

BULLETIN

DU

**Musée royal d'Histoire
naturelle de Belgique**

Tome XV, n° 31.

Bruxelles, juin 1939.

MEDEDEELINGEN

VAN HET

**Koninklijk Natuurhistorisch
Museum van België**

Deel XV, n° 31.

Brussel, Juni 1939.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES AMPHIBOLES,

PAR R. VANDE PUTTE, DR. SC.

Introduction.

Une étude antérieure (1932), restée inédite, des caractères optiques de diverses amphiboles du Ruanda-Urundi avait posé pour nous le problème des relations entre la composition chimique et les propriétés optiques de cette famille de minéraux.

Une solution partielle du problème pour les hornblendes communes fut proposée, il y a quelques années, par W. Kunitz (1930), à qui l'on doit d'intéressants travaux sur les amphiboles. Nous commenterons dans notre travail les suggestions faites par cet auteur, ainsi que les diagrammes proposés aux mêmes fins dans le traité de Winchell (1933).

La question a continué à préoccuper les chercheurs (v. réf.) au cours de ces dernières années; leurs observations ont surtout mis en évidence son extrême complexité.

Ayant eu l'occasion d'effectuer, à une époque récente, un certain nombre d'analyses chimiques sur des échantillons d'amphiboles appartenant au Musée royal d'Histoire naturelle de Belgique, nous avons tenté à notre tour de dégager de nos résultats, rapprochés des observations publiées par les auteurs, certaines règles qui aideraient à la solution générale du problème.

Il apparaît de plus en plus que la difficulté réside dans la diversité même de composition des amphiboles, chez qui les substitutions isomorphiques des constituants manifestent une

variabilité déconcertante qui échappe à toute règle simple et constante, contrairement à ce qu'on observe chez d'autres familles de minéraux.

Le problème prend ainsi un double aspect : d'une part, la figuration de la composition chimique des amphiboles, avec division éventuelle en séries distinctes au sein de cette famille de minéraux, et, d'autre part, la définition des relations entre les propriétés optiques et la composition chimique.

Nous considérerons successivement ces deux points. Disons de suite que les conclusions auxquelles conduit le premier d'entre eux élèvent les plus sérieuses difficultés à une solution précise du problème visant les variations des caractères optiques.

Mais il importe que nous définissions au préalable les méthodes de travail utilisées, tant pour la préparation des prises d'essai soumises à l'analyse chimique que pour la mesure des constantes optiques. Ce sera l'objet du premier chapitre de cette note.

CHAPITRE PREMIER.

Méthodes de travail.

A. SÉPARATIONS ET DÉTERMINATION DES DENSITÉS.

La plupart des amphiboles étudiées entrent, en petits éléments, dans la composition de roches, amphibolites ou gabbrodiorites.

Les séparations, en vue de la constitution de lots d'analyse homogènes, ont été faites de la manière suivante.

La roche broyée est soumise à un tamisage aux tamis de 0.15 et 0.08 mm. Le refus du dernier tamis, seul récupéré, contient encore une proportion assez élevée de poussière impalpable qu'on élimine par lavage dans un vase de Berlin et décantations répétées. Le dernier lavage se fait à l'eau distillée, puis la matière est séchée sur filtre.

Nous avons procédé ensuite à une première séparation des éléments les moins lourds, à l'aide d'un mélange d'iodure de méthylène et d'éther. Ceci a été réalisé dans un tube à essai, l'opération étant répétée jusqu'à ce qu'aucun grain ne monte plus à la surface du liquide. Cette méthode consomme moins de liqueur

que les séparations en entonnoir et facilite l'agitation de la masse des grains. Il est à recommander de placer le tube à essai pendant quelques instants sous une cloche à vide partiel, afin de faciliter le départ des bulles d'air qui adhèrent aux fragments et les allègent.

Une seconde séparation, suivant le même procédé, se fait dans une liqueur de densité plus élevée que dans l'opération précédente et se rapprochant de celle du minéral à récupérer. Enfin, on termine en traitant le dépôt dans une nouvelle liqueur dont la densité dépasse un peu celle du minéral ; celui-ci est décanté sur filtre, lavé à l'éther et séché.

Dans certains cas la séparation à l'aide de liquides n'est plus possible ; c'est ainsi que nous avons dû, ou abandonner la séparation de telle amphibole accompagnée de minéraux de densité trop voisine, ou achever la séparation par un triage au binoculaire. Mais ce n'est qu'en toute dernière ressource que nous avons entrepris ce triage parce qu'il exige un temps vraiment trop long pour récupérer les deux à trois grammes nécessaires à l'analyse.

La densité des minéraux ainsi séparés a été déterminée par immersion dans des gouttes de liquides de densité connue. Une série de liquides, présentant entre eux des écarts réguliers de densité de 0,06, ont été préparés par mélange d'iodure de méthyle et de bromoforme (mesure du poids spécifique à la balance hydrostatique) ; l'appréciation de la densité des minéraux a été ainsi rendue possible à 0,03 près.

B. ANALYSES CHIMIQUES.

Nous avons suivi les méthodes d'analyses de roches, exposées dans les traités de Hillebrand et Lundell (1929), Jakob (1928), Dittler (1933), De Koninck (1894).

C. MESURES OPTIQUES.

1. *Indices de réfraction.*

Dans le but d'obtenir des valeurs aussi précises que possible pour les indices principaux, les déterminations par la méthode habituelle d'immersion dans les liquides à indices connus ont été faites à la platine de Fédoroff.

Dans le plus grand nombre de cas, les fragments examinés dans les préparations microscopiques étaient des lamelles de

clivage m (110) exigeant, pour que les axes principaux de l'ellipsoïde soient amenés dans le plan horizontal, des inclinaisons de la lame de l'ordre de 25 à 30 degrés pour n_m , 12° à 15° pour n_o et 55° à 60° pour n_p . Toutefois, les lamelles de clivage ne se présentaient pas toujours à plat à la suite de la fragmentation qui se produit sous la pression de l'hémisphère de verre; ces positions anormales étaient utiles pour la mise en place horizontale de n_p , vu qu'au delà d'une inclinaison de 30 à 35 degrés, il devient difficile d'observer la ligne de Becke.

