De plus, tous deux sont situés sur la courbe de dispersion de l'indice cherché, qu'il suffit de tracer en les joignant par une droite (2).

Correctement appliquée, la méthode peut donner des résultats très exacts. Emmons (1943) a proposé de l'adapter à la platine universelle de Fédoroff. La solution est tentante. D'une part, la platine universelle permet d'imprimer à une ou à plusieurs particules une série d'orientations privilégiées. D'autre part, la double variation permet de déterminer, directement ou par extrapolation, souvent avec un seul liquide, les constantes optiques correspondantes. Ces dernières comprennent non seulement les indices principaux (ou tous indices intermédiaires), la biréfringence maximale, les biréfringences partielles, l'angle des axes, mais aussi leur dispersion dans le visible. En fait, diverses difficultés pratiques en limitent l'emploi. Ainsi, les tuyaux d'arrivée et de retour de l'eau gênent parfois les rotations de la platine. Le fait d'intercaler un réfractomètre augmente la capacité calorifique de l'ensemble et, après chaque changement, la température ne se stabilise qu'avec lenteur. Enfin et surtout, au cours des diverses rotations, il arrive souvent que la particule étudiée se déplace accidentellement ou même quitte le champ. L'usage conjoint de la méthode par double variation et de la platine universelle n'est donc pas de pratique courante. Il demeure que, même sans cette dernière, la double variation étend les possibilités de la méthode par immersion

(1) - Il n'est pas nécessaire de connaître ces constantes si on intercale dans le circuit d'eau un réfractomètre, qui permet de lire à tout moment l'indice du liquide d'immersion. Les réfractomètres étant calibrés pour la raie D, les nombres lus doivent être corrigés pour les autres longueurs d'onde, suivant les indications fournies par le constructeur.

(2) - Si on utilise le graphique de Hartmann. En pratique, il est bon d'en déterminer expérimentalement quelques points. C'est d'ailleurs une nécessité lorsque l'échelle des longueurs d'onde portée sur le graphique est linéaire.

et permet souvent la détermination commode, précise et relativement rapide de plusieurs constantes optiques.

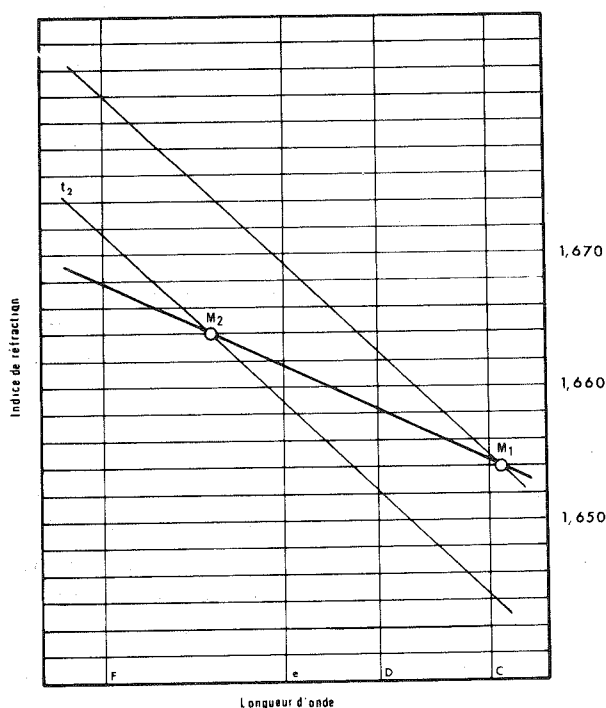


Fig. 24. - Détermination de l'indice n_D de la calcite par double variation.

Exemple

Soit à déterminer la courbe de dispersion de l'indice n_D de la calcite (Fig. 24). n_D étant voisin de 1,66 dans le visible, on choisit le bromo-iodo-benzène, pour lequel :

$$n_D^{25^\circ} = 1,660$$

$$n_F - n_C = 0,027$$

$$- dn/dt = 0,00052,$$

d'où : $n_D^{20^\circ} = 1,6626$ et $n_D^{40^\circ} = 1,6522$.

Par chacun des deux points d'abscisse 589 nm et d'ordonnées 1,6626 et 1,6522, on fait passer une droite de pente 0,027. (Si la pente n'est pas connue, on peut la déterminer en introduisant deux verres différents dans la préparation). Si l'égalité des indices est réalisée à 664 nm (à 20°) et à 518 nm (à 40°), la droite $M_1 M_2$ donne, pour l'indice n_D de la calcite :

n_F	n_D	n_C	$n_F - n_C$
1,6678	1,6583	1,6544	0,0134

Il s'agit ici d'un exemple théorique, établi à partir des données numériques publiées.

Le montage d'Emmons pourrait être simplifié par l'emploi d'un module thermoélectrique et d'un filtre interférentiel continu. Fisher

(1962) adapte la double variation à la platine à aiguille de façon intéressante.

4 - Méthode de l'étalon interne

Il paraît approprié d'appeler ainsi la méthode dite "au verre", proposée initialement par Suéno (1933) et décrite en détail par Micheelsen (1957). Elle présente l'avantage d'éliminer la nécessité de contrôler, et même de connaître la température.

En principe, la méthode consiste à introduire dans la préparation, près des particules étudiées, des particules de verres d'optique convenablement choisis, et dont les constantes optiques sont connues avec une grande précision (1). La dispersion du liquide est elle aussi supposée connue.

(1) - Exemple (simplifié d'après Micheelsen) :

$n_D = 1,6910$	$n_F - n_C = 0,01260$
Dispersion partielles	Raies (Å)
b - C 0,00218	b 7065,2
C - d 0,00383	C 6562,8
d - e 0,00300	d 5875,6
e - F 0,00577	e 5460,7
F - g 0,00688	F 4861,3
g - h 0,00570	g 4358,3
	h 4046,6

n_D exact à $\pm 0,0001$, dispersions partielles à environ $\pm 0,00003$.

On trace sur graphique de Hartmann la courbe de dispersion du verre utilisé (Fig. 25). Par variation de la longueur d'onde, on égale l'indice du verre à celui du liquide, ce qui donne ce dernier à la température de l'expérience, qu'il n'est donc pas nécessaire de connaître. Soit λ_V la longueur d'onde d'égalité. Par le point V_1 (coordonnées λ_V, n_{λ_V}), on fait passer la droite représentant la dispersion du liquide (si sa pente n'est pas connue, on peut la déterminer en introduisant deux verres différents dans la préparation). Un nouveau changement de longueur d'onde amène à égalité l'indice du liquide et l'indice à mesurer, d'où le point M_1 (coordonnées n_{λ_m}, λ_m), situé sur la courbe de dispersion du liquide et appartenant à celle de l'indice cherché. Si la dispersion $n_F - n_C$ de ce dernier est connue, la droite ayant cette pente et passant par M_1 est la courbe désirée. Si la dispersion du corps n'est pas connue, on détermine de même une seconde paire de points V_2 et M_2 en changeant de liquide et, éventuellement, de verre (Fig. 26).

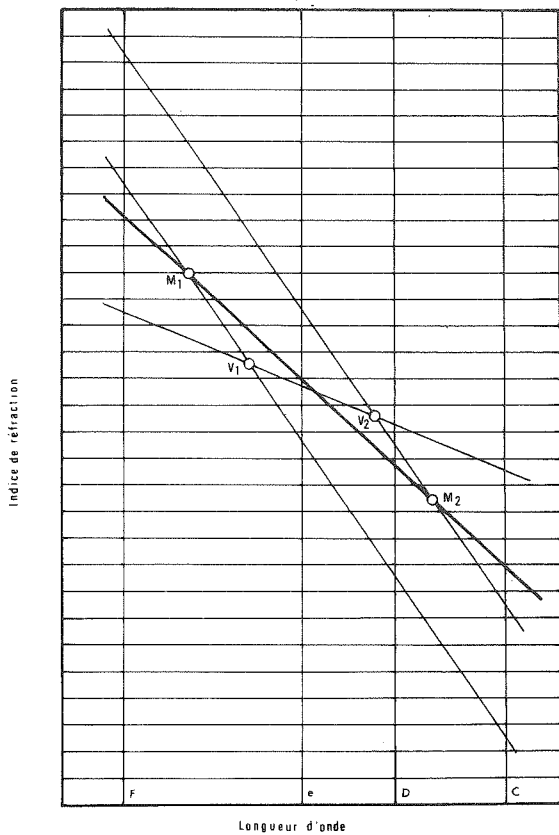


Fig. 25. - Méthode de l'étalon interne avec un verre et un (ou deux) liquides.

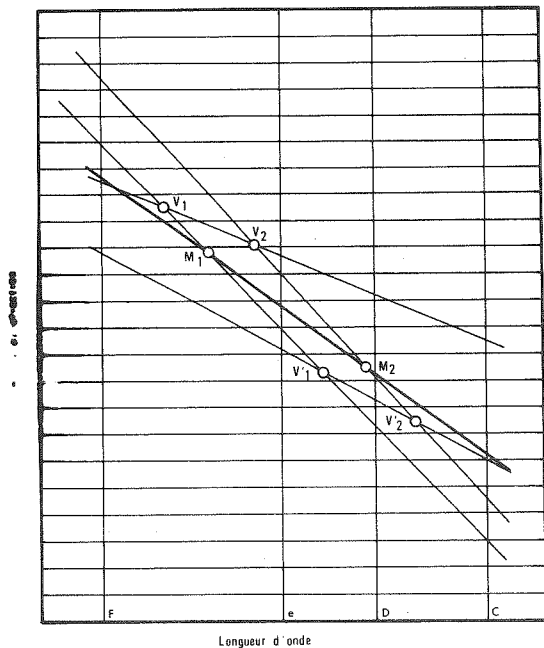


Fig. 26. - Méthode de l'étalon interne avec deux verres et deux liquides.

Si la dispersion du corps n'est pas connue, on détermine de même une seconde paire de points V_2 et M_2 en changeant de liquide et, éventuellement, de verre (Fig. 26).

Micheelsen conseille d'encadrer la détermination de λ_m par deux déterminations de λ_V , afin de se garantir contre le risque que la température de la préparation (et donc l'indice du liquide) aient changé en cours d'opération. Les meilleurs résultats sont donnés par les corps incolores ou quasi-incolores et dépourvus d'inclusions. Il estime la précision de la méthode à $\pm 0,0002-0,0003$ dans de nombreux cas et, exceptionnellement, à $\pm 0,0001$. Comme étalons internes, il préconise les verres d'optique peu dispersifs, dont les courbes de dispersion recoupent un plus grand nombre de courbes de dispersion des liquides que les verres très dispersifs.

5 - Méthodes utilisant la dispersion en lumière blanche

a - Introduction

Sauf pour certaines déterminations approchées (encadrement), les méthodes qui précèdent impliquent, sous une forme ou sous une autre, l'emploi de lumière sensiblement monochromatique. D'autres méthodes, qui ont fait l'objet de développements intéressants au cours des dernières décennies, utilisent la lumière blanche et la dispersion différentielle des liquides organiques d'immersion et des minéraux. Sous une forme ou sous une autre, elles reviennent à égaliser, pour une des longueurs d'onde qui constituent la lumière blanche, l'indice du liquide à celui du minéral.

Soient un liquide et un minéral d'indices voisins. Sauf s'ils ont tous deux exactement même dispersion, l'égalité de leurs indices ne peut, en toute rigueur, être réalisée que pour une seule longueur d'onde (ou, en pratique, pour un intervalle petit, dont la largeur dépend de la sensibilité de la méthode utilisée). On sait qu'à indices comparables la dispersion des liquides d'immersion est généralement supérieure (1) à celle des minéraux. Par suite, dans la plupart des cas, l'indice du solide est inférieur à celui du liquide pour les longueurs d'onde plus courtes que celle d'égalité; il lui est supérieur pour les longueurs d'onde plus grandes. Seuls les rayons correspondant à la longueur d'onde d'égalité ne sont pas déviés par le solide; tous les autres le sont dans des sens opposés (2). Lorsque la dispersion du liquide diffère de façon appréciable de celle du solide, il en résulte les effets colorés auxquels il a été fait allusion précédemment. Dans ces cas, la frange de Becke, au lieu d'être sensiblement blanche, est colorée et on peut même parfois observer de véritables petits spectres. Dans des liquides appropriés, lorsqu'on dérègle la mise au point, les couleurs extrêmes de ces petits spectres se déplacent toujours respectivement en sens inverse l'une de l'autre, par rapport à une couleur intermédiaire qui correspond à la longueur d'onde d'égalité. La calcite permet d'illustrer facilement le phénomène.

Matériel

Expérience

Deux minces fragments de clivage de calcite sont respectivement plongés dans des liquides d'indice nominal n_D^{20} de 1,650 et 1,660, pour lesquels $n_F - n_C = 0,020$ et orientés pour la mesure de n_O ($n_O = 1,658$ pour la raie D, $n_F - n_C = 0,0134$). On utilise l'éclairage axial. Tout en observant le contact entre la calcite et le liquide, on dérègle comme d'habitude la mise au point. Les effets colorés s'observent bien avec un objectif faible ou moyen (de 10 x à 25 x) et un oculaire assez grossissant (10 x), le diaphragme étant partiellement fermé et la position verticale optimale du condensateur déterminée par tâtonnements. Dans ces conditions :

(1) - Il y a des exceptions. Ainsi, d'après Winchell (1939), l'indice n_m du nitre (1,505 pour la raie D) a une dispersion de 0,0187, supérieure à celle des liquides de même indice couramment employés et du même ordre de grandeur que celle du liquide correspondant de Wilcox (p.70). L'indice n_m de la mullite (1,652) a une dispersion de 0,029, égale à celle du liquide Cargille correspondant. Enfin, on a vu que certains minéraux d'indices élevés ont une dispersion supérieure à celle des liquides disponibles.

(2) - Sauf bien entendu dans le cas d'incidence normale sur une lame à faces parallèles.

- Dans le liquide d'indice nominal 1,650, on observe sur les bords du fragment un petit spectre complet, allant du violet au rouge. De part et d'autre du vert, les bandes colorées se déplacent en sens inverse l'une de l'autre lorsqu'on dérègle la mise au point, alors que la partie verte s'élargit ou se contracte symétriquement, mais ne montre par de déplacement latéral préférentiel sensible.

Le monochromateur montre que l'égalité des indices est réalisée vers 525 nm.

Avec un objectif pour platine universelle dont on ferme le diaphragme, on élimine les couleurs déviées par le fragment (1). Les bords de celui-ci se colorent en vert.

- Dans le liquide d'indice nominal 1,660, le phénomène est analogue, mais c'est l'orangé-rouge qui se comporte comme le vert dans le cas précédent, alors que le jaune se déplace encore nettement et permet de conclure : n_o (jaune) < n_{liquide} (jaune).

Le monochromateur montre que l'égalité des indices est réalisée vers 630-640 nm.

En employant comme précédemment un objectif pour platine universelle, les bords du grain deviennent orangé-rouge.

L'expérience a été faite à la température ambiante. Si elle était répétée à la température exacte d'étalonnage des liquides, l'égalité serait réalisée vers 505-510 et 605-610 nm respectivement.

b - Méthode d'Emmons et Gates

Emmons et Gates (1948) ont proposé d'appliquer le phénomène ci-dessus à la détermination des indices de réfraction des minéraux. Voici, d'après ces auteurs, un exemple pour un minéral relativement peu dispersif, le microcline (Fig. 27). Soit $n_D = 1,520$ l'indice du liquide d'immersion :

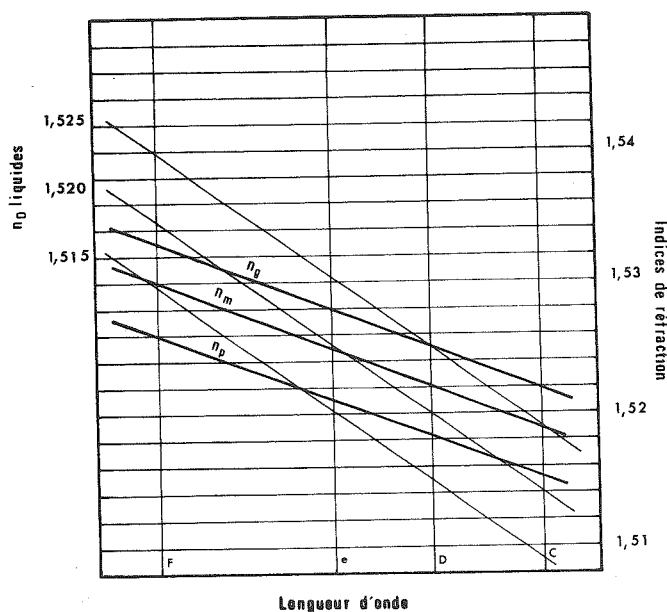


Fig. 27. - Méthode d'Emmons et Gates

pour n_m , il y a égalité des indices vers le milieu du spectre. Les couleurs correspondantes, peu réfractées au contact liquide-solide, n'apparaissent pas. Les pentes des deux courbes de dispersion ne différant pas beaucoup, les couleurs extrêmes sont relativement peu étalées et, par suite, mélangées aux couleurs adjacentes du spectre. Il en résulte l'apparition de jaune et de bleu "moyens" sur les bords opposés du contact.

pour n_g , l'égalité est réalisée dans le bleu. Par suite, la frange de Becke est bleu vif ou violette d'un côté du contact, jaune

très pâle de l'autre. En effet, toutes les couleurs correspondant aux courtes longueurs d'onde sont rassemblées et ne peuvent donner que du violet ou du bleu, alors que les couleurs formant l'autre frange comprennent la plus grande partie du spectre et donnent par suite un jaune très pâle.

pour n_p , il y a égalité dans le rouge et on obtient, pour des raisons analogues, une frange brun-jaunâtre ou même rouge d'un côté du contact, et un bleu très pâle de l'autre.

(1) - Suivant une des méthodes proposées par Cherkasov (voir p. 53).

Les indices des minéraux étant généralement donnés pour la raie D, on peut admettre qu'il y a égalité lorsque les franges colorées sont respectivement jaune vif et bleu pâle. L'indice du minéral est inférieur à celui du liquide si on observe une frange brune ou rouge. Il lui est supérieur si les franges sont jaune et bleu "moyens" ou, à plus forte raison, jaune pâle et bleu vif.

