

Intercroissances et inclusions dans les associations graffonite-sarcopside-triphylite

par ANDRÉ-MATHIEU FRANSOLET,
Institut de Minéralogie, Université de Liège (1).

Résumé. — Des associations de graffonite, sarcopside et triphylite (parfois oxydée en hétérosite), provenant des pegmatites de la plaine des Zenaga (Anti-Atlas, Maroc) et de Marivolinatra (Madagascar), sont l'objet d'un examen pétrologique. Une description détaillée des relations structurales, accompagnées de la composition chimique des graffonites et des sarcopsides, précède une discussion du problème génétique de ces associations.

Les phénomènes d'exsolution sont confirmés dans le cas d'une paragenèse triphylite-sarcopside. En ce qui concerne les relations entre graffonite-sarcopside et graffonite-triphylite, l'hypothèse d'une métasomatose ferreuse et lithique ferreuse, respectivement, est défendue et remplacée dans le contexte pegmatitique.

Mots clés : graffonite, sarcopside, triphylite, hétérosite, genèse, pegmatite, Maroc, Madagascar.

Intergrowths and inclusions phenomena in graffonite-sarcopside-triphylite associations.

Abstract. — Associations of graffonite, sarcopside and triphylite (sometimes oxidized in heterosite) coming from pegmatites of Zenaga plain (Anti-Atlas, Morocco) and of Marivolinatra (Madagascar) are petrologically studied. A detailed description of the structural relationships, with chemical composition of graffonites and sarcopsides, is followed by a discussion on the genetical problem of these associations. Exsolution phenomena are confirmed in the case of the triphylite-sarcopside paragenesis. About the relationships between graffonite-sarcopside and graffonite-triphylite, the hypothesis of a metasomatic replacement, Fe or Li-Fe respectively, is sustained and situated in the pegmatitic environment.

Key words : graffonite, sarcopside, triphylite, heterosite, genesis, pegmatite, Morocco, Madagascar.

INTRODUCTION.

Les trois phosphates de Fe et Mn, la graffonite $(\text{Fe, Mn, Ca})_3(\text{PO}_4)_2$, le sarcopside $(\text{Fe, Mn, Mg})_3(\text{PO}_4)_2$ et la triphylite $\text{Li}(\text{Fe, Mn})\text{PO}_4$, sont généralement considérés comme minéraux de cristallisation assez précoce dans l'évolution des pegmatites granitiques.

Les données minéralogiques, actuellement bien établies concernant ces trois espèces, sont exploitées dans une étude des relations structurales qui caractérisent différents phénomènes d'intercroissances et d'inclusions, fréquents dans les associations de ces trois minéraux. Le but de cette note est de préciser un ensemble de faits nouveaux dans le processus génétique de ces associations et d'éclairer les mécanismes géochimiques propres au rôle des phosphates dans l'histoire des pegmatites.

MÉTHODES ET RÉSULTATS ANALYTIQUES.

Les échantillons examinés proviennent des pegmatites de la plaine des Zenaga (Anti-Atlas, Maroc) et de Marivolinatra (champ d'Ampandramaïka, Madagascar).

L'identification des minéraux essentiels, reconnus dans les différentes associations, met en œuvre leurs propriétés optiques, observables en lame mince. Il est d'ailleurs assez aisé de distinguer, sans ambiguïté

sous le microscope polarisant, le sarcopside, la graffonite et la triphylite. La détection des deux premiers est largement facilitée grâce aux caractères décrits par Čech *et al.* (1962), Hurlbut (1965) et Huvelin *et al.* (1971). Cette analyse optique a été évidemment contrôlée par la diffraction des rayons X, en caméra Debye-Scherrer ou sur diffractomètre. Les données de Čech *et al.* (1962), de Hurlbut (1965) et de Calvo (1968) ont servi de comparaison.

Cette étude pétrologique, destinée à caractériser les relations structurales entre les trois phases précitées, est épaulée par des analyses chimiques à la microsonde électronique. Pour effectuer ces dosages, la graffonite de Kabira, bien homogène et analysée par Von Knorring (1970), a servi de standard.

La microsonde électronique a permis d'établir la composition chimique des sarcopsides et des graffonites. Les résultats de ces nouvelles analyses sont exposés dans les tableaux I et II qui résumant également les étapes du calcul des formules chimiques. De ces analyses, où tout le fer est exprimé sous la forme FeO, un rapport R^{2+} (somme des cations bivalents) : P très voisin de 3/2 apparaît dans chaque cas, après calcul des nombres de cations sur la base des 8 oxygène de la formule théorique. La composition chimique des minéraux considérés figure dans la description des différentes associations.