2. Biréfringence.

Nous nous arrêterons un peu plus longuement à l'exposé de la méthode de détermination de la biréfringence, car l'expérience nous a montré que les procédés habituellement employés pour la mesure de l'épaisseur, ou bien sont inapplicables, ou bien manquent de précision; le procédé que nous avons adopté pour cette dernière mesure nous a conduit, dans l'appréciation de la biréfringence, à des résultats très satisfaisants, en parfaite concordance avec les valeurs déduites de la mesure des indices de réfraction.

Voici comment nous avons opéré :

Admettant que le quartz a des valeurs d'indices très constantes à température ordinaire ($n_\epsilon = 1,5533$ et $n_\omega = 1,5442$, B étant donc 0,0091), nous avons choisi dans la préparation microscopique de la roche quelques grains de quartz pour lesquels, à l'aide de la platine de Fédoroff, nous avons mesuré l'angle φ formé par l'axe optique (n_ϵ) avec le grand axe (n'_ϵ) de l'ellipse de section dans la lame mince. La formule :

$$n'_\epsilon = \frac{n_\epsilon \cdot n_\omega}{\sqrt{n_\epsilon^2 \sin^2 \varphi + n_\omega^2 \cos^2 \varphi}}$$

donne la valeur n'_ϵ en fonction de φ (v. courbes de ces valeurs dans Johannsen [19]).

Connaissant la biréfringence B' de la plage de quartz ($n'_\epsilon - n_\omega$) et mesurant à l'aide du compensateur de Bérek le retard R' pour ce même grain (dans la lame en position horizontale), on calcule

$$\text{l'épaisseur } (e) \text{ de la lame : } \frac{R'}{B'} = e.$$

En répétant ces mesures sur 4 ou 5 grains dans une même lame, on peut se rendre compte de la concordance des valeurs trouvées. Celles-ci n'ont différé tout au plus, dans une même lame, que de 4 millièmes de millimètre. Nous pouvons donc admettre, dans la mesure de l'épaisseur, l'approximation de 0,002 mm.

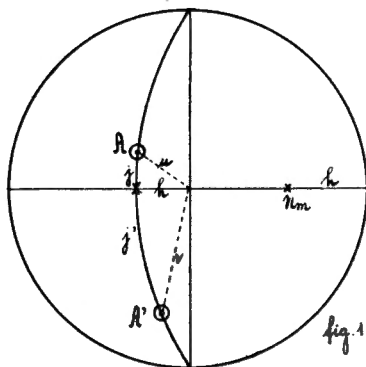
L'épaisseur étant connue, la biréfringence B' d'une section d'amphibole se déduit du retard R' mesurée dans la position horizontale de la lame.

Nous avons ensuite, dans les sections d'amphibole, déterminé les angles μ et ν des axes optiques avec la normale à la lame.

Quand la platine de Fédoroff permet la lecture des angles h, j, j' (fig. 1), les arcs μ et ν se calculent immédiatement :

$$\cos \mu = \cos j \cdot \cos h.$$

Si un seul des axes optiques peut être amené suivant l'axe du microscope, il faudra fixer par les procédés habituels de la platine la position de l'une des bissectrices, n_o ou n_p , afin de déterminer l'angle $2V$ et la position du second axe.



De B' on passe à la valeur B (biréfringence maximum $n_o - n_p$) par la formule approchée :

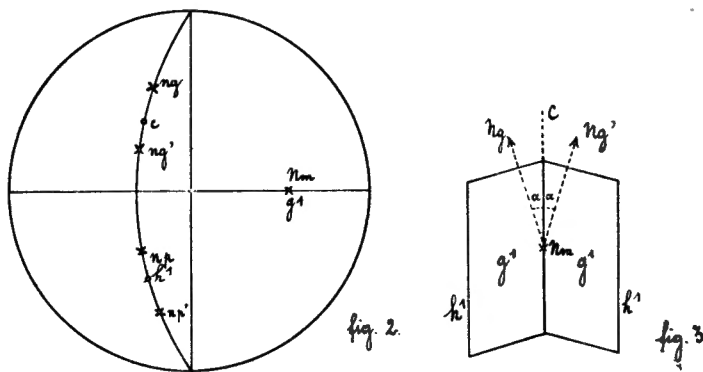
$$B = \frac{B'}{\sin \mu \sin \nu}.$$

3. Angle d'extinction dans le plan principal $n_o n_p$ ($n_o \wedge c = \alpha$).

La mesure de cet angle a été faite le plus simplement à la platine de Fédoroff sur des éléments dont la section principale pouvait être amenée dans le plan horizontal ; dans cette position, l'angle cherché est mesuré par rapport au clivage.

Dans le cas le plus général, l'angle a été trouvé graphiquement par détermination des positions des axes principaux de l'ellipsoïde et de l'orientation des plans de clivage.

Dans les cristaux maclés, le problème peut être résolu sans la considération du clivage. L'axe n_m est commun aux deux individus associés suivant h^1 (100), tandis que les axes n_o , n_p et n'_o , n'_p , avec les axes optiques, se trouvent dans le plan de symétrie commun perpendiculaire à h^1 . L'angle $n_o \wedge n'_o$ vaut le double de l'angle d'extinction α (fig. 2). Par rotation autour de n_m , placé dans le plan horizontal à 45° des plans principaux des nicols, la position de l'axe cristallographique c est fixé par l'éclairement commun des deux cristaux au moment où cet axe est dirigé suivant l'axe du microscope. Si la position de n_o a été déterminée



pour l'un des cristaux, on lira dans la projection stéréographique l'angle $n_o \wedge c$, c'est-à-dire l'angle d'extinction α cherché (fig. 3).

CHAPITRE II.

Composition des Amphiboles.

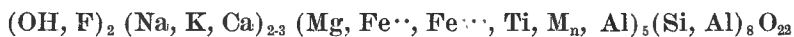
Seules sont visées, dans les considérations qui suivent, les amphiboles monocliniques, à l'exclusion même des variétés riches en alcalis. Nos analyses ont porté sur des trémolites, des actinotes, des pargasites et surtout des hornblendes communes.

Le tableau I donne les résultats d'analyse en poids des minéraux que nous avons étudiés personnellement.