Quand les dispersions diffèrent de façon notable, la détermination est plus facile : on voit un spectre plus ou moins complet, à cheval sur le contact. La longueur d'onde d'égalité est située entre ces deux parties du spectre. Elle est donc facile à reconnaître bien que, d'après Emmons et Gates, elle n'ait que peu ou pas de couleur (1). Il est bon de faire deux déterminations dans deux liquides d'indices voisins, afin de déterminer la pente de la courbe de dispersion du minéral.

Il est difficile de bien définir la précision de la méthode. Elle présente l'inconvénient que les effets colorés ne se manifestent que dans un intervalle d'indices relativement étroit (en d'autres termes, l'indice du liquide ne doit pas différer beaucoup, dans le visible, de celui du solide). En outre, pour les indices relativement faibles, les effets colorés sont peu accentués, la dispersion des liquides ne différant pas beaucoup de celle des minéraux. Elle peut cependant trouver des applications lorsqu'une grande exactitude n'est pas nécessaire. Il semble d'autre part que l'usage des liquides de Wilcox (voir p. 70) soit susceptible d'augmenter son utilité dans certains cas.

c - Méthode de Dodge

Une méthode intéressante d'observation sur fond noir est due à Dodge (1948). Elle consiste à éclairer la préparation avec un cône creux de rayons lumineux, d'ouverture légèrement supérieure à celle de l'objectif (Fig. 28).

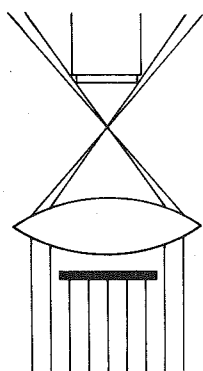


Fig. 28. - Eclairage sur fond noir (Dodge).

Le champ est donc normalement obscur. Si on intercale une préparation, les rayons correspondant aux longueurs d'onde non déviées par les particules ne pénètrent pas dans l'objectif. Seuls y sont admis ceux auxquels la dispersion différentielle du liquide et des particules a imprimé une déviation appropriée. Les particules apparaissent donc colorées sur fond noir. Lorsque leur indice diffère de plus d'un petit nombre d'unités de la seconde décimale de celui du liquide, les déviations très variées que subissent les diverses longueurs d'onde aboutissent à reconstituer de la lumière blanche, et les particules apparaissent blanches sur fond noir. Lorsque les indices se rapprochent, on observe une suite de couleurs selon le schéma suivant :

n_{liquide} croissant ↓	$n_{\text{liquide}} \ll n_{\text{minéral}}$	blanc
	$n_{\text{liquide}} < n_{\text{minéral}}$	jaune
		jaune et violet
		orangé et violet
		rouge et bleu-violet
	$n_{\text{liquide}} = n_{\text{minéral}}$	bleu ou bleu-violet, peu ou pas de rouge
	$n_{\text{liquide}} > n_{\text{minéral}}$	bleu
	$n_{\text{liquide}} \gg n_{\text{minéral}}$	blanc

(1) - Vraisemblablement parce que la couleur correspondante, sensiblement non déviée, est moins étalée que les autres. Cette quasi-absence de la couleur correspondant à la longueur d'onde d'égalité paraît cependant moins constante que ne l'indiquent Emmons et Gates.

A défaut de condensateur à fond noir, certains modèles simples de microscopes permettent de réaliser un montage qui donne d'excellents résultats. A l'une des extrémités d'un couvre-objet rectangulaire, on colle un disque de papier noir de diamètre approprié, on l'insère entre polariseur et condensateur et on centre à l'aide de la lentille de Bertrand. Avec ce montage, il est commode d'employer les objectifs pour platine universelle, dont on peut faire varier l'ouverture à volonté.

Pour les particules fortement biréfringentes, la méthode de Dodge offre le même inconvénient que toutes les méthodes par éclairage oblique. De plus, le critère d'égalité des indices manque de netteté. Elle n'est donc pas particulièrement adaptée aux déterminations précises d'indices. Par contre, elle se prête extrêmement bien à la différenciation et au comptage rapide de deux ou trois phases cristallines, à la seule condition que leurs indices soient tels qu'il soit possible de trouver un liquide dans lequel des différences nettes de couleurs apparaissent. Elle peut donc être très utile lorsqu'on désire obtenir des renseignements quantitatifs sur des mélanges formés d'un petit nombre de minéraux connus.

d - Masquage focal ou coloration par dispersion (1)

Sous ces noms, divers auteurs, notamment Cherkasov (1960), Brown et McCrone (1963) et Brown et al. (1963) ont étendu et systématisé ce qui précède.

On examine en lumière blanche une particule plongée dans un liquide d'indice voisin et de dispersion différente. Soit λ la longueur d'onde non déviée.

Si un diaphragme disposé dans le plan focal arrière de l'objectif ne laisse passer que les rayons correspondant à λ et intercepte toutes les longueurs d'onde déviées, les bords de la particule prendront la couleur correspondant à λ . On peut ainsi déterminer la longueur d'onde d'égalité (2).

Si le diaphragme précédent est remplacé par un autre qui n'intercepte que les rayons non déviés, c'est à dire ceux correspondant à λ , la couleur résultante est celle que prend une lumière blanche de laquelle a été soustraite la couleur correspondant à λ : c'est la couleur complémentaire de λ . Si λ n'est pas trop voisine des limites du spectre visible, un changement de mise au point fera apparaître deux franges, différemment colorées et se déplaçant en sens inverse l'une de l'autre.

La longueur d'onde d'égalité est déterminée à l'aide du Tableau 2. Avec le diaphragme annulaire, on la repère au mieux par comparaison avec une image graduée du spectre visible. Si on dispose d'un monochromateur, on peut confirmer et préciser la détermination.

Bien que subjective dans une certaine mesure (3), la détermination visuelle de la couleur d'égalité est souvent suffisante. Le mieux est de s'exer-

(1) - "Focal screening" ou "dispersion staining" des auteurs de langue anglaise.

(2) - Comme on l'a vu plus haut, ceci est facile à réaliser avec un objectif pour platine universelle. L'introduction du diaphragme présente cependant l'inconvénient inévitable de diminuer l'ouverture numérique de l'objectif et, par suite, la résolution des détails de l'image.

(3) - Comparer par exemple le Tableau 2 à celui que donnent Brown et McCrone (1963).

cer à la reconnaître aussi bien que possible en examinant des préparations de solides connus dans des liquides connus.

TABLEAU 2
COULEURS DE DISPERSION
(D'après R. E. WILCOX, communication personnelle)

Longueur d'onde d'égalité (nm)	Diaphragme annulaire (fond clair)	Diaphragme central (fond noir)		
		Couleur de la particule au point	En élevant l'objectif, couleur de la frange de Becke	
			pénétrant dans la particule	quittant la particule
465	Violet	Jaune d'or vif	Jaune d'or vif	
480	Bleu	Orangé	Jaune	Violet
505	Vert-bleuâtre	Rouge-orangé	Orangé	Violet-bleu
540	Vert	Pourpre	Rouge-orangé	Violet-bleuâtre
590	Jaune	Violet pâle	Rouge	Bleu foncé
625	Orangé	Bleu	"Rouge sombre délavé" (dans le texte : "pale dark red")	Bleu-verdâtre
650	Rouge-orangé	Bleu-verdâtre vif		Bleu-verdâtre vif

Brown et McCrone (1963) et Brown et al. (1963) ont proposé une intéressante application de ces principes à l'identification systématique des particules transparentes. Leur procédé repose sur l'emploi d'une série régulièrement échelonnée de liquides d'immersion bien calibrés. Après avoir déterminé l'ordre de grandeur de l'indice cherché, on examine une série de préparations dans des liquides d'indices voisins. Pour chacune d'elles, lorsque la courbe de dispersion du liquide recoupe dans le visible celle du solide, on observe les effets colorés. On note dans chaque cas la longueur d'onde λ d'égalité et on porte sur un graphique le point d'abscisse λ et d'ordonnée n_D^{25} , cette dernière grandeur étant l'indice, à 25°C et pour la raie D, du liquide dans lequel l'égalité est réalisée à la longueur d'onde λ . Bien entendu, si l'observation est faite à une température autre que 25°, il faut appliquer la correction appropriée (voir p. 36). La courbe qui relie ces différents points est, dans une certaine mesure, caractéristique du corps étudié. Bien qu'on puisse y lire directement l'indice n_D de ce dernier, cette courbe n'est pas la courbe de dispersion du corps. Cette dernière peut être construite en portant sur le graphique, pour chaque longueur d'onde d'égalité λ , le point marquant l'indice n_λ du liquide correspondant; dans ce cas, il est nécessaire de connaître la dispersion des liquides employés.

La figure 29 ci-contre illustre ce qui précède.

La méthode d'identification systématique de Brown et al. (1963), suivis de Forlini (1969) repose sur l'emploi des liquides Cargille (voir p. 71), pour lesquels les valeurs numériques des constantes :

$$n_C^{25^\circ} \quad n_D^{25^\circ} \quad n_F^{25^\circ} \quad \text{et} \quad -dn/dt$$

sont données avec précision, aucun changement notable de composition n'étant envisagé par le fabricant. Bien entendu, n'importe quelle autre gamme bien étalonnée peut convenir à cette restriction près que, si les compositions des liquides ne sont pas celles de Cargille, les résultats obtenus ne sont pas directement comparables à ceux de Brown et al.

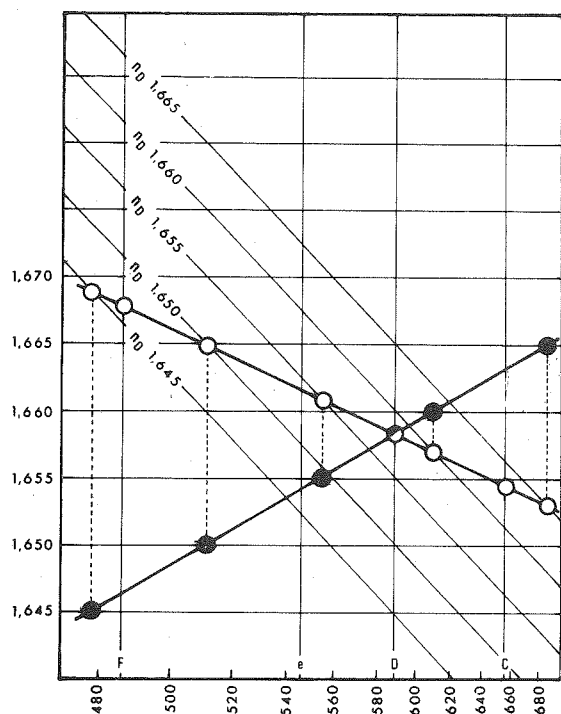


Fig. 29. - Indice n_0 de la calcite. ● : points de la courbe caractéristique. ○ : points de la courbe de dispersion.

pour ordonnées les nombres de la colonne 1 et pour abscisses les nombres correspondants de la colonne 2 est la courbe caractéristique de n_0 pour la calcite. Pour construire la courbe de dispersion de n_0 , on porte sur le graphique les cinq courbes de dispersion des cinq liquides utilisés et on détermine graphiquement les indices n_λ correspondants (colonne 3). La courbe joignant les points ayant pour abscisses les nombres de la colonne 2 et pour ordonnées ceux de la colonne 3, est la courbe de dispersion désirée.

Pour les corps optiquement isotropes, l'application de ce qui précède ne présente aucune difficulté. Il en est autrement pour les corps anisotropes; Les conclusions ci-après de Brown et al. valent pour des préparations supposées renfermer chacune une seule et même phase cristalline, sous forme de particules d'orientation quelconque :

- Uniaxes. - Quelle que soit son orientation, toute particule uniaxe a n_0 pour un de ses indices. Par suite, dans un liquide d'indice approprié, la rotation de la platine (ou celle du polariseur) communiquera tour à tour à chaque particule une même couleur, caractéristique de la longueur d'onde d'égalité pour n_0 . Pour des particules orientées de façon quelconque, ce fait est un critère d'uniaxie. Si les couleurs dans les autres orientations de la platine ou du polariseur correspondent à des longueurs d'onde plus courtes (c'est à

Exemple (Fig. 29)

Des fragments de clivage de calcite sont plongés dans des liquides d'indices $n_D^{25^\circ} = 1,645, 1,650, 1,655, 1,660, 1,665$, ayant tous même dispersion $n_F - n_C = 0,030$. Les fragments sont orientés pour la détermination de n_0 . Pour simplifier, les observations sont supposées faites à 25° . Voici, pour chaque liquide (colonne 1) les longueurs d'onde d'égalité (colonne 2) et l'indice du liquide correspondant à chacune d'elles (colonne 3) :

$n_D^{25^\circ}$	Longueur d'onde d'égalité, λ_{nm}	$n_\lambda^{25^\circ}$ (liquide)
(1)	(2)	(3)
1,645	478	1,6687
1,650	512	1,6648
1,655	560	1,6608
1,660	610	1,6570
1,665	688	1,6530

La courbe joignant les points qui ont pour ordonnées les nombres de la colonne 1 et pour abscisses les nombres correspondants de la colonne 2 est la courbe caractéristique de n_0 pour la calcite. Pour construire la

dire $n_e > n_o$), le corps est optiquement positif et réciproquement (voir p. 6).

- Biaxes. - Si, dans les mêmes conditions, toutes les particules ne montrent pas tour à tour une seule et même couleur par rotation de la platine ou du polariseur, elles sont biaxes. A la couleur indiquant la plus courte longueur d'onde d'égalité correspond approximativement n_g , à celle indiquant la plus grande longueur d'onde d'égalité, n_p .

Si les particules, toujours supposées appartenir à une seule phase, ont toutes une même orientation privilégiée (faciès particulier ou clivage parfait), la méthode ne distingue pas les biaxes des uniaxes.

La coloration par dispersion facilite l'étude de certains cristaux zonés (Wright, 1965). Employée avec la platine à aiguille, elle aide à orienter les cristaux pour la mesure des indices principaux. Le diaphragme annulaire a l'avantage de montrer la vraie couleur correspondant à la longueur d'onde d'égalité, alors que le diaphragme central montre sa complémentaire. Le principal inconvénient du diaphragme annulaire est l'inévitable manque de résolution aux petites ouvertures (1).

Jusqu'à ces dernières années, un obstacle sérieux à l'emploi de la coloration par dispersion pour l'étude des minéraux peu réfringents ($n < 1,55$) tenait à la dispersion relativement faible des liquides usuels, qui ne permettait pas toujours d'obtenir des effets colorés intenses. L'emploi des liquides de Wilcox (voir p. 70) permet maintenant de surmonter cet obstacle.

6 - Platine à aiguille

Un dispositif utilisé sous diverses formes depuis de nombreuses années appelé actuellement "platine à aiguille" (2) permet de faire tourner une particule autour d'un axe normal à l'axe du microscope. Toute direction optique peut ainsi être amenée dans le plan de la platine et rendue parallèle aux plans de vibration des nicols (comme avec le tube de Winchell). Ceci est très utile, surtout avec les minéraux fibreux ou possédant un clivage parfait défavorablement orienté par rapport aux directions remarquables de l'ellipsoïde.

De nombreux modèles de platines à aiguille ont été décrits. Dans l'un d'eux, inspiré de celui de Hartshorne (1963), la particule est collée à l'extrémité d'une mince aiguille métallique, elle-même logée en partie dans une rainure pratiquée dans une plaque métallique peu épaisse, dans laquelle elle est maintenue par deux ressorts. Cette plaque est fixée en position voulue sur la platine du microscope par deux vis, qui se logent dans les filetages destinés à la fixation des surplatines accessoires. Les trous pratiqués dans la plaque pour le passage des vis ont un diamètre légèrement supérieur à celui de ces dernières; il est ainsi facile de placer la particule exactement au centre du champ. Un bouton, fixé à l'autre extrémité de l'aiguille, permet de la faire

(1) - Les objectifs pour platine universelle conviennent bien pour les observations avec diaphragme annulaire. On réalise de façon simple un diaphragme central au moyen d'un couvre-objet circulaire s'insérant sans jeu appréciable dans la monture de l'objectif, contre sa lentille arrière. On a préalablement placé au centre du couvre-objet une goutte d'encre de Chine ou un disque de papier noir opaque, dont le diamètre optimal a été déterminé par tâtonnements. Il existe dans le commerce des objectifs qui permettent d'observer à volonté sans diaphragme, avec diaphragme annulaire ou avec diaphragme central.

(2) - "Spindle stage" des auteurs de langue anglaise.

tourner autour de son axe; il porte une graduation qui passe devant un repère fixe. Un évidement pratiqué dans la plaque métallique permet le passage de la lumière et reçoit une lame de verre sur laquelle on dépose le liquide d'immersion; on recouvre ensuite d'une lamelle. On voit que ce dispositif permet, par des rotations combinées de l'aiguille et de la platine du microscope, d'amener n'importe quelle direction optique du cristal dans le plan de la platine et de lui donner n'importe quelle orientation désirée par rapport aux fils du réticule. L'épaisseur de la plaque métallique est légèrement supérieure à celle d'une lame ordinaire et la profondeur de la rainure est telle que le cristal examiné se trouve légèrement au-dessous du plan de la surface supérieure de la plaque métallique. Dans ces conditions, il est possible d'employer, non seulement des objectifs à grossissement faible ou moyen, mais même des objectifs d'ouverture numérique atteignant 0,85 et, par suite, d'effectuer des observations en lumière convergente. On peut ainsi examiner commodément des particules de quelques dixièmes de millimètre.

Dans le cas général, les axes de symétrie de l'ellipsoïde ne sont pas orientés de façon privilégiée par rapport à l'axe de l'aiguille. Leur orientation peut se faire soit en lumière convergente, soit en lumière parallèle.

En lumière convergente, Rosenfeld (1950) fait remarquer que lorsqu'une branche d'hyperbole est orientée parallèlement au fil E-W du réticule, celui-ci lui étant axe de symétrie, une des trois sections principales de l'ellipsoïde est verticale et orientée E-W; par suite, l'un des axes de symétrie de l'ellipsoïde (c'est à dire, la direction d'un des trois indices principaux) est horizontal et parallèle au fil N-S du réticule. Trois positions différentes de l'aiguille et de la platine donnent ce résultat et correspondent aux trois indices principaux. Bien entendu, deux positions de l'aiguille et de la platine du microscope distantes de 180° correspondent à une même orientation.