Pour la trémolite, le problème de la composition semble bien définitivement résolu, grâce aux travaux de Schaller (1916) et surtout de Warren (1929) qui a pu établir la structure atomique du minéral ; la formule s'écrit $H_4 Ca_2 Mg_5 (Si O_3)_8$.

Par la substitution, en proportion variable, du fer à la magnésie la trémolite passe aux actinotes, de composition bien définie également.

Mais le problème se complique pour les hornblendes. La formule la mieux adaptée à tous les résultats d'analyse connus à ce jour, est celle proposée par Warren et dérivée de la composition reconnue pour la trémolite. Elle s'écrit :



Ainsi que l'a montré Warren, le remplacement d'une partie des atomes de silice (Si^{4+}) par des atomes d'aluminium (Al^{3+}) dans le chaînon tétraédrique entraîne, pour la satisfaction de la valence chimique, soit l'introduction d'alcalis venant occuper des places vacantes de la structure de la trémolite, soit le remplacement du magnésium bivalent par les métaux des sesquioxides ou par du titane, soit les deux à la fois. Un excès de valences positives dû à un remplacement important de magnésium pourrait d'autre part, selon Warren, trouver une compensation dans le remplacement partiel de (OH, F) par O'' . En outre, les valeurs trop élevées trouvées fréquemment pour le coefficient du groupe du magnésium laissent supposer que des éléments de ce groupe sont susceptibles, eux aussi, d'occuper les places vacantes de la structure atomique.

TABLEAU I. — % en grammes.

	Si O ₂	Ti O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Fe O	Mn O	Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	F	Somme	F ₂ = O	
1	54	0,16	0,20	5,20	4	0,30	26	8,60	0,43	0,19	2,52	1,42	101,22	-0,57	100,65
2	54,24	0,27	—	3,40	3,60	0,25	24	9,21	1,24	0,47	2,20	0,59	99,47	-0,24	99,23
3	52,42	0,71	1,30	3,04	8,77	0,18	18,67	12,42	1,20	—	2,50	0,42	101,63	-0,17	101,46
4	49	0,10	3,90	6	8,50	0,19	17,50	13,18	1,10	0,08	1,33	—	100,88	—	—
5	44,40	1,50	11,22	3	8	0,10	15,90	12	1,55	0,86	1,19	—	99,72	—	—
6	43,03	2,55	10,69	6,32	8,31	0,02	13,14	11,85	2,75	—	1,38	—	100,04	—	—
7	43,71	0,34	10,71	5,14	13,10	0,18	12,17	10,34	1,30	0,54	2,30	—	99,83	—	—
8	41,94	3,40	7,26	6,36	7,67	0,10	14,12	13,59	3,67	—	1,78	—	99,89	—	—
9	46,90	—	7,16	12,46	12,33	—	9,20	11,32	—	—	2,39	—	101,76	—	—
10	44,50	0,40	12,50	5,20	16,70	0,10	6,90	10	1,67	0,84	1,17	—	99,98	—	—
11	44,51	1,40	8,07	4,12	7,64	0,26	17,11	13	1,33	2,13	0,32	1,40	100,23	-0,60	99,63
12	44,50	0,10	7,76	4,40	8	0,05	16,80	13	1,20	1,80	0,25	1,20	99,06	-0,50	98,56
13	42	0,50	9,90	9,50	5,80	0,10	18	12,10	1,50	—	0,50	0,30	100,20	-0,10	100,10
14	55,48	—	1,50	2,11	2,81	—	21,25	13,23	2,50	—	1,50	—	100,38	—	—
15	51,56	0,62	6,67	1,41	11,73	—	15,32	9,83	1,90	—	1	—	100,04	—	—
16	47,85	0,87	6,66	1,44	12,39	—	13,21	12,68	2,92	—	2,01	—	100,03	—	—
17	46,91	1,92	12,24	0,82	12,65	—	9,44	13,19	0,97	—	1,32	—	99,46	—	—
18	41,14	2,27	10,22	11,34	10,03	—	9,26	11,70	2,48	0,65	1	—	100,09	—	—

Provenance: de 1 à 13, collections du Musée royal d'Histoire naturelle, à Bruxelles.

de 14 à 18, collections du Musée minéralogique de l'Université de Louvain.

1. (n° 2778) — Amphibole de Miask.
2. (n° 2777) — Amphibole de Miask.
3. (n° 3787) — Amphibolite d'Oisans.
4. (n° 3791) — Hornblende de Grisons.
5. (n° 3788) — Amphibole de Langneux, Calvados.
6. (n° 3786) — Amphibole de St-Griex (France).
7. (n° 3783) — Hornblende, Arendal (Norvège).

8. (n° 2776) — Amphibolite, Barantschisk.
9. (n° 2768) — Hornblende, Ile de Miolé.
10. (n° 3837) — Amphibole, Brésil.
11. (n° 3232) — Amphibolite, Edenville.
12. (n° 3231) — " " "
13. (n° 3208) — " " Wolkenburg.
14. (n° 834)* — Actinote, Ile Kidwi, lac Kivu.
15. (n° 513)* — Amphibolite gabbroïque, Muchogo, Urundi.
16. (n° 530)* — " " , Usumbura, Urundi.
17. (n° 2075)* — " " " "
18. (n° 884)* — Diorite, Kilimbi, Ruanda sud-occid.

Mais dans ce domaine des interchanges atomiques et de l'apparition d'éléments additionnels, on n'a pu jusqu'à présent dégager de règles constantes; les variables sont trop nombreuses (**).

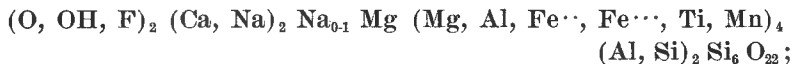
Nous donnons, dans le tableau II, la valeur des coefficients des divers groupes de la formule de Warren pour les amphiboles que nous avons analysées et pour une série d'amphiboles analysées par Kunitz (1930).

L'examen des chiffres montre que les relations précises qu'on a tenté d'établir entre le coefficient (2-3) du groupe (Na, K, Ca) et l'importance du remplacement Si → Al, ou entre ce dernier et le remplacement Mg → Al, ne se vérifient pas pour toutes les amphiboles.

Il en va de même pour les relations entre le coefficient du groupe (OH, F) et celui du groupe du magnésium.

Les tendances exprimées par de telles relations sont exactes en gros, mais les cas d'exception sont nombreux.

Berman et Larsen (1931), pour marquer les limites des interchanges dans chaque groupe, ont modifié comme suit l'écriture de la formule de Warren :



mais il n'est pas tout à fait établi que ces limites ne soient dépassées dans aucune variété.

Dans ce complexe de substitutions isomorphiques ne réussirait-

* Analyses de M. Boubnoff, de l'Institut de Chimie, Louvain.

** On trouvera dans une étude récente de W. A. Deer (1938) une discussion plus complète de la formule de Warren, à propos de la composition des hornblendes de Glen Tilt.

TABLEAU II.

Constitution moléculaire d'après la formule de Warren.

	(OH, F)	(Ca, Na, K, Mn)	(Mg, Fe, Ti, Al, Mn)	(Si, Al)	
Trém.-Act.	1	3,88	1,60	6,07	7,33
»	2	2,29	1,79	5,69	7,52
»	3	2,51	2,22	5,34	7,56
Hornblende	4	1,28	2,28	5,36	8
»	5	0,74	2,91	5,98	8
»	6	0,68	2,22	5,16	8
»	7	2,25	1,80	5,32	8
»	8	1,75	2,73	5,17	8
»	9	2,32	1,74	4,92	8
»	10	1,20	2,39	5,21	8
Pargasite	11	0,95	2,81	5,15	8
»	12	0,81	2,78	5,28	8
Hornblende	13	0,76	2,31	5,85	8
Trém.-Act.	14	1,38	2,55	5,16	7,91
Hornblende	15	0,98	2,03	5,51	8
»	16	1,94	2,70	4,83	8
»	17	0,97	2,30	5,32	8
»	18	1,01	2,71	5,02	8
Kunitz : trémo-					
lites-Actinotes					
»	1	1,97	1,97	5,37	7,87
»	2	1,83	2	5,10	8
»	3	1,82	2,06	5,09	8
»	4	2,09	2,15	5,06	7,91
»	5	2,02	2,14	4,97	8
»	6	1,85	2,05	5,11	8
»	7	1,89	2,18	5,07	7,83
»	8	2,18	2	5	8
»	9	1,96	2	5	8
»	10	2,30	2,02	5,09	7,82
»	11	2,26	1,83	4,98	8
Kunitz :					
Hornblendes					
»	1	2,12	2,41	4,80	8
»	2	1,60	2,26	5,31	8
»	3	2,03	2,30	5,18	8
»	4	1,78	2,31	2,02	8
»	5	1,55	2,54	5,31	8
»	6	1,30	2,90	5	8
»	7	2,03	2,58	4,99	8
»	8	2	2,46	5,01	8
»	9	1,62	2,53	5,14	8
»	10	2,09	2,45	5,12	8
»	11	2,04	2,30	5,17	8
»	12	1,21	2,60	5,10	8
Kunitz :					
Pergasites					
»	1	0,38	2,72	4,95	8
»	2	0,68	2,83	5,34	8
»	3	0,50	2,60	5,34	8
»	4	0,40	2,53	5,22	8
»	5	1,55	2,71	5,10	8
»	6	0,70	2,80	5,17	8

on pas à isoler des séries à variation simple, dont chacune se prêterait pour elle-même à la solution du problème des caractères optiques examiné dans le chapitre suivant? Ces séries pourraient être considérées, suivant le concept classique, comme formées par le mélange en proportions variables de deux ou plusieurs molécules constituant des termes extrêmes.

La série de la trémolite-actinote (- ferrottrémolite) répond de façon satisfaisante à cette définition. Mais en dehors d'elle, et peut-être des amphiboles riches en alcalis qui n'entrent pas dans le cadre de cette étude, l'existence de séries de ce genre, bien individualisées, ne semble pas avoir été établie de façon péremptoire.

Kunitz, s'attaquant à l'étude du problème des relations entre caractères optiques et composition chimique, a construit un diagramme où les variations des indices de réfraction paraissent indiquer l'existence de deux séries distinctes chez les amphiboles constituées par des molécules mixtes actinote-hornblende verte (la molécule adoptée pour la hornblende: $H_2 Ca_2 (Mg, Fe)_4 Al_2 Si_6 O_{22}$, est appelée « syntagmatite »). Dans chacune des séries, il y aurait une variable, à savoir le rapport Fe/Mg, influençant la valeur des indices.

Les deux séries se distinguent entre elles par la proportion des molécules simples d'actinote et de hornblende verte (syntagmatite). Pour l'une d'elles (1a) il s'agit de syntagmatite pure, tandis que dans l'autre série (1) la proportion des deux molécules simples est variable.

Nous avons reproduit plus loin (chap. III, fig. 4) le diagramme de Kunitz en y ajoutant, d'une part, les points correspondant aux actinotes et aux pargasites analysées par cet auteur et y portant, d'autre part, les valeurs trouvées pour nos propres minéraux ainsi que celles données par Deer (1938) pour les amphiboles de Glen Tilt.

En établissant le rapport des deux molécules proposées par Kunitz, d'après le pourcentage d'alumine révélé par l'analyse chimique, on trouve pour ce rapport, dans les amphiboles de la série 1, des valeurs allant de 0,6 à 2,25. Suivant les conceptions de Kunitz, il semble donc qu'il faille distinguer les deux séries de hornblendes et celle des trémolites-actinotes, d'après les relations :

$$\text{série trémolite-actinote : } \frac{\text{mol. act.}}{\text{mol. syntag.}} > 2,25.$$

série 1, actinote-syntagmatite : $2 > \frac{\text{mol. act.}}{\text{mol. syntag.}} > 0,6.$
 série 1a, purement syntagmatite.

Si ces séries correspondent à des groupes nettement séparés de minéraux, les larges variations du rapport considéré dans les deux premières d'entre elles devraient faire chercher leur critère d'individualité dans un certain caractère de constitution indépendant de ce rapport. Ce que nous avons dit plus haut des substitutions isomorphiques, opposé à la rigidité de la formule attribuée par Kunitz à la hornblende verte, doit faire craindre que la distinction en deux séries indiquée par l'analyse des échantillons choisis par Kunitz ne puisse être généralisée.