En lumière parallèle, Wilcox (1959) propose la méthode suivante. Rendre l'axe de l'aiguille parallèle au fil E-W du réticule et amener le cristal à l'extinction par rotation autour de l'axe de l'aiguille. Faire ensuite tourner ce dernier d'un angle petit, ramener à l'extinction par rotation de la platine et continuer ainsi en comparant l'indice du minéral à celui du liquide pour chaque position d'extinction et en changeant de liquide s'il y a lieu, jusqu'à ce qu'on ait trouvé les valeurs minimale et maximale de l'indice pour une rotation de 180° autour de l'axe de l'aiguille. L'une d'elles est n_m et l'autre, n_g ou n_p . On rend alors l'aiguille parallèle au fil N-S du réticule et on amène à l'extinction comme plus haut. Si le nouvel indice observé est plus faible que précédemment, l'indice principal obtenu après la première série d'observations était n_g et, dans cette deuxième série, l'indice minimal sera n_p (l'indice maximal obtenu au cours de cette deuxième série étant un indice non principal). Si le nouvel indice observé est plus élevé que précédemment, l'indice principal obtenu après la première série d'observations était n_p , et l'indice maximal obtenu au cours de cette deuxième série est n_g .

Cette méthode repose sur les propriétés des courbes des positions d'extinction dans une zone, l'axe de zone étant ici représenté par celui de l'aiguille. Duparc et Pearce ont montré que la courbe des positions d'extinction qui passe par l'axe de zone passe aussi par une des bissectrices, et que celle qui passe par le grand cercle de l'axe passe aussi par Y et par l'autre bissectrice. Pour plus de détails, on se reportera aux travaux cités par Wilcox.

La platine à aiguille facilite l'étude des minéraux fibreux ou aciculaires, y compris ceux qui, tels que les amphiboles monocliniques, possèdent un clivage parfait non orienté de façon privilégiée par rapport aux directions des indices. Des simplifications sont souvent possibles.

Ainsi, soit à étudier un fragment de clivage 110 d'un cristal monoclinique, la direction d'allongement étant parallèle à l'axe cristallographique c . On sait que le plan des axes peut être soit parallèle, soit normal à 010. Après avoir déterminé n_p et n_g sur un fragment et choisi un liquide en conséquence, le fragment à étudier est collé à l'extrémité de l'aiguille, de telle sorte que sa direction d'allongement soit parallèle à l'axe de celle-ci. Par des rotations combinées de la platine du microscope et de l'aiguille, on fait en sorte que le cristal soit à l'extinction lorsque sa direction d'allongement est parallèle au fil horizontal du réticule.

Si le cristal a 010 pour plan des axes, son plan 100 est, dans cette orientation, parallèle à la platine du microscope et la direction de n_m se trouve dans le plan de la platine et parallèle au fil N-S. En changeant de liquide autant de fois qu'il est nécessaire, on mesure n_m . Par rotation de l'aiguille de 90° autour de son axe, on rend ensuite le plan 010 parallèle au plan de la platine. Dans cette nouvelle orientation, l'une des deux positions d'extinction consécutives rencontrées par rotation de la platine du microscope correspond à n_p , l'autre à n_g , qu'on mesure comme précédemment. De plus, dans cette dernière orientation, on peut mesurer l'angle d'extinction après avoir déterminé avec une lame auxiliaire s'il s'agit de $Z \wedge c$ ou de $X \wedge c$. Si le minéral est une amphibole et si on a en outre mesuré l'angle d'extinction $Z' \wedge c$ sur un fragment de clivage, on peut, en portant $Z \wedge c$ et $Z' \wedge c$ sur le diagramme de Gazzi (1963) obtenir un ordre de grandeur de $2V$, mais la méthode manque de précision et celle-ci est illusoire lorsque l'angle d'extinction est petit.

Si le plan des axes optiques est normal à 010, la position d'extinction droite correspond à n_g ou à n_p , et les deux positions d'extinction consécutives trouvées après rotation de 90° de l'aiguille correspondent, l'une à n_m , l'autre à n_p ou à n_g . Si c'est la direction Y (n_m) qui est la plus voisine de la direction d'allongement, on le constate aisément par l'inversion du signe de l'allongement, qui sera, par exemple, positif pour la position de l'aiguille donnant l'extinction droite, et négatif après qu'on aura imprimé à l'aiguille une rotation de 90° autour de son axe.

Dans les minéraux orthorhombiques, la direction d'allongement est généralement aussi celle d'un indice principal. On montera donc le cristal de telle sorte que sa direction d'allongement soit située dans l'axe de l'aiguille et on s'assurera qu'une fois celui-ci rendu parallèle au fil N-S, le cristal demeure éteint entre nicols croisés lorsqu'on le fait tourner sur lui-même à l'aide de l'aiguille. A 45° de l'extinction, et en faisant tourner l'aiguille autour de son axe, on détermine si la direction d'allongement correspond à n_p (allongement négatif), à n_g (allongement positif) ou à n_m (allongement \pm), ce qui guidera le choix des liquides. On revient alors à l'extinction, ôte l'analyseur et détermine l'indice principal correspondant. Les deux autres lui étant à la fois perpendiculaires et perpendiculaires entre eux, on rend l'axe de l'aiguille parallèle au fil E-W, puis on la fait tourner jusqu'à ce qu'on obtienne, pour les indices, une valeur minimale et une valeur maximale, séparées par une

rotation de 90° de l'aiguille. On met à profit ces deux orientations pour faire un examen en lumière convergente. L'emploi de la dispersion permet de préciser les positions d'indice minimal et d'indice maximal : en lumière monochromatique, pour un liquide donné, l'égalité des indices est réalisée à des longueurs d'onde d'autant plus courtes que les indices sont plus élevés, et réciproquement; en lumière blanche et "masquage focal", on comparera les couleurs observées à celles décrites page 54.

Il y a avantage à employer la même méthode avec les particules monocliniques dont l'angle d'extinction par rapport à la direction d'allongement est petit. En effet, il est alors difficile de fixer exactement la position d'extinction droite et, par suite, la position à 90° qui en découle. Si la biréfringence partielle dans le plan normal à la direction d'allongement n'est pas faible, il peut en résulter des erreurs notables sur les indices correspondants (1).

Les déterminations qu'on vient de voir sont rendues plus rapides et plus exactes par l'emploi de la dispersion. En effet, tant que la biréfringence maximale n'est pas élevée, la dispersion des indices des minéraux peut souvent, sans grande erreur, être considérée comme une "constante" quasi-indépendante de l'orientation. En d'autres termes, dans ces cas, la grandeur $n_F - n_C$ est sensiblement la même pour n_g , pour n_m et pour n_p . C'est ainsi que, pour une hornblende ($n_g - n_p = 0,015$), Barnes (in Winchell, 1939) donne de cette grandeur les valeurs suivantes : 0,015 pour n_g et 0,0138 pour n_p , soit une différence de 0,0012 à peine, du même ordre de grandeur que l'incertitude sur les mesures.

Si l'on dispose d'un moyen de faire varier la longueur d'onde de façon continue, il est facile de déterminer, à l'aide de deux liquides (p. 46), la dispersion $n_F - n_C$ de l'un ou de l'autre indices d'un fragment de clivage, donc la pente de la droite qui représente cette dispersion sur le graphique de Hartmann. On oriente ensuite une particule pour la mesure des indices principaux puis, en faisant varier la longueur d'onde, on amène à égalité l'indice du liquide (convenablement choisi) et l'indice à mesurer. On procède de même pour les deux autres indices et on obtient ainsi un point de chacune des trois droites qui représentent respectivement la dispersion de n_g , de n_m et de n_p . En faisant passer par chacun de ces points une droite parallèle à celle qui représente la dispersion moyenne $n_F - n_C$ déterminée précédemment, on obtient la dispersion des trois indices et on peut lire sur ces droites la valeur de n_g , de n_m et de n_p pour toute longueur d'onde, et notamment pour la raie D. Lorsque la biréfringence $n_g - n_p$ du minéral est telle que :

$$n_g - n_p \leq (n_F - n_C)_{\text{liquide}} - (n_F - n_C)_{\text{minéral}}$$

on peut déterminer les trois indices principaux avec un seul liquide convenablement choisi.

(1) - Dans ce cas, l'indice non principal mesuré sur un fragment de clivage pour la position d'extinction la plus voisine de la direction d'allongement diffère peu de l'indice principal correspondant. Ainsi, pour les amphiboles monocliniques dont l'angle d'extinction $Z \approx c$ est petit, l'indice n_g mesuré sur un fragment de clivage 110 est très voisin de n_g .

En lumière blanche et avec "masquage focal", les effets colorés permettent de déterminer si une rotation de l'aiguille dans un sens donné entraîne une augmentation ou une diminution de l'indice de réfraction du minéral, mais les résultats sont peut-être moins précis.

On a proposé divers dispositifs pour présenter les particules à étudier dans l'orientation désirée par rapport à l'aiguille. De nombreux adhésifs ont été préconisés. La colle blanche liquide de bureau donne généralement de bons résultats. Pour plus de précisions, on se reportera aux travaux cités au paragraphe suivant.

Ce qui précède a pour seul but de donner une idée des possibilités intéressantes que présente l'emploi de la platine à aiguille pour l'étude des minéraux transparents. Son utilité n'est pas limitée à la détermination des indices de réfraction. Au cours des vingt à trente dernières années, elle a fait l'objet de nombreuses publications (voir notamment Rosenfeld, 1950; Wilcox, 1959 a et b; Fisher, 1962; Hartshorne, 1963; et l'excellent exposé de Hartshorne et Stuart, 1970). L'emploi efficace de la platine à aiguille demande une certaine pratique.

CHAPITRE V

MILIEUX D'IMMERSION

Les milieux d'immersion sont de préférence liquides et doivent répondre aussi bien que possible à plusieurs conditions. Idéalement, ils doivent être stables, non volatils ou aussi peu volatils que possible, inertes vis à vis des minéraux avec lesquels ils seront mis en contact, non toxiques et, plus généralement, ne pas être d'emploi anormalement dangereux ou désagréable. Dans la pratique, ces conditions ne sont pas toutes également remplies. Les indices des minéraux pouvant varier de 1,30 environ à beaucoup plus de 2, il est nécessaire de disposer d'une gamme de liquides assez étendue, chaque liquide étant séparé du suivant par un intervalle relativement petit.

Les séries de liquides peuvent être diversement constituées.

Si chacun des liquides qui constituent une série était un composé chimique distinct, pur et stable, son indice ne serait pas soumis à des variations autres que celles dues à sa dispersion et à la température, dont il est toujours possible de tenir compte. Malheureusement, le choix de composés convenables n'étant pas illimité, il n'est pas toujours possible de trouver un liquide approprié dont l'indice ait une valeur donnée, et il est impossible de constituer ainsi une gamme de liquides tels que la différence entre deux liquides consécutifs soit constante (par exemple, 0,01 ou 0,002).

Emmons (1929 c.1943) tourne la difficulté en utilisant une série de liquides purs en liaison avec sa méthode de double variation (voir p.47 et suivantes), qui permet de faire couvrir à un seul liquide un intervalle d'indices assez étendu (de 0,02 à 0,06 environ). Exemple :

	20° n_D^{20}	50° n_C^{50}	Différence
Monochloracétate d'éthyle	1,426	1,405	0,021
Diiodométhane	1,767	1,711	0,056

Larsen et Berman (1934) adoptent un moyen terme. Leur série est constituée de liquides choisis de telle sorte que chacun soit miscible avec chacun des liquides dont il est immédiatement précédé et suivi.

La liste d'Emmons et celle de Larsen et Berman ont été et sont encore souvent reproduites.

Un développement de la solution de Larsen et Berman consiste à préparer des liquides d'indices voulus en mélangeant des proportions convenables de deux liquides, l'un d'indice faible, l'autre d'indice élevé. Leurs propriétés doivent être suffisamment conformes aux conditions énumérées plus haut. En outre, les deux liquides ne doivent pas réagir l'un sur l'autre. Ils doivent être miscibles en toutes proportions et avoir des tensions de vapeur aussi peu élevées et aussi voisines l'une de l'autre que possible (ceci afin de minimiser les variations d'indice dues à l'évaporation plus rapide de l'un d'eux). Pour simplifier la préparation des mélanges, il est souhaitable que leur courbe de

mélange soit linéaire ou quasi-linéaire, mais contrairement à ce qui est souvent indiqué, il n'en est pas ainsi de façon générale (Buerger, 1933; Butler, 1933; Darneal, 1948; Fujii et Bloss, 1962). Enfin, pour la commodité d'emploi, il est souhaitable que, dans une gamme donnée, la dispersion ($n_F - n_C$) et le coefficient de température (dn/dt) soient, sinon constants, du moins qu'ils varient avec l'indice de façon linéaire ou quasi-linéaire. Là encore, toutes ces conditions ne sont pas également satisfaites.

On ne connaît pas de série comportant seulement deux corps d'usage commode et qui permette de couvrir la gamme des indices de la majorité des minéraux (par exemple, de 1,4 à 2). Chacune des séries qui ont été publiées (et dont on trouvera un certain nombre au Tableau 3) est donc formée d'un nombre variable de séries moins étendues, recommandées par divers auteurs. Celles qui paraissent les plus intéressantes sont décrites ci-après, par ordre d'indices croissants. Dans ce qui suit, les nombres entre parenthèses qui suivent immédiatement les indices indiquent l'approximation des mesures, en unités de la dernière décimale.

1 - De 1,29 à 1,41, Weaver et McVay (1960) recommandent des mélanges de perfluorotributylamine et de divers polymères du chloro-trifluoroéthylène. Ces corps, fabriqués par la compagnie 3M, sont incolores, inodores et miscibles en toutes proportions. Par rapport aux corps antérieurement recommandés (eau, alcools divers, acétone, etc.), ils présentent l'intérêt d'être peu volatils. En particulier, ils remplacent avantageusement l'eau, recommandée dans certaines séries, car, outre sa tension de vapeur non négligeable, elle présente l'inconvénient de dissoudre plusieurs minéraux d'indices peu élevés. Les indices de leurs mélanges demeurent constants à 0,001 près pendant de nombreux mois. Bien qu'ils puissent irriter la peau, aucune toxicité n'avait été signalée à la date de publication. Les auteurs n'indiquent pas si la courbe de mélange est ou non linéaire. Ils ne donnent pas la dispersion.

TABLEAU 4

PROPRIETES DE LA PERFLUOROTRIBUTYLAMINE
ET DE CERTAINS POLYMERES DU CHLOROTRIFLUOROETHYLENE

Corps	$n_D^{25^\circ C}$	Coefficient de température		Tension de vapeur (mm de Hg à 25°C)
		dn/dt °C	Intervalle °C	
(C ₄ F ₉) ₃ N	1,292 (1)	0,00041	19-25	0,3
Polymère N° 10	1,411 (1)	0,00033	22-51	3 x 10 ⁻⁴
Cl-(CF ₂ -CFCl) ₅ -Cl	1,406 (1)	0,00034	25-42	2 x 10 ⁻³

TABEAU 3

COMPOSITION DE DIVERSES SERIES DE LIQUIDES D'IMMERSION, DE 1,34 A 1,84

n	Kunz & Spulnik (1936)	Bosazza (1940)	Hutton (1950)	Emmons & Gates (1948)	Heinrich (1965)	Heinrich (1965)	Muir (1967)	Bordet (1968)
1,34						Eau		Eau
1,41					n-décane		Valérate d'isoamyle	
1,43			2-(butoxy-éthoxy) éthanol			"butyl carbitol" (= 2-butoxy- éthoxy éthanol)		
1,45-1,48		Huile minérale		Huile minérale	Huile minérale		Huile minérale	Huile minérale
1,49	Phtalate de dibutyle							
1,52				Salicylate d'éthyle				
1,58								Aniline
1,63				1-chloro- naphtalène	1-chloro- naphtalène	1-chloro- naphtalène	1-chloro- naphtalène	
1,66	1-bromo- naphtalène	1-bromo- naphtalène	1-bromo- naphtalène	1-bromo- naphtalène			1-bromo- naphtalène	1-bromo- naphtalène
1,71				1-iodo- naphtalène				
1,74			diiodométhane	diiodométhane	diiodométhane	diiodométhane	diiodométhane	
1,78			diiodométhane + soufre	diiodométhane + soufre	diiodométhane + soufre	diiodométhane + soufre	diiodométhane + soufre	
1,81			+ tétra-iodo- éthylène					
1,84		di-iodo- phénylarsine						di-iodo- phénylarsine

2 - De 1,35 à 1,46, Buerger (1931) a proposé une série de liquides résultant de la distillation fractionnée du pétrole. Sans être un composé chimique déterminé, un liquide obtenu dans un intervalle de températures suffisamment étroit se comporte comme tel. En particulier, il est stable et son indice ne varie pas ou varie peu par évaporation. Les membres inférieurs de cette série sont cependant volatils et avantageusement remplacés par les mélanges de Weaver et McVay. Par contre, de 1,41 à 1,46, la volatilité est très faible et ces liquides peuvent combler l'intervalle qui existe entre les précédents et ceux de Butler.

3 - De 1,450 à 1,630, Butler (1933) a proposé une excellente série dont les termes extrêmes sont une huile minérale, "distillat du pétrole à point d'ébullition élevé", $n_D = 1,4500$ à 22°C (Butler utilise la fraction qui distille entre 220 et 236°C) et le 1-chloronaphtalène ($n_D = 1,6324$ à 22°C). Cette série, très stable, présente l'avantage d'une relation quasi-linéaire entre la composition des mélanges d'une part et leurs indices de réfractions, leurs coefficients de température et leurs dispersions d'autre part. La variation du coefficient de température avec la composition est bien représentée par la relation :

$$dn/dt = 0,0024332n + 0,0000491.$$

Ses valeurs extrêmes sont $0,000402$ pour $n_D = 1,4500$ à 22°C , et $0,000446$ pour $n_D = 1,6324$ à 22°C . La variation de la dispersion en fonction de la composition est bien représentée par l'équation :

$$n_F - n_C = 0,1200n - 0,1653,$$

et $n_F - n_C$ varie de façon quasi-linéaire, de $0,0087$ pour $n_D = 1,4500$ à 22°C , à $0,0306$ pour $n_D = 1,6324$ à 22°C . Il devrait être possible d'étendre la gamme du côté des indices élevés en remplaçant le 1-chloronaphtalène, soit par le 1-bromonaphtalène ($n_D = 1,658$ à 20°C), soit par le 1-iodonaphtalène ($n_D = 1,710$ à 20°C). Butler donne une série très complète de valeurs numériques qui permettent de reproduire exactement tous les membres de la série, à la seule condition que les deux liquides utilisés aient exactement mêmes constantes optiques que les siens. Dans le cas contraire, on peut, soit préparer une autre courbe de mélange, soit adapter celle de Butler aux indices des liquides dont on dispose. La différence maximale entre la valeur réelle de l'indice et la valeur donnée par une droite n'est que de $+0,001$ pour le milieu de la gamme. Le mode de préparation des fractions, décrit brièvement par Butler, a été précisé par Bosazza (1940).

4 - De 1,49 à 1,66, Kunz et Spulnik (1936) recommandent les mélanges de phtalate de dibutyle et de 1-bromonaphtalène (Tableau 5).

Les mélanges préparés à partir de ces liquides ont conservé leurs indices à $0,002$ près pendant un an. Les produits employés par Kunz et Spulnik étant de qualité "technique", il est vraisemblable qu'une meilleure stabilité résulterait de l'emploi de produits purs. Les auteurs ne donnent ni le coefficient de température, ni la dispersion. Pour les indices inférieurs à 1,49, ils recommandent d'autres liquides (acide heptylique, $n = 1,4234$; propionate d'éthyle, $n = 1,3841$) qui ne paraissent pas présenter d'avantages sur ceux décrits plus haut.

TABLEAU 5
 PROPRIETES DU PHTALATE DE DIBUTYLE ET DU 1-BROMONAPHTALENE
 (D'après Kunz et Spulnik, 1936)

Corps	Tension de vapeur (mm de Hg à 110° C)	$n_D^{20^\circ C}$
Phtalate de dibutyle	3,8	1,4932
1-bromonaphtalène	3,5	1,6582

5 - De 1,635 à 1,738. - On peut couvrir cet intervalle avec des mélanges de 1-chloronaphtalène et de diiodométhane. Fujii et Bloss (1962) donnent de façon très complète les propriétés de ces deux corps et de leurs mélanges, dont les principales sont reproduites au Tableau 6. Les courbes de mélange ne sont pas linéaires.

TABLEAU 6
 PROPRIETES DE MELANGES DE 1-CHLORONAPHTALENE
 ET DE DIIDOMETHANE
 (D'après Fujii et Bloss, 1962)

Diiodométhane			$n_D^{20^\circ C}$	$n_F^{20^\circ C}$	$n_C^{20^\circ C}$	$n_F - n_C$ à 20° C	- dn/dt
% en mol.	% en poids	% en vol.					
0,0	0,0	0,0	1,6328 (5)	1,6533	1,6237	0,0296	0,00042
26,8	37,6	17,8	1,6444 (5)	1,6656	1,6352	0,0304	0,00051
48,2	60,4	35,3	1,6589 (3)	1,6818	1,6501	0,0317	0,00059
63,1	73,7	50,2	1,6744 (8)	1,6964	1,6642	0,0322	0,00073
74,1	82,5	62,9	1,6874 (4)	1,7110	1,6774	0,0336	0,00069
83,8	89,4	75,2	1,7034 (3)	1,7279	1,6932	0,0347	0,00082
91,5	94,8	86,7	1,7183 (2)	1,7431	1,7092	0,0339	0,00084
100,0	100,0	100,0	1,7383 (3)	1,7647	1,7282	0,0365	0,00081

6 - De 1,66 à 1,74. - Des mélanges de 1-bromonaphtalène et de diiodométhane permettent de couvrir cet intervalle. Un peu moins étendue que la précédente, cette série présente l'avantage d'économiser le diiodométhane. Bien que la courbe de mélange ne soit pas linéaire, les proportions nécessaires

pour obtenir un indice donné peuvent être calculées. Darneal (1948) donne l'équation :

$$n_D^{20^\circ} = 1,6587 + \frac{1}{107} (4530 x + 37 x^2),$$

où x est le pourcentage de diiodométhane en volume. Comme les indices des produits peuvent varier d'un lot à l'autre, il est préférable et d'ailleurs plus simple de préparer quelques mélanges, dont la composition et les indices permettront de construire une courbe expérimentale. En voici un exemple :

TABLEAU 7

PROPRIETES DE MELANGES DE 1-BROMONAPHTALENE
ET DE DIIDOMETHANE

(D'après Darneal, 1948)

CH ₂ I ₂ volume %	C ₁₀ H ₇ Br volume %	Tempéra- ture, °C	n _D	n _D corrigé à 20°C	- dn/dt calculé
2,7	97,3	18,3	1,6606	1,6598	0,00047
21,3	78,7	18,3	1,6705	1,6696	0,00053
36,2	63,8	18,4	1,6800	1,6791	0,00069
48,8	51,2	18,5	1,6893	1,6884	0,00060
60,3	39,7	18,3	1,7001	1,6991	0,00059
70,7	29,3	18,5	1,7102	1,7092	0,00067
80,6	19,4	18,4	1,7202	1,7191	0,00069
90,0	10,0	18,2	1,7302	1,7290	0,00067
99,1	0,9	18,3	1,7402	1,7390	0,00071

La courbe construite à partir de telles données permet de déterminer rapidement les proportions nécessaires pour obtenir un liquide d'indice donné, ainsi que les proportions de diiodométhane ou de 1-bromonaphtalène à ajouter à une quantité donnée d'un tel liquide pour obtenir un autre indice donné. Darneal donne l'exemple suivant. :

Soit 10 ml de liquide renfermant 7,50 ml de CH₂I₂ et 2,50 ml de C₁₀H₇Br. n_D = 1,7134. Indice désiré : 1,710. D'après la courbe, le liquide ayant ce dernier indice renferme 71,7 % de CH₂I₂ et 28,3 % de C₁₀H₇Br. Par suite :

0,717 V = 7,50 ml de CH₂I₂ dans le liquide initial et

V = 10,46 ml = volume total du liquide final.

0,283 V = 2,96 ml de C₁₀H₇Br dans le liquide final, et

2,96 - 2,50 = 0,46 ml de C₁₀H₇Br à ajouter au liquide initial pour amener son indice à 1,710.

Ce mode de calcul convient pour des corrections relativement minimales.

7 - De 1,74 à 1,81, Meyrowitz et Larsen (1951) proposent des solutions des deux termes extrêmes suivants :

1 - CH_2I_2 , $n_D^{25^\circ} = 1,738$

2 - Solution à 10 % de S dans AsBr_3 , $n_D^{25^\circ} = 1,814$.

Pour préparer la seconde solution, mélanger 10 % en poids de S à 90 % en poids de AsBr_3 dans un erlenmeyer bouché à l'émeri. Faire dissoudre en chauffant légèrement. Laisser reposer une nuit. Filtrer à plusieurs reprises à travers le même entonnoir en verre fritté de porosité moyenne, jusqu'à ce que la solution ne soit plus trouble. La courbe de mélange n'est pas linéaire, mais elle peut être construite au moyen des données du Tableau 8.

TABLEAU 8

PROPRIETES DE MELANGES DE DIODOMETHANE
ET DE SOLUTIONS A 10 % DE S DANS AsBr_3
(d'après Meyrowitz et Larsen, 1951)

10 % S dans AsBr_3 (g)	CH_2I_2 (g)	n_D à 25°C	dn/dt	$n_{546} - n_{589}$	n_F (1)	n_C (1)
5,4	174,6	1,742	0,0007	0,0096	1,7692	1,7312
21,6	158,4	1,753	0,0007	-	-	-
36,9	143,1	1,762	0,0007	-	-	-
52,2	127,8	1,771	0,0007	-	-	-
71,1	108,9	1,781	0,0007	-	-	-
92,7	87,3	1,792	0,0007	-	-	-
119,7	60,3	1,801	0,0007	-	-	-
158,4	21,6	1,811	0,0007	0,0103	1,8404	1,7892

8 - De 1,66 à 1,81. - La stabilité des liquides renfermant du diiodométhane laissant quelque peu à désirer, Meyrowitz (1952) a proposé, pour cet intervalle, des mélanges de 1-bromonaphtalène et d'une solution à 10 % de S dans AsBr_3 :

	$n_D^{25^\circ}$	dn/dt	$n_{546} - n_{589}$	$n_F^{25^\circ}$ (1)	$n_C^{25^\circ}$ (1)
1-bromonaphtalène	1,655	0,00048	0,0076	1,6768	1,6462
10 % S dans AsBr_3	1,814	0,0006	0,0114	1,8463	1,801

Les données du Tableau 9 permettent de construire la courbe de mélange, qui n'est pas linéaire.

(1) - Par extrapolation sur graphique de Hartmann à partir des valeurs de $n_{546} - n_{589}$.

TABLEAU 9

PROPRIETES DE MELANGES DE 1-BROMONAPHTALENE
 ET DE SOLUTIONS A 10 % DE SOUFRE DANS LE TRIBROMURE D'ARSENIC
 (d'après Meyrowitz, 1952)

10 % S dans AsBr ₃ (g)	1-bromo- naphtalène (g)	25° n _D
28	272	1,662
69	231	1,673
88	212	1,679
118	182	1,690
142	158	1,700
163	137	1,710
184	116	1,721
200	100	1,729
216	84	1,739
233	67	1,752
244	56	1,760
256	44	1,769
268	32	1,780
276	24	1,788
287	13	1,799
296	4	1,809

9 - De 1,82 à 2,00, Meyrowitz et Larsen (1951) proposent des mélanges de :
 1 - 10 % S dans AsBr₃ (n_D à 25° = 1,814)
 2 - S 20 %, AsS 20 %, AsBr₃ 60 % (n_D à 25° = 2,003).

La courbe de mélange est linéaire. Ces liquides ont une dispersion élevée (n_F - n_C = 0,069 pour n_D = 2,00).

10 - De 2,00 à 2,11, Meyrowitz (1952) propose des solutions de AsS et de Se dans AsBr₃.

Tous les liquides renfermant du tribromure d'arsenic sont toxiques et corrosifs. Ils s'hydrolysent à l'air humide avec formation de HBr et dépôt de As₂O₃. Ils attaquent plusieurs minéraux. Il est nécessaire de poser rapidement la lamelle et de faire rapidement les déterminations. Ces liquides doivent être conservés dans des flacons bouchés émeri avec capuchon émeri.

Milieux d'indices élevés

Comme le montrent la remarque ci-dessus et le grand nombre de formules qui ont été proposées, le problème des milieux d'indice supérieur à 1,8 n'est pas encore résolu de façon totalement satisfaisante.

Dès 1888, Bertrand proposait d'augmenter l'indice du diiodométhane en y dissolvant soit du soufre, soit du soufre et de l'iode (1). Jusqu'à 1,78, on recourt encore généralement à cette solution.

Anderson et Payne (1934) additionnent de tétra-iodo-éthylène, C_2I_4 (22 % à 15°) la solution de soufre dans le diiodométhane; ils obtiennent une solution stable et limpide d'indice $n_D = 1,81$, dont ils ne donnent ni la dispersion, ni le coefficient de température. Ils mentionnent également la di-iodo-phénylarsine, $C_6H_5AsI_2$, liquide de couleur orangée, pour lequel :

$$n_D^{14^{\circ}5} = 1,8527 \quad \text{et} \quad n_F - n_C = 0,0678 \quad (2).$$

Ils signalent son effet sur la peau et sur les prismes en verre d'indice élevé des réfractomètres. Enfin, toujours d'après ces auteurs, le monobromure de sélénium, préparé par combinaison directe de ses éléments constitutifs, a pour indice $n_{Li} = 1,96 \pm 0,01$. Pur, il ne transmet que le rouge foncé mais, mélangé à la solution de soufre et de tétra-iodo-éthylène dans le diiodométhane mentionnée plus haut, il permet d'obtenir des liquides suffisamment transparents jusqu'à $n_D > 1,90$.

A la suite de Merwin, Larsen et Berman (1934) ont recommandé une solution (3) d'iodoforme, de soufre et de divers iodures dans le diiodométhane (n_D à 20° = 1,868).

Les liquides de West (1936) permettent d'atteindre 2,06 mais, renfermant du phosphore, ils sont de conservation et d'emploi délicats, et leur usage ne semble pas s'être beaucoup répandu.

D'autres auteurs ont proposé des mélanges de corps à points de fusion peu élevés, amorphes ou cubiques à la température ambiante. Ainsi, toujours à la suite de Merwin, Larsen et Berman signalent que des tri-iodures d'arsenic et d'antimoine, dissous dans la pipérine (4), permettent de couvrir l'in-

- (1) - "L'iodure de méthylène dissout à chaud une forte quantité de soufre. Par refroidissement, on obtient de jolis cristaux de soufre octaédrique et un liquide dont l'indice de réfraction est supérieur à 1,8." En fait, l'indice est quelque peu inférieur à 1,8. Pour la raie D, à 20°, il serait de 1,778 d'après Larsen et Berman (1934) et pourrait atteindre 1,794 (Kerr, 1959). Greer (1932) obtient ainsi un indice de 1,79 qu'il porte à 1,83 par addition d'iodoforme; il n'indique ni les proportions, ni le mode de préparation. "En dissolvant de l'iode et du soufre dans l'iodure de méthylène, on obtient un liquide dont l'indice de réfraction est supérieur à 1,85" (Bertrand, op. cit.).
- (2) - Déterminée graphiquement d'après la valeur rectifiée de n_D donnée en 1936 et les valeurs de la dispersion de 1934 (les indices donnés étaient alors trop faibles).
- (3) - "A 100 g de CH_2I_2 , ajouter 35 g d'iodoforme, 10 g de S, 31 g de SnI_4 , 16 g d' AsI_3 et 8 g de SbI_3 . Faire chauffer pour accélérer la dissolution, laisser reposer et filtrer pour débarrasser la solution des solides non dissous." (Larsen et Berman, 1934). Pour la préparation des iodures, voir Fisk (1930).
- (4) - Martens (1932) recommande la pipérine fondue de préférence au baume du Canada comme milieu de montage des minéraux lourds (fonds de batées, etc.). Il fait valoir les avantages que procurent son indice relativement élevé et sa forte dispersion, qui donne naissance à des effets colorés utilisables pour l'identification.

tervalle 1,68-2,10. Ils donnent de façon complète le mode de préparation ainsi que les courbes de mélange, qui ne sont pas linéaires. Ces mélanges sont fluides à une température légèrement supérieure à 100° et ne recristallisent pas par refroidissement s'ils ont été convenablement préparés. D'après ce qu'on a vu précédemment, il n'y a aucun avantage à les employer pour les indices inférieurs à 1,78 ou 1,81. Les mêmes auteurs décrivent également, d'après Merwin et Larsen (1912), des mélanges fondus de S + Se ($n = 2,05$ à $2,72$) et, d'après Merwin, des mélanges de Se + séléniure d'As ($n = 2,72$ à $3,17$). En pratique, la préparation d'un mélange d'indice bien déterminé est assez délicate.

Enfin, pour l'intervalle 2,4-2,8, Barth (1929) a recommandé des mélanges fondus de TlBr et de TlI en proportions convenables. Ces mélanges sont cubiques à froid, à l'exception des mélanges riches en TlI, qui passent rapidement à une forme orthorhombique. Barth donne les courbes de mélange, qui ne sont pas linéaires.

Meyrowitz (1955) a publié une liste commentée très complète des nombreuses combinaisons qui ont été essayées pour obtenir des mélanges d'indices élevés.

Liquides de dispersion élevée

Les méthodes de coloration par dispersion exigent que la dispersion des liquides soit nettement supérieure à celle des minéraux d'indices voisins. III en est généralement ainsi au-dessus de 1,52 à 1,55 environ, mais non pour les indices plus faibles. Par suite, pour ces derniers, les effets colorés avec les liquides d'usage courant sont peu intenses ou même pratiquement inexistant. Pour surmonter cet obstacle, Wilcox (1964) adopte la solution de Crossmon (1959), qui consiste à mélanger un liquide d'indice très faible (quelle que soit sa dispersion) et un liquide d'indice relativement élevé et de dispersion très forte. Pour le premier, il recommande le phosphate de tributyle ou le triacétate de glycéryle et, pour le second, le cinnamate d'éthyle ou la cinnamaldéhyde, dont voici les propriétés.

TABLEAU 10
(d'après Wilcox, 1964)

Corps et formule	25° n_D	$n_F - n_C$	dn/dt	Point d'ébullition °C
Cinnamate d'éthyle (trans) $C_6H_5CH:CHCO_2C_2H_5$	1,558	0,0277	0,00048	271
Cinnamaldéhyde $C_6H_5CH:CHCHO$	1,619	0,0414	0,00050	246
Phosphate de tributyle (n) $(C_4H_9O)_3PO$	1,422	0,0065	0,00037	289 (décomp.)
Triacétate de glycéryle $(CH_3CO_2)_3C_3H_5$	1,429	0,0072	0,00039	259

La dispersion des mélanges de ces corps varie linéairement avec leurs indices. Les mélanges ayant le cinnamate d'éthyle pour constituant de dispersion élevée sont parfaitement stables. L'indice de ceux à base de cinnamaldéhyde diminue avec le temps, cette dernière s'oxydant à l'air, et ils finissent par déposer des cristaux d'acide cinnamique.

Préparation de liquides d'indices donnés

Pour préparer un liquide d'indice n_1 donné à partir de deux liquides, il suffit en principe de mélanger des proportions convenables de ceux-ci. Il est commode de déterminer graphiquement ces proportions, comme l'a indiqué Buerger (1933). Soient A et B les liquides à mélanger, n_A et n_B leurs indices. Les volumes sont portés en abscisses, la distance AB représentant le volume total V désiré de liquide d'indice n_1 . Les indices sont portés en ordonnées. EntrenA et n_B on trace la courbe de mélange (qui est une droite si A et B forment une "solution idéale" au sens de Buerger), et on lit en abscisses les proportions de A et de B correspondant à n_1 .

Dans la mesure du possible, il est toujours indiqué de déterminer au préalable les indices exacts des liquides qui vont être mélangés.