On remarquera d'ailleurs que les zones respectives occupées par les séries dans notre graphique, établi sur la base de celui de Kunitz, se trouvent presque en contact les unes avec les autres.

Mais la suppression des discontinuités de composition entre les séries n'affecterait point les indications du graphique de Kunitz relative aux variations des indices de réfraction. Comme on le verra plus loin, nos observations s'accordent à ce point de vue de façon très satisfaisante avec celles de Kunitz.

La tentative de Winchell (1933), pour résoudre le même problème conduit à des difficultés du même ordre. Winchell admet que l'amphibole peut être considérée comme un mélange isomorphe de quatre molécules correspondant respectivement aux termes magnésiens et ferrifères de l'actinote et d'une hornblende type. Mais pour plusieurs de nos minéraux, suivant que l'on détermine la position sur l'ordonnée verticale du point figuratif de la composition par le nombre d'atomes de Si, ou de Al, ou de Mg, correspondant aux données de l'analyse chimique, le point occupe des positions différentes; ce qui revient à dire que la composition réelle ne répond pas au schéma admis par Winchell.

Comme on le voit, toute tentative de figuration graphique de l'ensemble des amphiboles échoue encore devant la complexité de composition de ces minéraux.

Il existe un groupe de minéraux alumineux qui semble s'isoler du gros des amphiboles: ce sont les pargasites. Les mieux caractérisées d'entre elles sont pauvres en fer et, d'une façon générale, à teneurs plus faibles également en H_2O que les hornblendes;

comme ces dernières, elles sont alumineuses. Mais le critère optique (signe positif), généralement admis comme marque distinctive du groupe, range parmi elles certains spécimens dont la composition chimique ne se distingue de celle des autres hornblendes que par une teneur plus faible en H_2O , au profit de la proportion de fluor qui y est remarquablement plus élevée.

Si des passages par variation de la teneur en alumine s'observent entre les actinotes et les hornblendes ferrifères, par contre les termes intermédiaires entre trémolites et pargasites magnésiennes n'existent pas parmi les minéraux que nous avons étudiés. Le diagramme donné au chapitre suivant à propos des caractères optiques met la chose en relief.

CHAPITRE III.

Relation entre la composition chimique et les caractères optiques.

Ce qui vient d'être exposé fait prévoir les plus sérieuses difficultés pour la solution du problème de la détermination de la composition chimique des amphiboles d'après leurs caractères optiques.

Si l'on met à part la série trémolite-actinote, pour laquelle des diagrammes suffisamment précis des variations des propriétés optiques ont pu être tracés (Winchell, op. cit., p. 251), on en est réduit à chercher l'influence, sur ces dernières, de certains caractères chimiques considérés isolément.

Les observations faites à ce sujet par divers auteurs visent surtout les indices de réfraction; c'est sur eux que nous-mêmes avons porté principalement nos investigations.

On trouvera au tableau III l'ensemble des teneurs moléculaires et des valeurs optiques que nous avons mesurées sur nos échantillons (indices, biréfringence, angle d'extinction, angle des axes optiques), ainsi que les densités (*).

Le facteur le plus important influençant les indices est sans contredit le rapport $Mg\ O/Fe\ O$: les indices croissent en même

* $B_m = n_g - n_m$.	α = angle d'extinction. v. = vert. br. = brun. v. f. = vert foncé.	v. p. = vert pâle.
$B = n_g - n_p$.		
$b = n_m - n_p$.		

TABLEAU III. — % moléculaires et constantes optiques.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Si O ₂	45, —	47, —	45,81	46, —	43,17	43,11	42,92	41, —	46,90	46,68	41,97	42,98	41,80	48,61	49,44	45,04	45,90	43,76
Ti O ₂	0,10	0,15	0,46	0,07	1,09	1,91	0,25	2,49	—	0,31	0,99	0,07	0,37	—	0,44	0,61	1,41	1,80
Al ₂ O ₃	1,35	—	0,66	2,14	6,41	6,29	6,18	6,17	4,20	7,68	4,47	4,40	5,79	0,73	3,80	3,75	7,16	6,39
Fe ₂ O ₃	2,05	1,09	1, —	2,37	1,09	2,37	1,89	2,32	4,80	2,01	1,45	1,59	3,54	0,69	0,05	0,51	0,30	4,53
Fe O	0,20	2,60	6,40	6,66	6,58	6,93	10,71	6,74	10,32	14,61	6, —	6,44	4,80	2,58	9,35	10,05	10,14	8,88
Mn O	32,50	0,15	0,13	0,15	0,07	0,01	0,15	0,08	—	0,06	0,20	0,04	0,08	—	—	—	—	—
Mg O	7,50	31,20	21,47	24,50	23,19	19,75	17,92	20,70	13,80	10,83	24,19	24,34	26,86	28,72	22, —	18,66	16,22	14,78
Ca O	0,35	8,53	13,18	13,48	12,51	12,72	10,87	12,23	12, —	11,34	13,12	13,45	12,89	12,42	10,10	12,77	13,80	13,13
Na ₂ O	0,10	1,04	1,01	0,98	1,50	2,31	1,27	2,48	—	1,70	1,17	1,12	1,24	1,88	1,60	2,34	0,81	2,55
K ₂ O	7, —	0,36	—	0,05	0,54	—	0,32	—	—	0,60	1,28	1,11	—	—	—	—	—	0,44
H ₂ O	3,75	1,62	7,28	4,16	3,85	4,60	7,52	5,79	8, —	4,18	4, —	0,80	1,65	4,37	3,22	6,27	4,26	3,54
F	—	—	1,16	—	—	—	—	—	—	—	4,16	3,66	0,93	—	—	—	—	—
Ng	1,633	1,634	1,652	1,654	1,666	1,673	1,676	1,677	1,680	1,684	1,654	1,654	1,692	1,631	1,655	1,666	1,675	1,685
Nm	1,626	1,928	1,642	1,646	1,652	1,662	1,667	1,669	1,673	1,673	1,643	1,644	1,684	1,622	1,646	1,657	1,665	1,679
Np	1,618	1,620	1,626	1,627	1,633	1,642	1,655	1,659	1,655	1,659	1,636	1,638	1,675	1,610	1,632	1,643	1,650	1,663
B	15	14	26	27	33	26	21	18	25	25	18	16	17	20	23	23	25	22
Bm	7	6	10	8	14	11	9	8	7	11	11	10	8	9	9	9	10	6
b	8	8	16	19	15	15	12	10	18	14	7	6	9	11	14	14	15	16
z	21°	22°	16°	17°	19°	20°	14°	21°	11°	14°	22°	21°	41°	16°	15°	15°	19°	16°
2V (—)	82°	79°	76°	70°	81°	86°	80°	84°	63°	83°	+76°	+74°	87°	83°	78°	77°	79°	63°
dens.	3,07	3,10	3,11	3,12	3,15	3,18	3,25	3,19	3,30	3,27	3,20	3,20	3,25	3,10	3,15	3,15	3,18	3,25
color.	v	v.	v.	v.	br.	v. f.	v. f.	v. f.	v. f.	br.	br.	br.	br.	v. p.	v.	br.	v. f.	v. f.
Abscisses du diagramme fig. 4	12	13	26	30	27	37	44	35	59	63	26	28	hornbl. basalt.	12	30	37	40	55