Les mélanges doivent être préparés à température connue et constante.

Une fois un mélange préparé, on détermine son indice, qu'il y a généralement lieu d'ajuster vers le haut ou vers le bas par addition d'une petite quantité du liquide approprié. En effet, les mesures de volumes sont toujours entachées d'erreurs et si, par exemple, $V = 10$ ml, une erreur de $1/20$ ml peut affecter de 0,001 environ l'indice d'un mélange. La pesée peut présenter des avantages.

Liquides du commerce

On trouve dans le commerce des séries de mélanges tout préparés. Bien qu'assez coûteuses à l'achat, il y a souvent avantage à les utiliser car, même si elles servent quotidiennement, les séries durent en général assez longtemps. D'autre part, leur emploi élimine le labeur qu'entraîne la préparation d'une série étendue de liquides à des intervalles rapprochés (de 0,002 en 0,002 par exemple). De plus, étant préparées industriellement, leurs propriétés sont aussi constantes que le permet leur composition. Outre l'indice pour une température et une longueur d'onde déterminées (en général Na), l'étiquette de chaque flacon porte souvent la valeur numérique du coefficient de température ($-dn/dt$). La dispersion est donnée, soit par les valeurs numériques de n_F et de n_C , soit par les grandeurs :

$$n_F - n_C \quad \text{ou} \quad V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} .$$

La gamme la plus complète (actuellement, de 1,300 à 2,11) est celle offerte par la société Cargille.⁽¹⁾ Comme ces liquides sont couramment utilisés dans de nombreux laboratoires, on trouvera ci-après sur eux quelques données puisées dans le catalogue du fabricant et suivies, quand il y a lieu, de brefs commentaires. La composition n'est jamais indiquée avec précision.

(1) - R.P.Cargille Laboratories, Inc., Cedar Grove, N.J. 07009, U.S.A. Agent en France : OSI, 141, rue de Javel, Paris, 15ème.

- 1,300-1,395 "Composés fluocarbonés. Très légèrement volatils. Tolérance 0,0005". Cette série est probablement inspirée de celle de Weaver et McVay (1960).
- 1,400-1,458 "Très stables. Tolérance 0,0002". Aucune donnée sur la composition. Cette série est peut-être inspirée de la partie supérieure de celle de Buerger (1931).
- 1,460-1,640 "Les plus stables. Jaune très pâle vers la partie supérieure. Tolérance 0,0002". Aucune donnée sur la composition. La série est peut-être inspirée de celles de Kunz et Spulnik (1936) ou de Butler (1933), mais la dispersion y est moins élevée que dans cette dernière (Wilcox, 1964).
- 1,642-1,70 "Très bonne stabilité, mais diminuant en raison inverse de l'indice. Tolérance 0,0002. De jaune à jaune-brun suivant indices croissants". Aucune donnée sur la composition. Peut-être à base de 1-chloronaphtalène et de 1-iodonaphtalène.
- 1,705-1,80 "A base de diiodométhane. Tolérance 0,0005".
- 1,705-1,735 "L'indice diminue par évaporation du diiodométhane". Probablement analogue aux membres correspondants des séries de Darneal (1948) ou de Fujii et Bloss (1962).
- 1,74-1,78 "Jaunes. Contiennent du soufre. L'indice augmente par évaporation du diiodométhane et il peut alors s'y former des cristaux". Vraisemblablement diiodométhane additionné de quantités variables de soufre, sans autres constituants.
- 1,79-1,80 "Comme les précédents, avec addition d'iodures. Rouge foncé". Probablement dérivés des liquides de Merwin (1913) et de Larsen et Berman (1934).
- 1,80-2,00 "Bien stables. Jaunes à bruns. Toxiques et corrosifs". C'est vraisemblablement la série de Meyrowitz et Larsen (1951).
- 2,01-2,11 "Analogues aux précédents, mais plus sombres par suite de la présence de sélénium". C'est vraisemblablement la série de Meyrowitz (1952).

Outre les liquides examinés dans ce chapitre, on en a décrit beaucoup d'autres, notamment des solutions aqueuses plus ou moins concentrées de divers sels. Ces solutions peuvent être utiles pour l'étude des cristaux organiques, souvent affectés par les liquides qui viennent d'être examinés. En raison de la tension de vapeur de l'eau, leurs indices sont moins stables que ceux de liquides organiques convenablement choisis, et elles ne présentent qu'occasionnellement un intérêt pour l'étude des minéraux.

Enfin, dans certains cas, on peut être contraint, pour étudier un corps, d'utiliser des liquides dans lesquels il est soluble. On y parvient en saturant les liquides du corps à étudier. Les indices des solutions saturées doivent bien entendu être mesurés avant d'effectuer les observations.

CHAPITRE VI

PREPARATION DES FROTTIS

Il est bon de faire précéder l'étude par immersion d'un examen à la loupe et de noter les caractères des particules : faciès, présence de faces cristallines ou de clivages.

Les préparations se font commodément sur lames de 76 x 26 mm comportant une extrémité dépolie sur laquelle on inscrit le numéro de l'échantillon et l'indice du liquide d'immersion.

On dépose sur la lame une goutte de liquide, on y trempe la pointe d'une aiguille montée, qui est ensuite mise en contact avec les particules; celles-ci y adhèrent, ce qui permet de les transférer dans le liquide. Eventuellement, cette opération se fait sous la loupe binoculaire. On recouvre d'un couvre-objet et ajoute s'il y a lieu du liquide qu'on dépose au bord du couvre-objet, sous lequel il pénètre par capillarité. La lame est prête à être examinée. Les lamelles qui servent à recouvrir les lames minces sont inutilement grandes pour les frottis, et il suffit d'en employer de petits fragments. Ceci procure une économie de liquide, appréciable notamment lorsqu'on examine des particules relativement volumineuses; de plus, on peut ainsi faire éventuellement plusieurs montages dans des liquides différents sur une même lame.

La préparation que doit subir le minéral dépend de la forme sous laquelle il se présente. Les cristaux de dimensions convenables sont examinés tels quels. Dans certains cas, l'échantillon est concassé, tamisé et le minéral à étudier concentré s'il y a lieu, le plus souvent par des méthodes gravimétriques ou électromagnétiques. Pour les petites quantités, il est commode d'utiliser pour le tamisage deux ou trois tubes courts en laiton, pénétrant l'un dans l'autre avec un jeu juste suffisant pour maintenir tendus des morceaux de tissu de soie à tamis d'ouverture convenable. Dans d'autres cas, notamment lorsqu'on veut examiner des fragments de clivage, on sélectionne les grains un à un sous la loupe binoculaire. Il est souvent suffisant de détacher d'un échantillon quelques particules à l'aide d'une pointe vibrante telle que le "Vibro-graveur" Burgess. Si les particules sont trop grosses, on les place dans un petit mortier d'agate, on les recouvre de quelques gouttes d'alcool pour empêcher les fragments de se disperser, on les écrase par choc léger ou par pression et on laisse l'alcool s'évaporer; on peut ensuite tamiser ou prélever directement quelques particules de dimensions convenables avec la pointe de l'aiguille.

Un procédé rudimentaire, parfois suffisant, consiste à placer dans la goutte de liquide d'immersion une particule un peu plus grosse qu'il n'est nécessaire et à l'écraser directement sur la lame, par pression d'un petit pilon d'agate. Ce dernier procédé, rapide, présente l'inconvénient de produire des particules de granulométrie très hétérogène, ce qui consomme davantage de liquide et peut être gênant avec les objectifs puissants. En effet, avec ces derniers, il est nécessaire que toutes les particules soient sensiblement de

même grosseur, car une seule grosse particule peut surélever suffisamment le couvre-objet pour qu'il vienne en contact avec l'objectif au moment de la mise au point, ce qui suffit en général, soit à faire sortir du champ la particule étudiée, soit à empêcher de la mettre au point. De plus, lorsqu'on emploie le "masquage focal", le non-parallélisme du couvre-objet et de la lame a pour effet de décentrer l'éclairage, ce qui affecte les couleurs que l'on devrait normalement observer.

Dans tous les cas, mais notamment avec l'éclairage à fond noir, il est désirable que la préparation ne soit pas encombrée de particules trop fines; il y en a toujours dans les fractions obtenues par broyage et tamisage, où elles nuisent d'ailleurs aux séparations gravimétriques et magnétiques. Pour s'en débarrasser commodément, on agite la poudre dans un bécher rempli aux trois quarts d'eau; on laisse reposer quelques instants, décante une partie de l'eau renfermant la poussière en suspension, recommence jusqu'à ce que la partie surnageante soit limpide, décante, rince une ou deux fois à l'alcool pour enlever la plus grande partie de l'eau, et fait sécher quelques minutes à l'étuve. Bien entendu, ce procédé ne peut être appliqué sans modifications à tous les minéraux.

Il est facile de reconnaître au microscope les fragments de clivage limités à leurs parties inférieure et supérieure par deux surfaces planes et parallèles, au fait qu'ils présentent, sauf sur leurs bords, une teinte d'interférences uniforme ou quasi-uniforme. Lorsqu'une particule repose sur la lame par des clivages en gradins (Fig. 30), l'orientation du plan de clivage et, par suite, celle de l'ellipsoïde par rapport à l'axe du microscope est changée, d'où des erreurs. On reconnaît ces particules aux caractères suivants :

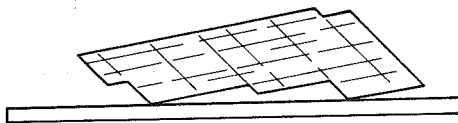


Figure 30. - Vue en coupe d'un fragment d'amphibole reposant sur la lame par des clivages en gradins.

- les teintes d'interférences ne sont pas sensiblement uniformes dans une même particule (il est normal d'observer des variations des teintes d'interférences sur les bords de toutes les particules).
- avec un objectif puissant, on peut constater que les différents points de la partie supérieure d'une particule ne se trouvent pas dans un seul plan parallèle à celui de la platine, mais qu'il faut agir sur la vis micrométrique pour les mettre successivement au point.

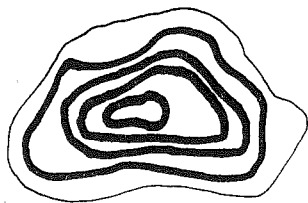


Fig. 31

Les particules monocristallines non limitées par des surfaces de clivage ou par des faces cristallines montrent entre nicols croisés des lignes isochromatiques (Fig. 31) évoquant des courbes de niveau. Ce sont des courbes d'égale épaisseur (lieux des points de même retard).

Il est souvent nécessaire d'extraire une particule observée dans un frottis, en vue de son examen dans d'autres liquides, soit parce qu'elle est unique, soit parce qu'on désire connaître les caractères optiques d'un grain bien déterminé, par exemple, en liaison avec une étude radiocristallographique. Bien que les techniques varient d'un opérateur et d'un cas particulier à un autre, les renseignements ci-après pourront servir de guides.

On peut d'abord enlever la plus grande partie du liquide à changer à l'aide d'un papier filtre, puis rincer trois ou quatre fois la particule en la recouvrant de quelques gouttes d'un solvant approprié, qu'on enlève chaque fois de même. Après avoir laissé sécher et s'être assuré qu'il ne reste pas trace de liquide, on recouvre avec le nouveau liquide. Si l'on opère ainsi, il est préférable que la particule n'ait pas été recouverte d'une lamelle. Dans le cas contraire, on peut se placer au-dessus d'un petit verre de montre et rincer successivement le couvre-objet et la lame (dont on aura incliné un des angles vers le bas, au-dessus du verre de montre), avec un peu de solvant s'écoulant d'un compte-gouttes; une fois la particule entraînée dans le verre de montre, on continue comme on l'a vu. Cette façon de procéder n'est qu'un pis-aller, car il est facile de perdre ainsi une petite particule; dans ce cas, l'usage de lames portant une petite dépression dans laquelle prend place la particule peut parfois être utile.

D'autres méthodes ont été proposées. Calkins (1934) applique légèrement sur la particule désirée l'extrémité d'un fil mince, enduite d'un adhésif (vaseline ou baume). Lindberg (1944) suggère d'aspirer la particule, en même temps qu'un peu du liquide, avec un compte-gouttes de diamètre convenable. Il est souvent plus simple de repérer la particule désirée, de placer la préparation sous une loupe binoculaire (qui présente l'avantage de ne pas inverser les images), d'entraîner peu à peu le grain hors du liquide avec une aiguille montée et de l'amener sur la partie dépolie de la lame, où il est mieux retenu. Après l'avoir rincé comme on l'a vu, on laisse évaporer le reste du solvant, et la particule est prête à être transférée dans un autre liquide.

On peut avoir à déterminer l'indice d'un grain observé dans une lame mince.

Si le grain est situé près du bord de la lame, Rogers (1960) suggère de dissoudre le baume du Canada adjacent en plongeant la section dans le xylol. On suit à la loupe le progrès de la dissolution et on l'arrête par rinçage à l'acétone lorsque le xylol a atteint le bord du grain. On fait sécher et introduit le liquide approprié sous la lamelle. Chaque changement de liquide est précédé d'un rinçage à l'acétone. Une limitation de la méthode, à laquelle l'auteur ne fait pas allusion, tient au fait que le baume du Canada est plus ou moins soluble dans de nombreux liquides organiques. Il faut donc opérer rapidement. Pour s'assurer que le baume n'est pas soluble dans le liquide employé, on dépose une goutte de ce dernier sur une lame, on y plonge une minuscule particule de baume et on observe son comportement sous le microscope.

Pour extraire un cristal d'une lame, Wallace (1955) a proposé la méthode suivante. A défaut d'une lame non couverte d'épaisseur supérieure à la normale, spécialement préparée, la lame est débarrassée de son couvre-objet et du baume qui recouvre la préparation. Avec une aiguille bien pointue, on pratique tout autour du grain une série de "piqûres", espacées de deux à trois fois leur diamètre. On applique une ou, successivement, plusieurs gouttes d'un solvant puis, toujours avec l'aiguille, on agrandit les trous jusqu'à ce qu'ils se rejoignent. Eventuellement, on ajoute peu à peu du solvant jusqu'à ce que la particule se déplace sous une légère pression de l'aiguille, puis on l'extrait en glissant sous elle la pointe de l'aiguille. La particule est déposée sur une lame et nettoyée. On opère sous la loupe binoculaire.

CHAPITRE VII

IDENTIFICATION DES PLAGIOCLASES PAR LA METHODE DE TSUBOI

La meilleure application qui ait été faite de l'emploi des caractères optiques des fragments de clivage pour l'identification des minéraux est probablement la méthode de détermination des plagioclases due à Tsuboi (1923). La connaissance de la composition de ces minéraux ayant une grande importance en pétrologie, un aperçu de la méthode paraît à sa place ici. Morse (1968) en a donné un excellent exposé auquel on pourra éventuellement se reporter. On trouvera dans le mémoire de Tsuboi les relations qui lui ont servi à calculer les indices non principaux.

Principe

Tous les feldspaths possèdent un clivage parfait 001 et un clivage 010, souvent dit "moins facile" (1). Par suite, lorsqu'un feldspath est pulvérisé par choc, la poudre obtenue renferme de nombreux fragments de clivage. Après avoir sélectionné neuf plagioclases dont la composition, l'orientation et les indices de réfraction étaient connus aussi exactement que possible, Tsuboi a calculé les indices n_p' et n_g' dans ces fragments de clivage et porté en graphique les valeurs obtenues, en fonction de la composition.

Pour une même composition, les valeurs de n_g' diffèrent suivant qu'elles sont mesurées sur un clivage 001 ou sur un clivage 010. Par contre, pour les plagioclases de basse température, les courbes de n_p' sont pratiquement confondues, que cet indice ait été mesuré sur 010 ou sur 001 : l'écart maximal n'est que d'environ 2 % d'An dans la région calcique, et moindre ou parfois nul ailleurs.

Les courbes de n_p' sont également pratiquement confondues, que le plagioclase soit de basse ou de haute température. Il n'en est autrement que de An0 à An3, où les courbes de Burri et al. (1967) donnent, pour Ab100, $n_p' = 1,527$ si l'albite est de haute température, et 1,529 si elle est de basse température, et aussi à partir de An80, où l'application de la courbe de basse température à un plagioclase de haute température peut entraîner une erreur maximale de - 4 % d'An environ.

A ces réserves près, la mesure du plus petit indice de fragments de clivage donne la composition des plagioclases rapidement et avec une exactitude tout à fait satisfaisante.

Choix des particules

Dans tous les cas, il faut choisir des fragments ayant une teinte d'interférences basse (fragments minces) et bien uniforme (pour éviter les erreurs dues aux clivages en gradins).

(1) - D'autres clivages "difficiles" ou "imparfaits" ont été signalés, notamment 110 et $1\bar{1}0$. Sauf peut-être dans certains cas particuliers, ils ne causent généralement pas de difficultés sérieuses.

Clivages 001. - Ce sont les plus fréquents. Ils montrent généralement les macles de l'albite, parfaitement nettes. Ils peuvent être limités sur un bord ou sur deux bords opposés par la trace du clivage 010. Contrairement à ce qui se passe dans les lames minces, où toutes les sections appartenant à la zone normale à 010 ont même aspect, la mesure des angles d'extinction dans ces fragments peut servir à confirmer une détermination; on se reportera aux courbes publiées.

Clivages 010. - D'après divers auteurs, les fragments 010 sont souvent plus petits et moins nombreux que les précédents. En fait, la facilité et la qualité des clivages peuvent varier d'un échantillon à un autre. Les fragments

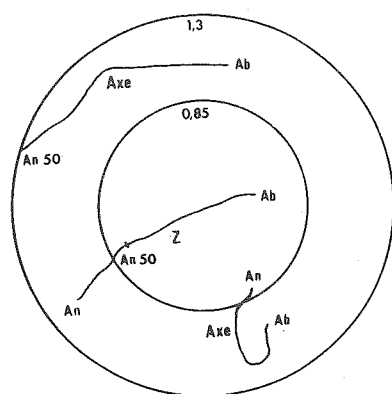


Fig. 32. - Projection stéréographique montrant la migration des pôles des axes optiques et de Z dans les clivages 010 des plagioclases de basse température.

010 sont souvent limités par deux bords opposés rectilignes et parallèles, traces du clivage parfait 001. Deer et al. (1963) signalent qu'ils présentent souvent un contour plus anguleux que les clivages 001, dû à l'intersection du clivage 001 avec le plan de séparation 100 à environ 64°. Ce plan n'est pas mentionné dans les traités usuels. Les clivages 010 ne montrent pas la macle de l'albite, mais peuvent montrer celle du péricline, qui n'est parallèle à la trace de 001 que pour l'andésine. Jusqu'à An60 environ, la direction Z (bissectrice tantôt aiguë, tantôt obtuse) émerge toujours dans le champ des objectifs à sec. Pour les plagioclases plus calciques, l'immersion par méthode de l'observer. La figure 32 montre ce qui apparaît dans le champ de deux objectifs (O.N. 0,85 et O.N. 1,3).

Dans ce qui suit, on laisse de côté les feldspaths barytiques et les plagioclases de haute température.

Mode opératoire

A - Sans variation de la longueur d'onde

On dispose d'une gamme de liquides couvrant l'intervalle voulu, de 0,002 en 0,002. Les frottis sont préparés comme on l'a vu plus haut. Les déterminations sont faites en lumière du sodium. A défaut d'un moyen de régler la température, on utilise la méthode de Morse (p. 40).

- 1 - Lorsqu'on ignore si le feldspath étudié est ou non un plagioclase, on fait un premier frottis avec le liquide $n_D = 1,526$. Si n_p' est supérieur à 1,526, le feldspath est un plagioclase.
- 2 - Faire un second frottis avec le liquide $n_D = 1,555$ ($= n_p'$ pour An50) :
 - Si $n_p' > 1,555$, An > 50
 - Si $n_p' < 1,555$, An < 50
- 3 - Si par exemple $n_p' < 1,555$, préparer un troisième frottis avec le liquide $n_D = 1,540$, et ainsi de suite. Lorsque l'indice du liquide se rapproche de n_p' , on est guidé par l'apparition d'effets colorés en lumière blanche et par l'intensité des franges de Becke. Si les indices d'une particule sont

tous deux supérieurs à celui du liquide, la frange la moins intense correspond à n_p' ; s'ils sont tous deux inférieurs à celui du liquide, c'est la frange la plus intense qui correspond à n_p' ; si l'un est supérieur et l'autre inférieur à celui du liquide, il n'y a évidemment aucune difficulté. On est ainsi guidé dans le choix du liquide suivant.

- 4 - Lorsqu'on connaît n_p' à l'approximation désirée ou possible, on porte sa valeur sur la figure 33. L'axe des abscisses ayant exactement 10 cm de longueur, on lit facilement la composition en superposant au graphique une feuille de papier millimétré transparent (1 mm = 1 % An).

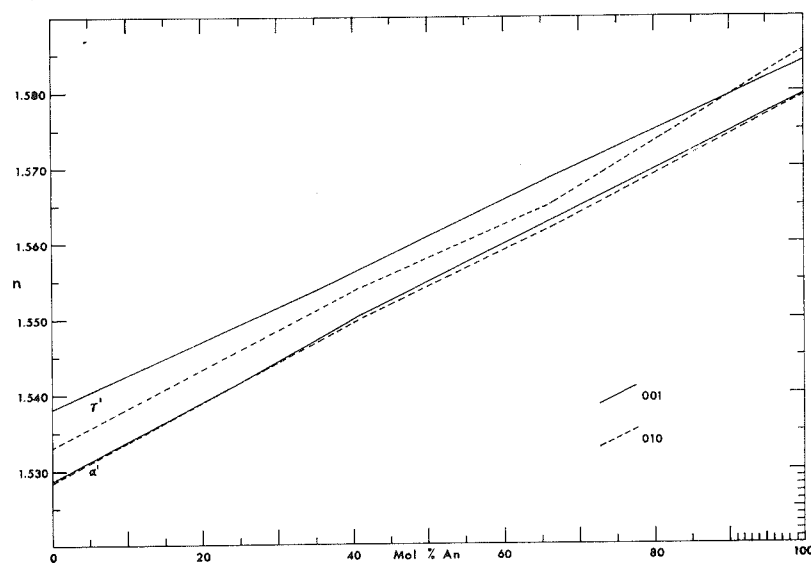


Fig. 33. - Indices de réfraction des fragments de clivage 001 et 010 des plagioclases de basse température (Morse, 1968).

Lorsque les déterminations ont été faites à une température autre que celle d'étalonnage des liquides, on corrige comme on l'a vu. Si on a dû opérer en lumière blanche, diminuer de 0,001 les indices observés pour obtenir une approximation des indices en lumière du sodium.

B - Avec variation de la longueur d'onde

Si on dispose d'un monochromateur ou d'un filtre interférentiel continu, Tsuboi (1923, 1930) a montré l'intérêt d'utiliser la dispersion des indices n_p' (de 0,008 à 0,010 suivant la composition) et celle des liquides d'immersion (de 0,015 à 0,020 environ pour les liquides le plus souvent utilisés). Le principe consiste à chercher un liquide dont l'indice soit égal à n_p' pour une longueur d'onde λ quelconque du spectre visible. Connaissant la dispersion du liquide et celle du plagioclase, on en tire l'indice n_p' de ce dernier pour la raie D, d'où sa composition. Par rapport à la méthode précédente, les déterminations sont plus rapides et nécessitent un moins grand nombre de liquides.

La planche 5 reproduit le graphique utilisé. Dû à Tsuboi (1930), il a été retouché par Morse (1968). C'est un graphique de Hartmann sur lequel ont été portés les indices n_p' dans les clivages 001 des plagioclases de basse

température, pour la raie D, de An0 à An100, et de 1 % en 1 % d'An. Par chacun de ces points on a fait passer une droite ayant pour pente la dispersion du plagioclase correspondant. L'exemple suivant illustre son emploi.

Exemple

Les observations sont d'abord supposées faites à 25°.

- 1 - Dans le liquide d'indice $n_D = 1,550$ ($n_F - n_C = 0,0173$), l'indice n_p d'un certain plagioclase est toujours inférieur à celui du liquide, quelle que soit la longueur d'onde de la lumière.
- 2 - Dans un second frottis, préparé par exemple avec un liquide d'indice $n_D = 1,530$ ($n_F - n_C = 0,0152$), il y a égalité entre n_p et l'indice du liquide pour $\lambda = 525$ nm.
- 3 - Par le point d'abscisse $\lambda = 589$ nm et d'ordonnée $n = 1,530$, faire passer une droite de pente $n_F - n_C = 0,0152$, dispersion du liquide utilisé (voir p. 33). A $\lambda = 525$ nm, cette droite recoupe une des droites qui représentent la dispersion des plagioclases.
- 4 - Suivre cette dernière droite jusqu'au bord droit de l'abaque. On lit la composition : An 8 (en molécules).

Ici aussi, il faut tenir compte de la température. Si, toutes les autres données étant les mêmes, la température au moment de l'expérience avait été de 20°C, le coefficient $-dn/dt$ étant de 0,0004, il aurait fallu faire passer la droite représentant la dispersion du liquide par le point correspondant à $n_D = 1,532$, et le plagioclase aurait eu pour composition An 12 % (en molécules).

Enfin, si une grande exactitude n'est pas nécessaire ou si on désire faire un examen rapide d'un grand nombre de plagioclases, par exemple pour avoir une idée générale de l'ampleur et du sens des variations de composition des plagioclases dans une formation différenciée, on peut recourir aux liquides de forte dispersion de Wilcox (p. 70). Deux de ces liquides (par exemple, triacétate de glycéryle + cinnamate d'éthyle et cinnamate d'éthyle pur) couvrent l'intervalle de An0 à An80. Trois liquides suffisent de An0 à An100. Une fois connu l'intervalle dans lequel sont susceptibles de varier les indices d'une série de plagioclases provenant d'une même formation, un seul mélange de composition appropriée pourra souvent suffire.

Cette dernière façon de procéder est à recommander dans les cas indiqués plus haut. Elle ne dispense évidemment pas des mesures plus précises qui peuvent être nécessaires.

Remarques

- 1 - A défaut d'un contrôle de la température, une connaissance aussi exacte que possible de celle-ci est indispensable. En effet, une variation d'indice de 0,001 (2° à 2°5 environ) correspond à une variation d'environ 2 % d'An.
- 2 - La méthode repose sur la relation qui existe entre la composition chimique et les indices de réfraction. Il est donc vain d'essayer de l'appliquer à des plagioclases trop altérés.
- 3 - Les échantillons étudiés doivent posséder des clivages assez bons pour donner des fragments utilisables. Dans des cas particuliers, certains auteurs ont trouvé gênante la présence de clivages prismatiques de trop bonne qualité (Hess, 1960).
- 4 - La présence de potassium ne paraît pas affecter sensiblement les indices (Deer et al., 1963; Morse, 1969).

5 - Dans chaque frottis, il est nécessaire d'examiner plusieurs fragments, pour tenir compte des variations possibles dans plusieurs particules tirées d'un même échantillon (voir p. 37). Lorsque les plagioclases sont zonés, les indices peuvent varier de façon appréciable. La méthode se prête bien à leur étude. Voici par exemple ce qu'a obtenu Morse (1969) sur les plagioclases de deux troctolites et d'un gabbro provenant de l'intrusion de Kiglapait, au Labrador :

	Troctolites		Gabbro
Par analyse chimique :			
An (molécules %)	62,7	64,4	40,3
Or (molécules %)	0,9	1,4	5,7
Par voie optique :			
n_p' dans 001 (Na) (moyenne)	1,5615	1,5620	1,5503
An (moyenne, en molécules %)	63,1	64,0	40,4
Compositions extrêmes (molécules d'An %)	61 à 67	63 à 67	35 à 46
Nombre de grains étudiés	25	53	20

ANNEXE

TRACÉ DES ARCS DE GRANDS CERCLES

Le tableau 11 ci-dessous donne les nombres N par lesquels il faut multiplier le demi-rayon du cercle de projection pour obtenir les rayons des arcs de grands cercles inclinés de 1° à 89° sur le plan horizontal de projection.

TABLEAU 11

Angle, degrés	N	Angle, degrés	N	Angle, degrés	N
1	2,000	31	2,333	61	4,125
2	2,001	32	2,358	62	4,260
3	2,003	33	2,385	63	4,405
4	2,005	34	2,412	64	4,562
5	2,008	35	2,442	65	4,732
6	2,011	36	2,472	66	4,917
7	2,015	37	2,504	67	5,119
8	2,020	38	2,538	68	5,339
9	2,025	39	2,574	69	5,581
10	2,031	40	2,611	70	5,848
11	2,037	41	2,650	71	6,143
12	2,045	42	2,691	72	6,472
13	2,053	43	2,735	73	6,841
14	2,061	44	2,780	74	7,256
15	2,071	45	2,828	75	7,727
16	2,081	46	2,879	76	8,267
17	2,091	47	2,933	77	8,891
18	2,103	48	2,989	78	9,619
19	2,115	49	3,049	79	10,482
20	2,128	50	3,111	80	11,518
21	2,142	51	3,178	81	12,785
22	2,157	52	3,249	82	14,371
23	2,173	53	3,323	83	16,411
24	2,189	54	3,403	84	19,134
25	2,207	55	3,487	85	22,947
26	2,225	56	3,577	86	28,671
27	2,245	57	3,672	87	38,210
28	2,265	58	3,774	88	57,307
29	2,287	59	3,883	89	114,597
30	2,309	60	4,000		

Lorsque le diamètre du cercle de projection ne dépasse pas 20 cm, la plupart des compas permettent de tracer les arcs de grands cercles jusqu'à

60° environ. Pour en simplifier le tracé, la planche 6 donne les positions de leurs centres de 2° en 2°, pour un cercle de projection de 20 cm de diamètre.

Au-delà de 60° à 70°, il est souvent plus simple de remplacer les compas par l'appareil de Penfield (Fig. 34), qu'on construit aisément soi-même.

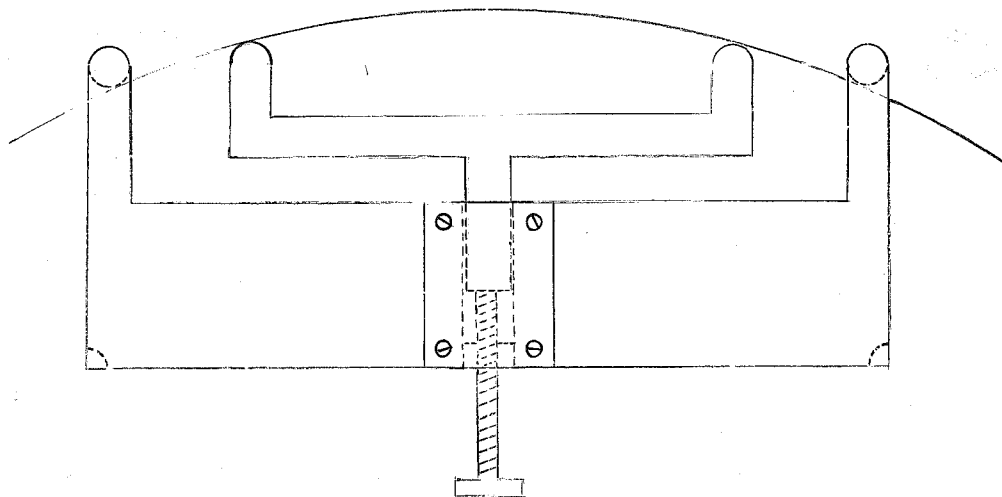


Fig. 34. - Schéma de principe de l'appareil de Penfield
(1/3 de la grandeur réelle).

Il consiste en une mince lame ou tige élastique (les baleines de parapluie conviennent très bien) portant sur deux butées fixes, séparées par une distance supérieure de moitié environ au diamètre du cercle de projection. Entre elles, deux autres butées sont solidaires d'un bras mobile. Une vis permet de faire mouvoir le bras dans une direction perpendiculaire à la droite qui joint les butées alignées. Les butées mobiles portent ainsi sur la lame et lui impriment toute courbure non excessive désirée.

Pour l'emploi, on superpose l'appareil à un canevas de diamètre convenable et on agit sur la vis jusqu'à ce que la lame coïncide avec l'arc voulu. La courbe est sensiblement un arc de cercle, qu'on trace en reportant l'appareil sur le dessin en position voulue et en tenant le crayon appliqué contre la partie externe de la lame.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON, B.W. et PAYNE, C.J. (1934). - Liquids of high refractive index. *Nature*, G.B., 133, 66.
- ANDERSON, B.W. et PAYNE, C.J. (1936). - Liquids of high refractive index. *Nature*, G.B., 138, 168.
- BARLOW (1940). - Tables des carrés, cubes, racines carrées, racines cubiques et inverses de tous les nombres entiers de 1 à 10.000. Béranger, Paris.
- BARTH, Tom F.W. (1929). - Some new immersion melts of high refraction. *Amer. Mineralogist*, 14, 338.
- BERTRAND, E. (1888). - Liquides d'indices supérieurs à 1,8. *Bull. Soc. fr. Minéral.*, XI, 31.
- BLOSS, F.D. (1961). - An introduction to the methods of optical crystallography. Holt, Rinehart and Winston, New-York.
- BORDET, P. (1968). - Précis d'optique cristalline. Masson, Paris.
- BOSAZZA, V.L. (1940). - Notes on refractive index liquids. *Amer. Mineralogist*, 25, 299.
- BOUASSE, H. (1925). - Optique cristalline. Double réfraction. Polarisation rectiligne et elliptique. Delagrave, Paris.
- BROWN, K.M. et McCrone, W.C. (1963). - Dispersion staining. Part I : Theory, method and apparatus. *Microscope*, G.B., 13, 311.
- BROWN, K.M., McCrone, W.C., KUHN, R. et FORLINI, L. (1963). - Dispersion staining. Part II: The systematic application to the identification of transparent substances. *Microscope*, G.B., 14, 39.
- BUERGER, M.J. (1931). - Immersion liquids of low refraction. *Amer. Mineralogist*, 16, 45.
- BUERGER, M.J. (1933). - The optical properties of ideal solution immersion liquids. *Amer. Mineralogist*, 18, 325.
- BURRI, C. et coll. (1967). - Die optische Orientierung der Plagioklase. Bestimmungstafeln. Birkhäuser, Basel und Stuttgart.
- BUTLER, R.D. (1933). - Immersion liquids of intermediate refraction. *Amer. Mineralogist*, 18, 386.
- BUTTGEBACH, H. (1935). - Les minéraux et les roches. Dunod, Paris.
- CALKINS, F.C. (1934). - Transfer of grains from one liquid to another. *Amer. Mineralogist*, 19, 143.
- CHERKASOV, Yu.A. (1957). Application of focal screening to measurement of indices of refraction by the immersion method. (Traduction par Ivan Mittin in *International Geology Review*, 2, 218 (1960)).
- CHRISTOPHE-MICHEL-LEVY, M. (1959). - Tableaux des minéraux des roches. C.N.R.S., Paris.
- CROSSMON, G. (1959). - Chemical microscopy in the optical industry. Symposium on microscopy. *Amer. Soc. Testg. Mater.*, Spec. Tech. Publ. 257, 28.
- DARNEAL, R.L. (1948). - Immersion media containing methylene iodide. *Amer. Mineralogist*, 33, 346.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. et ZUSSMAN, J. (1963). *Rock-forming minerals*, vol. 4. Longmans, London.
- DE JONG, W.F. (1959). - General crystallography. Freeman, San Francisco.
- DENAEYER, M.E. (1951). - Tableaux de pétrographie. Lamarre, Paris.
- DODGE, N.B. (1948). - The dark-field color immersion method. *Amer. Mineralogist*, 33, 541.
- DUPARC, L. et PEARCE, F. (1903). - Sur les constantes optiques de quelques minéraux, et sur les variations de ces constantes sur les divers individus d'une même roche. *Bull. Soc. fr. minéralogie*, XXXI, 94.
- EMMONS, R.C. (1928). - The double dispersion method of refractive index determination. *Amer. Mineralogist*, 13, 504.
- EMMONS, R.C. (1929 a). - The double variation method of refractive index determination. *Amer. Mineralogist*, 14, 414.
- EMMONS, R.C. (1929 b). - A modified universal stage. *Amer. Mineralogist*, 14, 441.
- EMMONS, R.C. (1929 c). - A set of thirty immersion media. *Amer. Mineralogist*, 14, 482.
- EMMONS, R.C. (1943). - The universal stage. *Geol. Soc. Amer.*, Mem. 8.
- EMMONS, R.C. et GATES, R.M. (1948). - The use of Becke line colors in refractive index determination. *Amer. Mineralogist*, 33, 612.
- FAIRBAIN, H.W. (1943). - Gelatincoated slides for refractive index immersion mounts. *Amer. Mineralogist*, 28, 396.
- FERGUSON, R.B. et PEACOCK, M.A. (1943). - Measurement of the three principal indices of refraction in micaceous minerals on a tilting stage. *Amer. Mineralogist*, 28, 563.