temps que la proportion de fer, ainsi que cela s'observe dans maintes séries isomorphes.

C'est en construisant le diagramme des indices en fonction de la valeur de ce rapport que Kunitz a cru déceler l'existence des séries distinctes de hornblendes vertes, dont il a été question au chapitre précédent. Le diagramme de Kunitz, complété par les points correspondant à nos échantillons et à ceux de l'étude

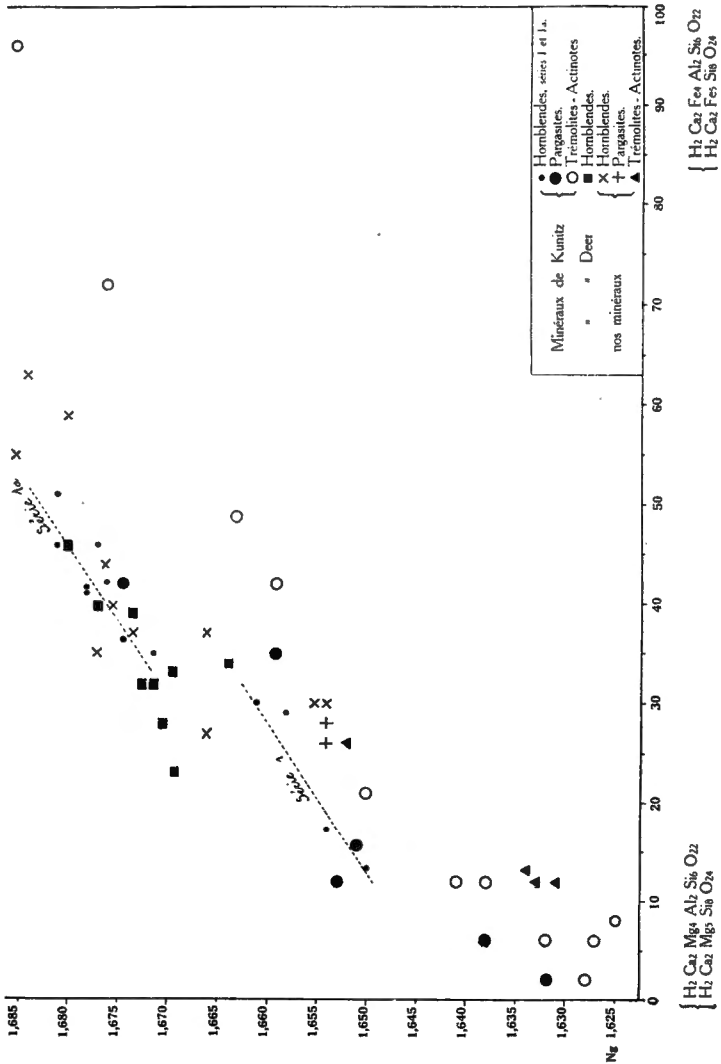


Fig. 4.

de Deer (1938), est donné par la fig. 4; il montre, dans l'ensemble, l'accroissement de l'indice n_g dans la direction de l'augmentation du fer.

Le rapport $\frac{\text{Fe}_2 \text{O}_3}{\text{Fe O}}$ dans nos échantillons ne laisse apparaître

aucune influence sur la valeur des indices. Les observations de Deer (op. cit., p. 73) s'accordent sur ce point avec les nôtres; d'après lui, l'effet dû à ce rapport ne deviendrait sensible sur les indices qu'au dessus de la valeur 2.

Le remplacement dans la structure atomique d'un certain nombre d'ions Si par Al au centre des tétraèdes Si O₄ et celui, souvent concomitant, de Mg par Al différencient les hornblendes et les pargasites des actinotes; l'influence que ces substitutions exerceraient sur les indices n'apparaît pas clairement. Il semble qu'elle soit voilée par d'autres influences s'exerçant parallèlement.

Du diagramme de Kunitz, complété par nos données (fig. 4), il ressort, en gros, qu'à une augmentation de la proportion de molécules de hornblende par rapport aux molécules d'actinote correspond, pour une même valeur du rapport moléculaire Fe O/Mg O, une élévation des indices; on est donc tenté de conclure que la diminution de silice et l'augmentation d'alumine agissent pour faire croître les indices.

Mais si l'on considère les quelques pargasites qui ont pu être étudiées, aussi alumineuses que les hornblendes, on les voit occuper la zone des actinotes, comme si une influence distincte, non décelée, s'exerçait pour elles en sens opposé, contrebalançant celle de la silice et de l'alumine; dans le diagramme que nous avons établi sur la base des teneurs Si O₂ + Mg O, et dont nous parlerons plus loin (voir page 19), la comparaison des tremolites et des pargasites très pauvres en fer conduit à la même observation, en ce sens que la substitution de l'alumine à la silice et à la magnésie, tout en séparant les points représentatifs des deux catégories de minéraux sur la ligne des abscisses, ne modifie pas la valeur des indices. Quelle est l'influence qui s'exercerait chez les pargasites dans le sens d'une diminution de la densité optique? A une diminution de la teneur en eau, qui paraît de règle chez ces minéraux, correspond une augmentation assez sensible de la teneur en fluor; c'est peut-être là qu'il faut rechercher l'influence en question?

Deer, pour les hornblendes qu'il a étudiées, constate, conformément au diagramme de Kunitz, une relation d'ensemble entre l'élévation des indices et une augmentation du rapport Al/Si.

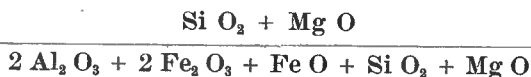
L'influence du calcium est malaisée à fixer, en raison de la constance relative de la proportion de cet élément dans la composition des amphiboles; en tout état de cause, en raison même de cette constance, elle présente peu d'intérêt pour le problème qui nous occupe.

Pour les autres éléments chimiques, représentés en proportion beaucoup moindre, mais aussi plus variable, la difficulté du problème s'accroît souvent du fait de l'imprécision des dosages. Leur influence a chance d'ailleurs d'être beaucoup moins sensible.

D'après Kunitz, les alcalis, l'eau, le fluor agiraient dans le sens d'une diminution des indices; le manganèse les fait croître; quant au titane, son influence est très notable dans le sens de l'augmentation des indices, plus accentuée même que celle du fer (Kunitz, p. 216). Nos analyses ne nous permettent pas de tirer de conclusions positives au sujet de ces éléments, sauf peut-être pour ce qui concerne le fluor, conformément à la remarque faite plus haut à propos des pargasites.

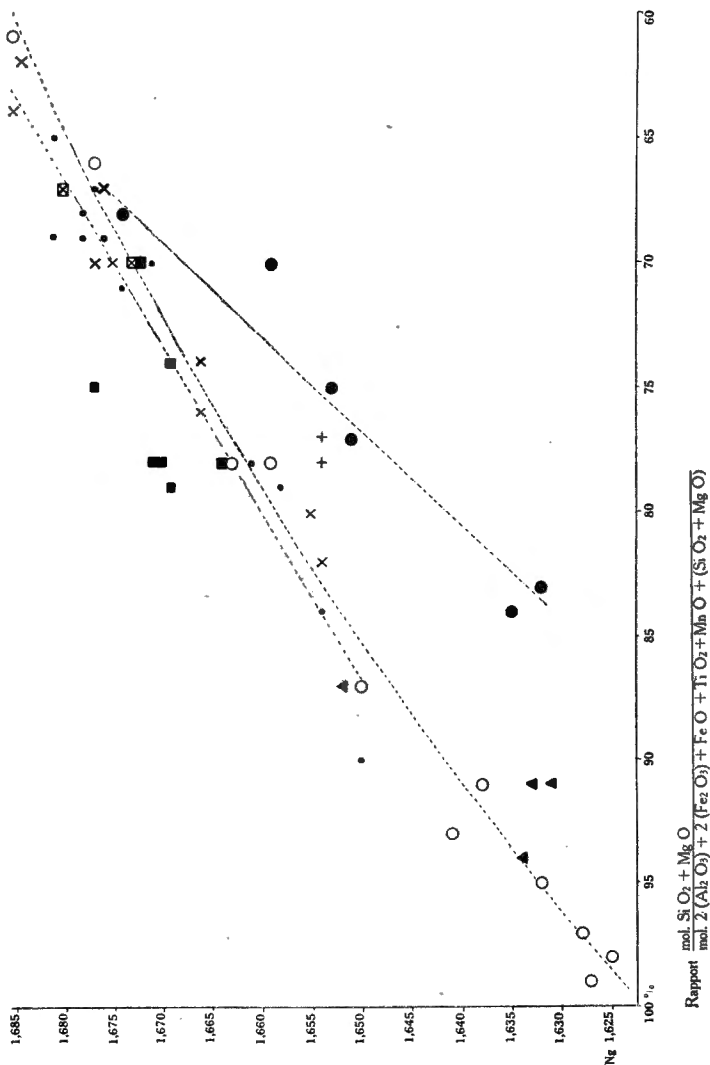
En présence de ces diverses observations, nous avons tenté d'établir des diagrammes qui, sans donner par la seule lecture des indices une indication non ambiguë de la composition chimique, ce qui apparaît actuellement impossible, fourniraient, au moins pour certains groupes d'amphiboles, identifiés à l'aide d'autres critères, des renseignements sur la place occupée dans ce groupe par le minéral étudié.

Comme il était à prévoir, ainsi que nous l'avons dit à propos de la complexité de la composition chimique, ces tentatives furent peu fructueuses. Ont été pris successivement comme base des graphiques, isolément ou ensemble, les rapports moléculaires de la silice à l'alumine, de l'oxyde ferreux à la magnésie, de l'oxyde de fer (ferreux ou total) à l'alumine, ou encore les rapports atomiques de Si, Al, Mg, Fe. Ces essais, tout empiriques, nous ont conduit au diagramme fig. 5 établissant une relation entre l'indice ng et la somme moléculaire Si O₂ et Mg O, ou au diagramme fig. 6, équivalent au précédent, construit d'après le rapport moléculaire



Mieux que d'autres, ils localisent dans une zone relativement étroite les points correspondant aux divers groupes d'amphiboles : hornblendes, pargasites, trémolites-actinotes, établissant donc pour chacun d'eux un rapport assez précis entre l'indice et le critère chimique adopté.

Si les pargasites très pauvres en fer et, d'autre part, les trémolites et actinotes se trouvent bien isolées, par contre les va-



riétés plus ferrifères des pargasites et des actinotes se rapprochent fort de la zone des hornblendes. A vrai dire, les analyses dont nous disposons, celles rapportées par Kunitz et les nôtres, pour lesquelles sont connus à la fois caractères optiques et composition chimique, sont trop peu nombreuses pour définir les particularités des pargasites. Il n'apparaît pas que des termes de passage existent entre la trémolite et les pargasites très pauvres en fer, ni qu'une série continue relie les pargasites aux hornblendes.