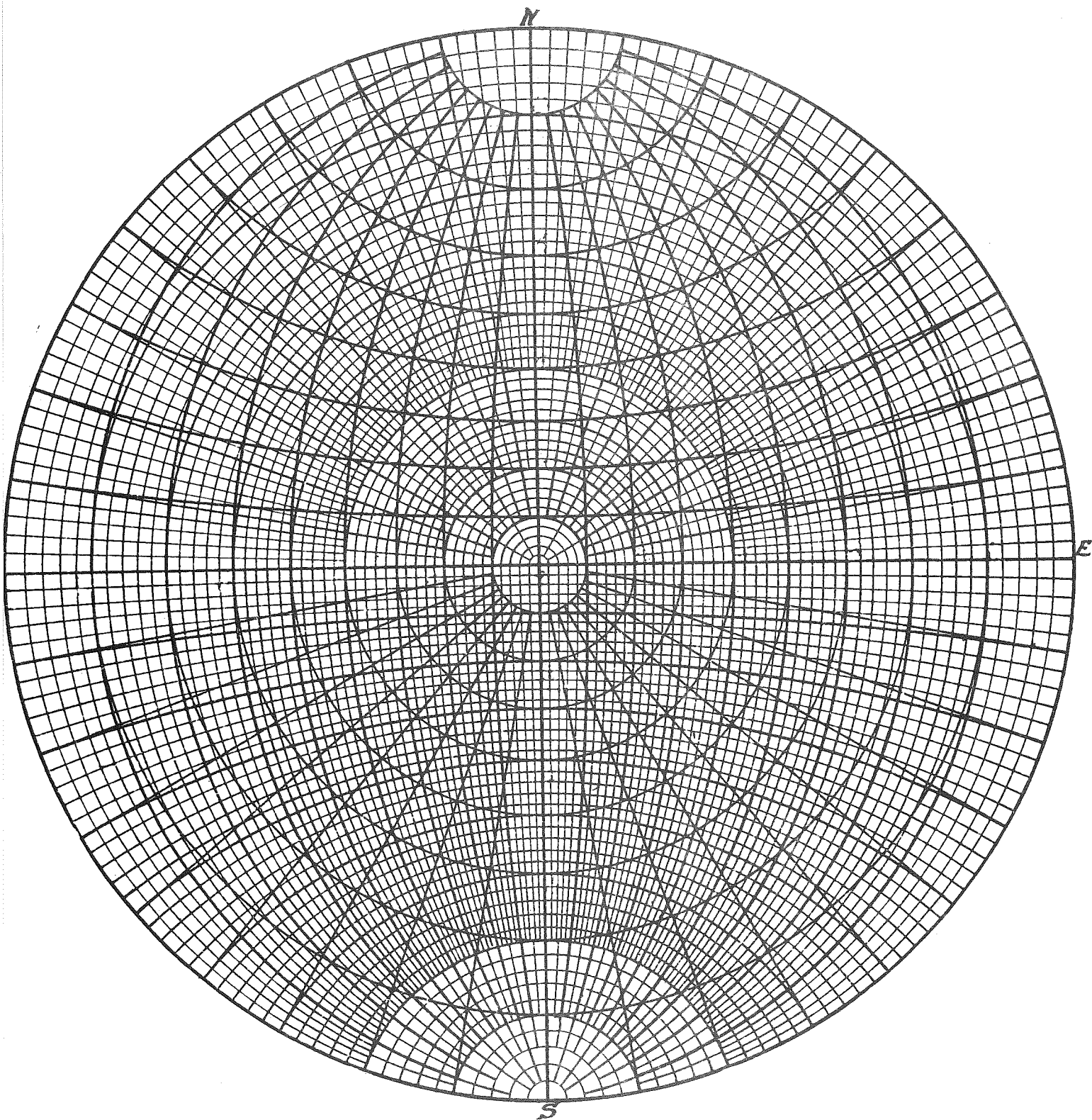
- FISHER, D.J. (1962). - Temperature control spindle stage. *Amer. Mineralogist*, 47, 649.
- FISK, H.G. (1930). - Preparation and purification of the tri-iodides of antimony and arsenic for use in immersion media of high refractive index. *Amer. Mineralogist*, 15, 263.
- FORD, W.E. (1932). - Dana's Textbook of Mineralogy. Wiley, New-York.
- FORLINI, L. (1969). - Expanded and revised tables for the determination of unknowns by dispersion staining. *Microscope*, G.B., 17, 29.
- FRIEDRICH, K. et coll. (1961). - Identität von Wathlingenit mit Kieserit. Kali u. Steinsaltz, Dtsch., 221.
- FUJII, T. et BLOSS, F.D. (1962). - Some properties of alpha-monochloronaphtalene-diiodomethane immersion media. *Amer. Mineralogist*, 47, 267.
- GAUBERT, P. (1922). - Mesure des indices de réfraction d'un solide par immersion dans un liquide porté à une température déterminée. *Bull. Soc. franç. Minéral.*, 45, 89.
- GAZZI, P. (1963). - On the microscopic determination of the amphiboles in grains. *Amer. Mineralogist*, 48, 422.
- GILLBERG, M. (1960). - The error caused by inexact orientation in the determination of refractive indices of minerals by the immersion method. *Ark. Mineral. Geol., Sverige*, 2, 509.
- GRAULT, J.P. (1950). - A new method for measuring the refractive indices in micaceous minerals. *Amer. Mineralogist*, 35, 420.
- GREER, W.L.C. (1932). - Mix-crystals of Ca_2SiO_4 and Mn_2SiO_4 . *Amer. Mineralogist*, 17, 135.
- HADNI, A. et coll. (1969). - Constantes optiques du sulfate de glycolle de l'infrarouge proche à l'infrarouge lointain. *J. Phys., Fr.*, 30, 377.
- HAFF, J.C. (1940). - Use of the Wulff net in mineral determination with the universal stage. *Amer. Mineralogist*, 25, 689.
- HAGNER et coll. (1965). - Optical and chemical variations in minerals from a single rock specimen. *Amer. Mineralogist*, 50, 341.
- HARTSHORNE, N.H. (1963). - A simple single-axis rotation apparatus. *Mineral. Mag., G.B.*, 33, 693.
- HARTSHORNE, N.H. et STUART, A. (1970). - Crystals and the polarizing microscope. Arnold, London.
- HEINRICH, E. Wm. (1965). - Microscopic identification of minerals. McGraw-Hill, New-York.
- HESS, H.H. (1960). - Stillwater igneous complex, Montana : a quantitative mineralogical study. *Geol. Soc. Amer., Mem.* 80.
- HURLBUT, C.S., Jr. et WENDEN, H.E. (1951). - Beryl at Mount Mica, Maine. *Amer. Mineralogist*, 36, 751.
- HUTTON, C.O. (1950). - Studies of heavy detrital minerals. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 61, 635.
- JEFFRIES, C.D. (1961). - Gelatin mounts for mineral grains. *Amer. Mineralogist*, 46, 458.
- JOHANNSEN, A. (1918). - Manual of petrographic methods. McGraw-Hill, New-York, (Edition 1968 en facsimile, Hafner, New-York).
- KERR, P.F. (1959). - Optical mineralogy. McGraw-Hill, New-York.
- KUNZ, A.H. et SPULNIK, J. (1936). - Standard liquids for the microscopic determination of refractive index. *Industr. Engng. Chem., Anal. Ed.*, 8, 485.
- LANGFORD, F.F. (1962). - Epoxy resins for oil immersion and heavy mineral studies. *Amer. Mineralogist*, 47, 1478.
- LARSEN, E.S. et BERMAN, H. (1934). - The microscopic determination of the nonopaque minerals. *Geol. Surv., Bull., U.S.A.*, 848.
- LINDBERG, M.L. (1944). - A method for isolating grains mounted in index oils. *Amer. Mineralogist*, 29, 323.
- LINDBERG, M.L. (1946). - Measurement of the alpha index of refraction in micaceous minerals. *Amer. Mineralogist*, 31, 317.
- LOUPEKINE, I.S. (1947). - Graphical determination of refractive index n_e for the trigonal carbonates. *Amer. Mineralogist*, 32, 502.
- MARTENS, J.H.C. (1932). - Piperine as an immersion medium in sedimentary petrography. *Amer. Mineralogist*, 17, 198.
- MERTIE, J.B., Jr. (1942). - Nomograms of optic angle formulae. *Amer. Mineralogist*, 27, 538.
- MERWIN, H.E. (1913). - Media of high refraction for refractive index determinations with the microscope; also a set of permanent standard media of lower refraction. *Washington Acad. Sci. J.*, 3, 35.

- MERWIN, H.E. et LARSEN, E.S. (1912). - Mixtures of amorphous sulfur and selenium as immersion media for the determination of high refractive indices with the microscope. *Amer. J. Sci.*, 34, 42.
- MEYROWITZ, R. (1952). - A new series of immersion liquids. *Amer. Mineralogist*, 37, 855.
- MEYROWITZ, R. (1955). - A compilation and classification of immersion media of high index of refraction. *Amer. Mineralogist*, 40, 398.
- MEYROWITZ, R. et LARSEN, E.S. (1951). - Immersion liquids of high refractive index. *Amer. Mineralogist*, 36, 746.
- MICHEELEN, H. (1957). - An immersion method for exact determination of refractive indices. The glass method. *Medd. dansk geol. Foren.*, 13, 177.
- MORSE, S.A. (1968). - Revised dispersion method for low plagioclase. *Amer. Mineralogist*, 53, 105.
- MORSE, S.A. (1969). - The Kiglapait layered intrusion. *Geol. Soc. Amer.*, Mem. 112.
- MUIR, I.D. (1967). - Microscopy : transmitted light. In : *Physical methods in determinative mineralogy*. J. Zussman, ed. Academic Press, London.
- OLCOTT, G.W. (1960). - Preparation and use of a gelatin mounting medium for repeated oil immersion of minerals. *Amer. Mineralogist*, 45, 1099.
- PALACHE, Ch. et coll. (1945, 1951). - Dana's System of mineralogy, vol. 1 et 2. Wiley, New-York.
- PARFENOFF, A., POMEROL, Ch. et TOURENQ, J. (1970). - Les minéraux en grains. Masson, Paris.
- PARKER, R.B. (1961). - Rapid determination of the approximate composition of amphiboles and pyroxenes. *Amer. Mineralogist*, 46, 892.
- PENFIELD, S.L. (1901). - The stereographic projection and its possibilities from a graphical standpoint. *Amer. J. Sci.*, XI, 1.
- POSNJAK, E. et MERWIN, H.E. (1922). - The system $Fe_2O_3-SO_3-H_2O$. *J. amer. chem. Soc.*, 44, 1970.
- ROGERS, J.J.W. (1960). - Measurement of refractive indices in thin sections. *Amer. Mineralogist*, 45, 741.
- ROSENFELD, J.L. (1950). - Determination of all principal indices of refraction on difficultly oriented minerals by direct measurement. *Amer. Mineralogist*, 35, 902.
- ROUBAULT, M., FABRIES, J., TOURET, J. et WEISBROD, A. (1963). - Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant. Lamarre-Poinat, Paris.
- SABATIER, G. (1961). - Au sujet de la détermination graphique des indices de réfraction associés à une onde plane traversant un cristal biaxe dans une direction quelconque. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, LXXXIV, 403.
- SAUCIER, H. (1961). - Détermination graphique des indices de réfraction correspondant à une onde plane d'orientation quelconque dans un cristal biaxe. *Bull. Soc. fr. Minéral. , Cristallogr.*, LXXXIV, 199.
- SAYLOR, C.P. (1935). - Accuracy of microscopical methods for determining refractive indices by immersion. *J. Res. nat. Bur. Stand.*, 15, 277.
- SCHALLER, W.T. et HENDERSON, E.P. (1932). - Mineralogy of drill cores from the potash fields of New-Mexico. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 833.
- SCHUMAN, H. (1940-1941). Die Bestimmung der maximalen Doppelbrechung einachsiger Minerale in schiefen Schnitten. *Chem. d. Erde, Dtsch.*, 13, 353.
- SMITH, J.R. (1960). - Optical properties of low-temperature plagioclase. In Hess (op. cit.).
- SUENO, T. (1933). - On the use of standard glass powders in refractive index determinations. *Amer. Mineralogist*, 18, 421.
- TAYLOR, E.D. (1948). - Optical properties in cleavage flakes of rock-forming minerals. Université Laval, Québec, Canada, *Geologie et Minéralogie, Contribution N° 78*.
- TERPSTRA, P. et CODD, L.W. (1961). - *Crystallometry*. Longmans, London.
- TOMITA, T. (1934). - Variations in optical properties, according to chemical composition, in the pyroxenes of the clinoenstatite-clinohypersthene-diopside-hedenbergite system. *J. Shanghai Sci. Inst.*, 1, 41.
- TRÖGER, W.E. (1959). - *Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale*. Schweizerbart'sche, Stuttgart.
- TSUBOI, S. (1923). - A dispersion method of determining the plagioclases in cleavage flakes. *Mineral. Mag.*, G.B., 20, 108.
- TSUBOI, S. (1924). - On the discrimination of mineral species in rocks. *Japan. J. Geol. Geogr.*, 3, 19.
- TSUBOI, S. (1930). - On the use of Hartmann's dispersion net in refractive index determinations with the microscope. *J. geol. Soc. Jap.*, XXXVII, 39.

- WALLACE, S.R. (1955). - Removal of mineral grains from thin sections. *Amer. Mineralogist*, 40, 927.
- WILCOX, R.E. (1959 a). - Universal stage accessory for direct determination of the three principal indices of refraction. *Amer. Mineralogist*, 44, 1064.
- WILCOX, R.E. (1959 b). Use of the spindle stage for determination of principal indices of refraction of crystal fragments. *Amer. Mineralogist*, 44, 1272.
- WILCOX, R.E. (1964). - Immersion liquids of relatively strong dispersion in the low refractive index range. (1,46 to 1,52). *Amer. Mineralogist*, 49, 683.
- WINCHELL, A.N. (1929). - Camsellite and szaibelyite. *Amer. Mineralogist*, 14, 48.
- WINCHELL, A.N. (1939). - Elements of optical mineralogy, part III. Wiley, New-York.
- WINCHELL, A.N. et H. (1951). - Elements of optical mineralogy, part II. Wiley, New-York.
- WINCHELL, H. (1946). - A chart for measurement of interference figures. *Amer. Mineralogist*, 31, 43.
- WINCHELL, A.N. et MEEK, W.B. (1947). - Birefringence-dispersion ratio as a diagnostic. *Amer. Mineralogist*, 32, 336.
- WOOD, R.G. et AYLIFFE, S.H. (1936). - A method for determining the optical constants of crystals and examples of its application to certain organic compounds. *Philos. Mag., G.B.*, 21, 321.
- WRIGHT, F.E. (1907). - The measurement of the optic axial angle of minerals in the thin section. *Amer. J. Sci.*, XXIV, 317.
- WRIGHT, F.E. (1911). - The methods of petrographic-microscopic research. Carnegie Institution, Washington.
- WRIGHT, F.E. (1913). - Graphical methods in microscopical petrography. *Amer. J. Sci.*, XXXVI, 509.
- WRIGHT, H.G. (1965). - The petrographic use of the spindle stage and focal-plane screening in the determination of the optical variations of some zoned minerals. *Mineral. Mag., G.B.*, 35, 656.

Imprimé par le service polycopie de l'Institut Dolomieu, à Grenoble
Dépôt légal 2ème trimestre 1976.

PLANCHE I

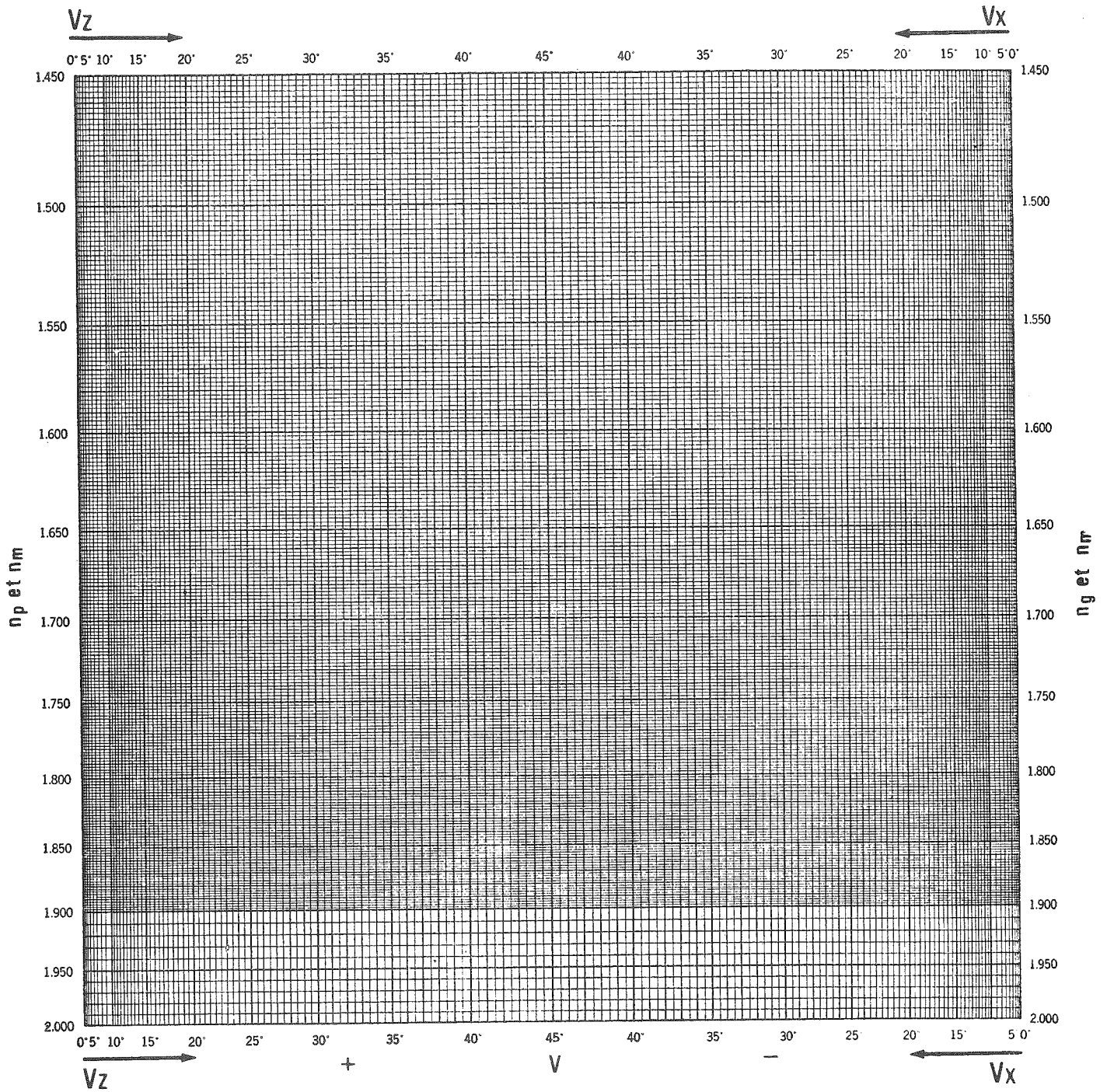


CANEVAS STEREOGRAPHIQUE D'EMMONS (1943)

L'ensemble de ce canevas donne, de 10° en 10° :

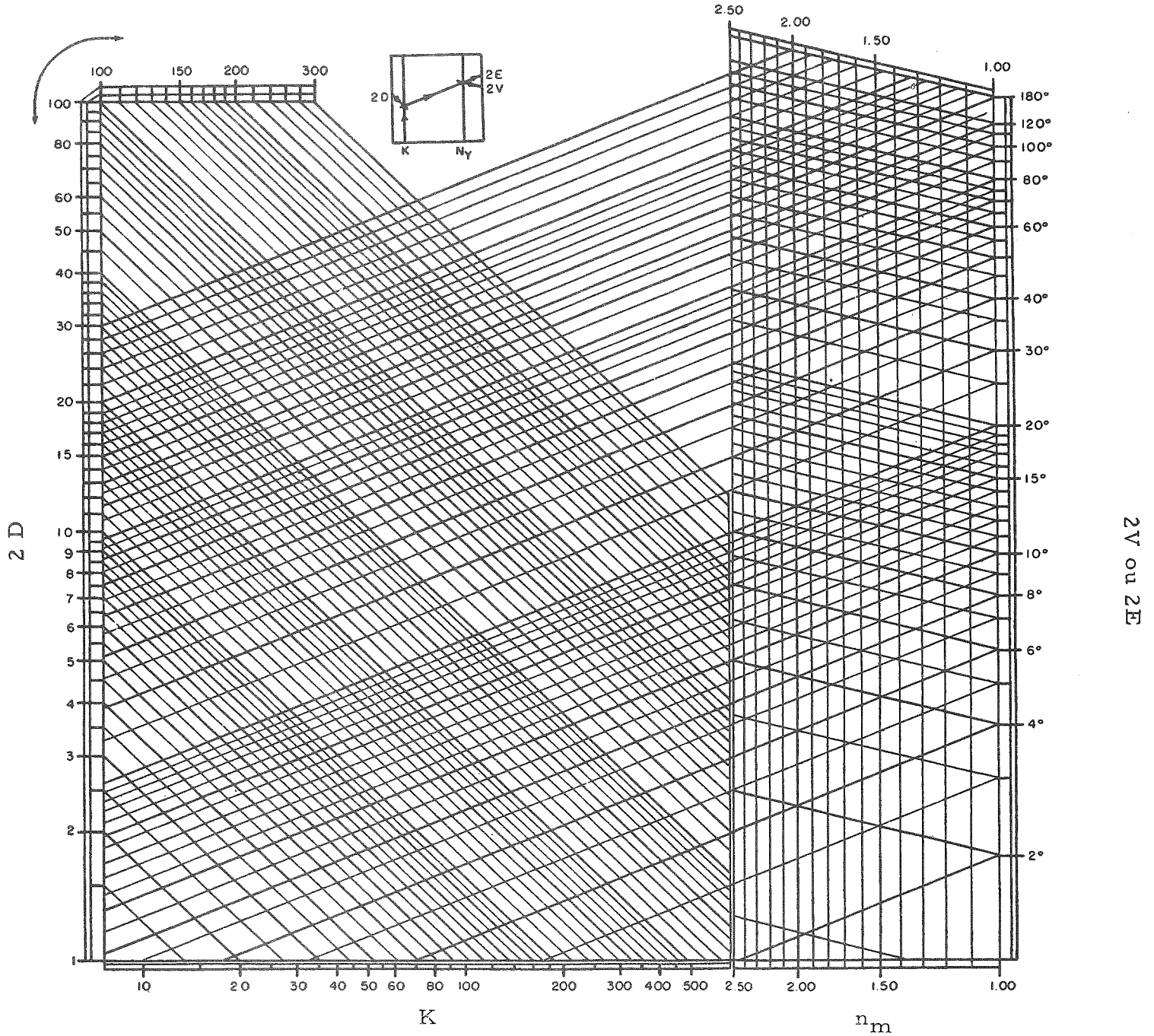
- 1 - Les arcs de grands cercles N-S (de 2° en 2° dans sa moitié inférieure).
- 2 - Les arcs de petits cercles E-W (de 2° en 2° dans sa moitié inférieure).
- 3 - Les rayons du cercle de projection, projections des méridiens de la sphère (de 2° en 2° dans sa moitié supérieure).
- 4 - Les petits cercles, projections des parallèles de la sphère (de 2° en 2° dans sa moitié supérieure).

PLANCHE 2



ABAQUE DE MERTIE (1942)
(Voir figure 8)

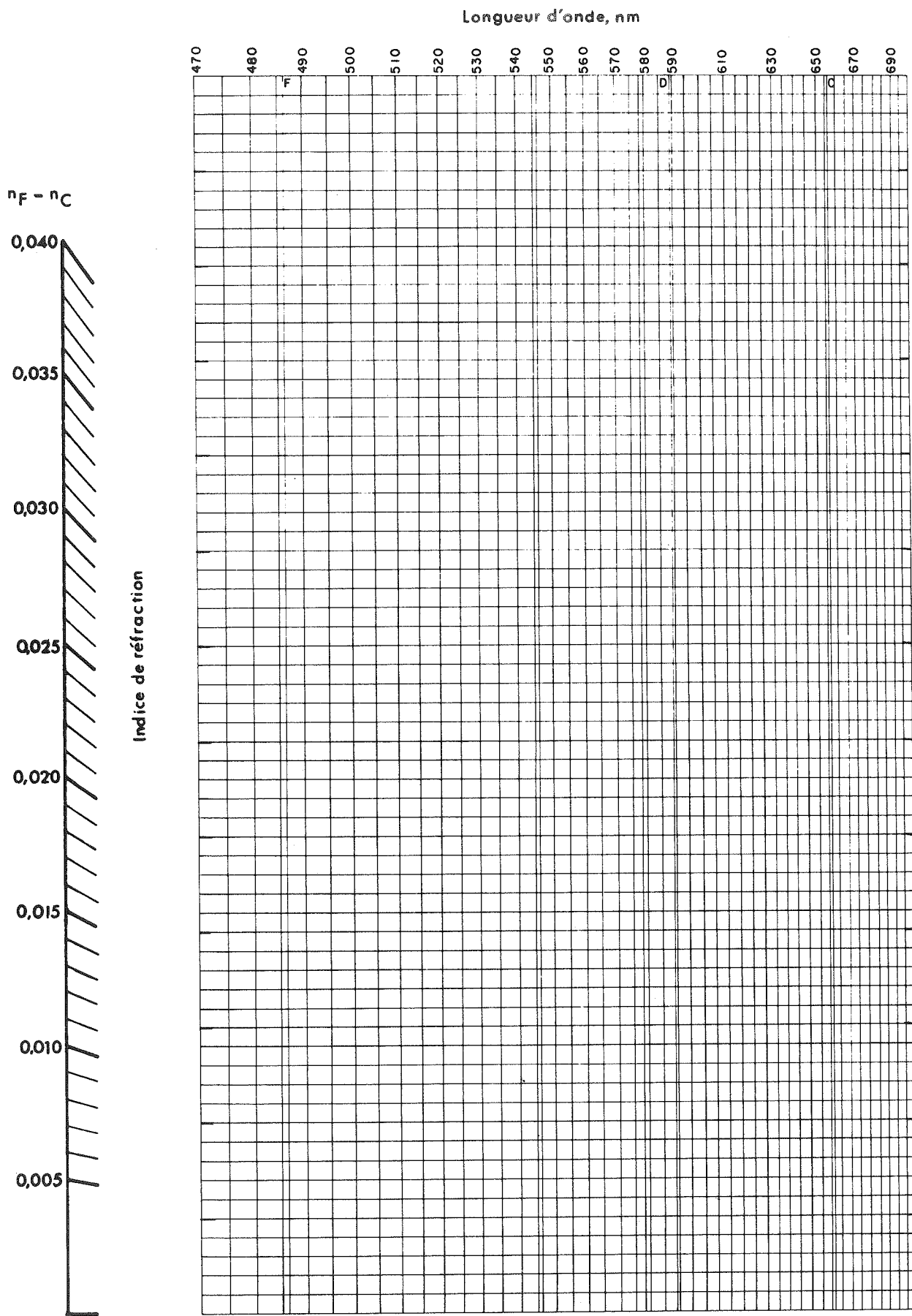
PLANCHE 3



ABAQUE DE WINCHELL (1946)

Tracer sur l'abaque une ou plusieurs droites verticales ayant pour abscisses les valeurs de K correspondant aux combinaisons optiques utilisées et procéder comme l'indique le schéma-guide. (Note : $N_Y = n_m$).

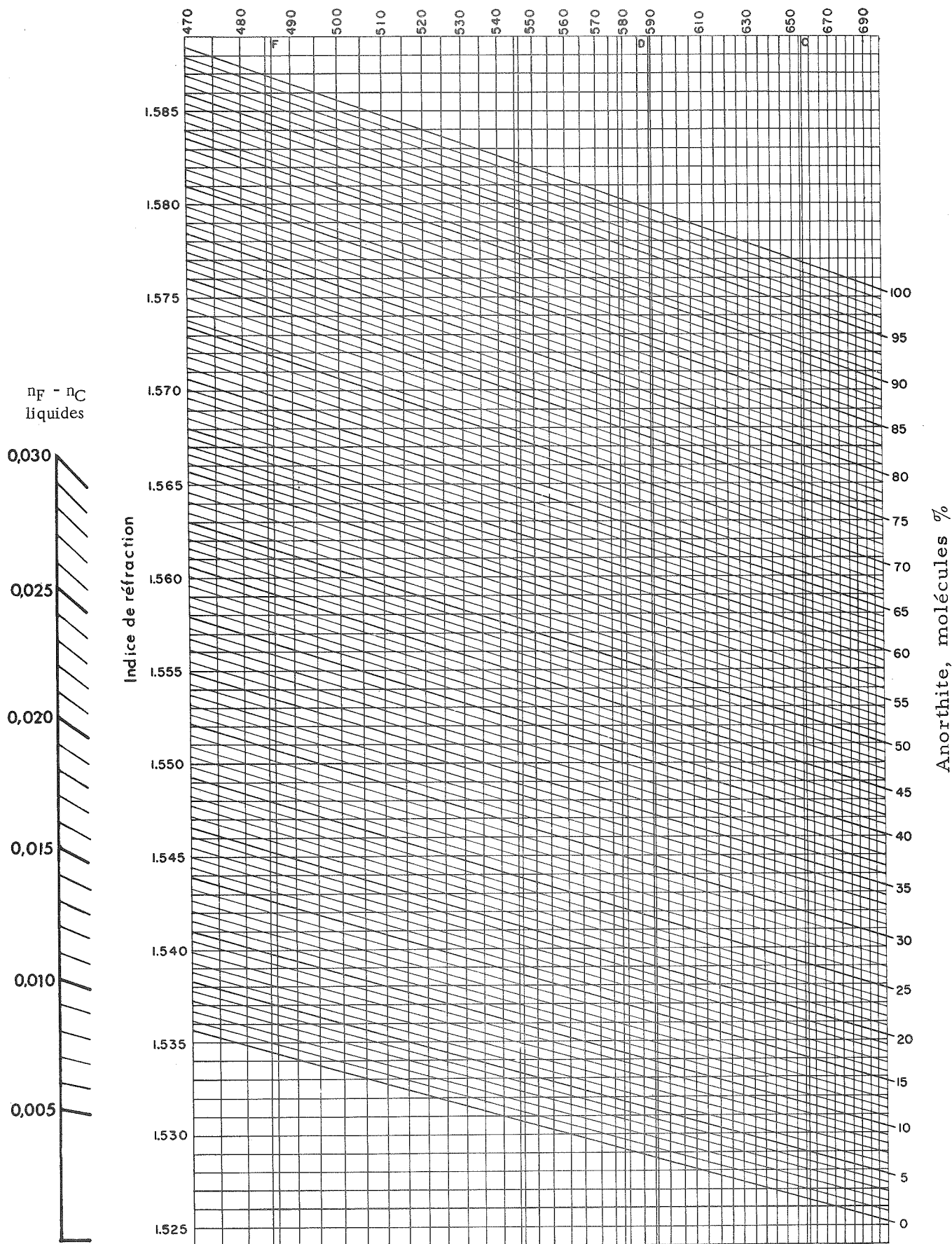
PLANCHE 4



GRAPHIQUE DE HARTMANN
(D'après S. A. Morse)

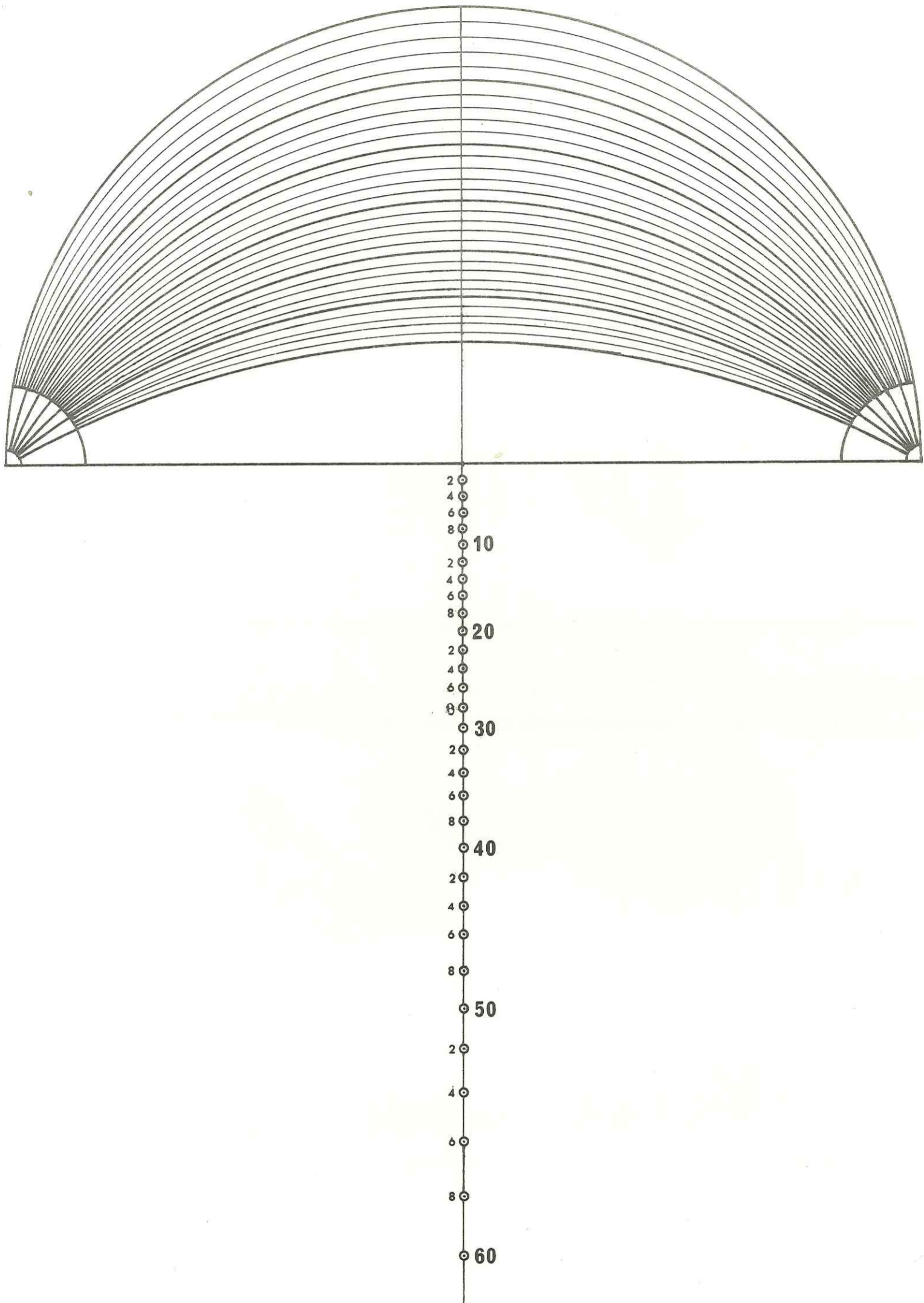
PLANCHE 5

Longueur d'onde, nm



DISPERSION DE L'INDICE n_p DANS LES FRAGMENTS DE CLIVAGE 001
DES PLAGIOCLASES DE BASSE TEMPERATURE (MORSE, 1968)

PLANCHE 6



RAYONS DES ARCS DE GRANDS CERCLES
INCLINES DE 2° A 60° SUR LE CERCLE DE PROJECTION
(Diamètre du cercle de projection : 20 cm)