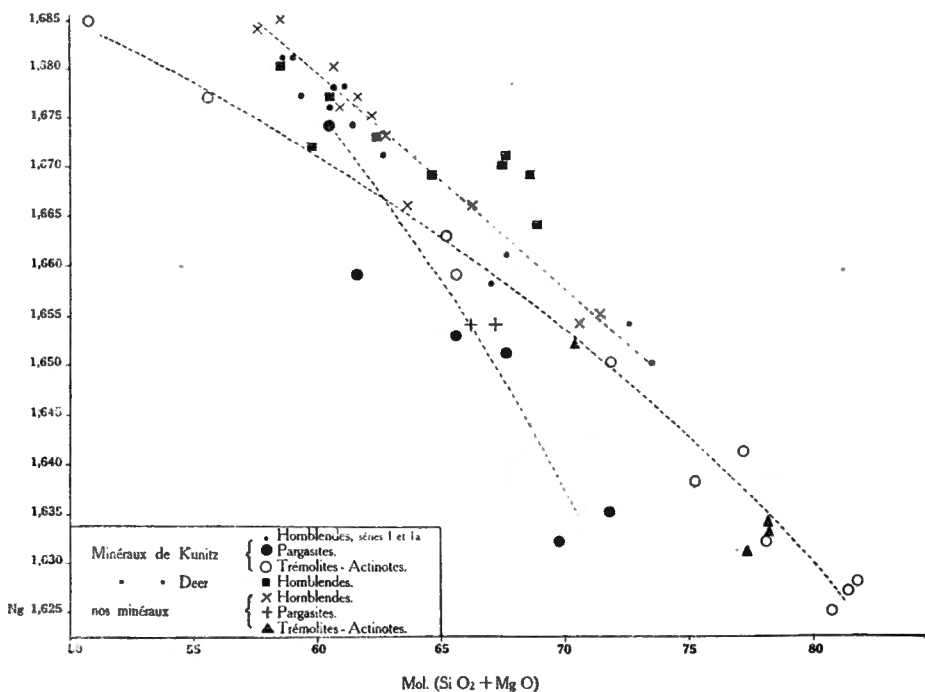


Fig. 6.

Seule la série des actinotes est bien caractérisée, simple, et pour ce motif déjà bien étudiée.

Pour que les diagrammes établis plus haut puissent être de quelque utilité, il importe de disposer de critères autres que les indices, différenciant les groupes entre eux : pour les pargasites le signe positif, pour les actinotes les angles d'extinction ($ng \wedge c$) plus faible que chez les hornblendes. Mais ce dernier critère est, en pratique, d'assez faible valeur.

En terminant cette modeste contribution à l'étude des amphiboles, si les conclusions de caractère négatif l'emportent peut-être sur les données positives nouvelles, nous exprimons l'espoir que la patience et la perspicacité des chercheurs aura un jour raison de la décevante complexité avec laquelle les lois de la nature, en elles-mêmes toujours si uniformes et convergentes, se manifestent à nous.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à M. le Professeur Van Straelen, directeur du Musée royal d'Histoire naturelle à Bruxelles, pour l'obligeance avec laquelle il a mis à notre disposition minéraux et matériel d'étude.

Nous nous faisons également un devoir de remercier M. le Professeur Thoreau, de l'Université de Louvain, de l'intérêt avec lequel il a voulu suivre cette étude et des directives qu'il nous a données dans la synthèse que comportait la dernière et non la moins laborieuse partie du travail.

REFERENCES.

- BERMAN and LARSEN, 1931. — *American Min.*, vol. 16, p. 142.
- BOWEN, 1931. — *Magnesian amphibole from the dry melt.* — *American Journal of Science*, vol. 22, p. 201.
- BRAGG W. L., 1937. — *Anatomic structure of Minerals.* — London, Humphrey Milford.
- DEER W. A., 1938. — *The composition and paragenesis of the hornblendes of the Glen Tilt complex.* — *Min. Magazine*, vol. XXV, 161, p. 56.
- DE KONINCK, 1894. — *Traité de chimie analytique minérale qualitative et quantitative.* — Liège.
- DITTLER, 1933. — *Gesteinsanalytisches Praktikum.* — Berlin.
- HILLEBRAND and LUNDELL, 1929. — *Applied inorganic analysis.* — New-York.
- JAKOB J., 1928. — *Anleitung zur chemischen Gesteinsanalyse.* — Berlin.
- , 1931-1937. — *Untersuchungen an Amphibolen.* — Schweiz. Mitteilungen, Band XI, Heft 1, p. 140; Band XV, Heft 1, p. 151; Band XVII, Heft 2, p. 220.
- JOHANNSEN A., 1914. — *Manual of Petrographic Methods.* — New-York.
- KUNITZ W., 1930. — *Die Isomorphieverhältnisse in der Hornblende-gruppe.* — *Neues Jahrbuch für Min., Beilage Band LX, Abt. A, Zweites Heft*, pp. 171-250, Stuttgart.
- LARSEN E. S., 1938. — *The accuracy of chemical analyses of amphiboles and other silicates.* — *American Journal of Science*, vol. XXXV, p. 94.
- NIKITIN W. W., 1914. — *La méthode universelle de Fédoroff; traduction française par L. Duparc et Vera De Dervies.* — Genève.
- ROSENBUSCH - WÜLFING, 1927. — *Mikroskopische physiographie.* Band I, Hälfte 2; spezieller Teil von O. Mügge.
- SCHALLER W. T., 1916. — *Bull. U. S. Geol. Surv.*, 610, p. 136.
- SUNDIUS, 1931. — *American Journal of Science*, vol. 22, p. 334.
- , 1937. — *Neues Jahrbuch, Referate, Teil I, Heft III*, p. 299.
- WARREN B. E., 1929-1930. — *Zeits. Krist.*, Band 72, p. 42 et p. 493.
- WILLEMS, 1937. — *On the relation between the optical properties and the chemical composition of glaucophane.* — *Proc. Kon. Ak. van Wetenschappen*, Amsterdam.
- WINCHELL, 1933. — *Elements of optical mineralogy, Part II*, p. 237, New-York, 3^e éd.

GOEMAERE, Imprimeur du Roi, Bruxelles.