Les analyses de sarcopside sont comparées à celle du sarcopside d'East Alstead (Hurlbut, 1965). La position de ces quatre résultats, ainsi que celle du sarcopside de la pegmatite Bull Moose (Moore, 1972),

(1) Place du 20-Août, 9, B-4000 Liège, Belgique.

I.
2.
3.
4.
a.
G. M.
b.
c.
d.
R²

P.
F.
M.
M.
C.
T.

P.
F.
M.
M.
C.
R.

est 1
gula
cops
envi

TABLEAU I.

Analyses chimiques des sarcopsides.

1. Pegmatite de Tiouine.
 2. Pegmatite de Marivolinatra (exsolution de sarcopside dans hétérosite).
 3. Idem (lamelles de sarcopside dans grafteronite).
 4. East Alstead, New Hampshire (Hurlbut, 1965).
- a. Analyse réalisée à la microsonde électronique (B. R. G. M.-C. N. R. S.).
 b. Analyse ramenée à 100 %.
 c. Nombre de milliátomes-g déduits de b.
 d. Nombre d'átomes calculés sur la base de 8 oxygène.
 R²⁺. Somme des cations bivalents.

	1		2		3		4
	a	b	a	b	a	b	
P ₂ O ₅	39,02	39,03	41,48	40,78	41,95	41,65	39,8
FeO	46,01	46,03	47,78	47,51	49,08	48,70	50,2
MnO	13,97	13,98	10,94	10,85	5,43	5,39	6,9
MgO	0,96	0,96	0,97	0,96	4,27	4,24	3,5
CaO	-	-	0,12	0,12	0,04	0,04	0,0
Total	99,96	100,00	100,99	100,00	100,77	100,00	100,4
	c	d	c	d	c	d	d
P	550	1,97	574	2,02	586	2,02	1,96
Fe	641	2,29	658	2,52	678	2,55	2,45
Mn	197	0,71	153	0,54	76	0,26	0,34
Mg	24	0,09	24	0,08	105	0,36	0,30
Ca	-	-	2	0,00(7)	1	0,00(3)	-
R ²⁺	-	3,09	-	2,94(7)	-	2,95(3)	3,09

triangulaire Fe-Mn-Ca. On a jugé opportun de ne pas faire intervenir Mg dans cette représentation : son rôle dans la structure de la grafteronite n'est pas essentiel (Calvo, 1968) et il ne dépasse 0,02 atome par formule que dans le dernier cas (colonne 5, tab. II). On constate que le nombre d'átomes Fe est relativement constant dans la maille élémentaire des sarcopsides. Il oscille entre 74 et 79 % ; les autres positions octaédriques sont occupées par Mn et Mg. Les dosages à

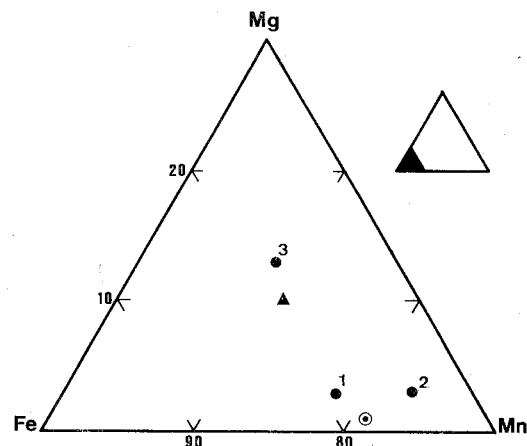


FIG. 1. — Diagramme triangulaire Fe-Mn-Mg indiquant la composition des sarcopsides. Les numéros renvoient au tableau I; le triangle représente le sarcopside d'East Alstead (Hurlbut, 1965) et le cercle centré, celui de Bull Moose (Moore, 1972).

TABLEAU II.

Analyses chimiques des grafteronites.

1. Pegmatite de Tiouine.
 2. Pegmatite de Timoual.
 3. Pegmatite de Marivolinatra (grafteronite à inclusions de triphylite).
 4. Idem (grafteronite à inclusions d'hétérosite, celle-ci contenant les exsolutions de sarcopside).
 5. Idem (grafteronite à lamelles de sarcopside).
 6. Pegmatite de Sidi-bou-Othmane. (Analyse : Orliac in Huvelin *et al.*, 1971.)
- a, b, c, d, R²⁺ : cf. tableau I.

	1		2		3		4		5		6
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
P ₂ O ₅	38,81	39,61	41,04	41,53	40,43	41,05	41,71	41,52	43,49	42,99	40,48
FeO	29,83	30,44	31,34	31,71	25,65	26,05	33,48	33,33	33,35	32,97	35,20
MnO	22,23	22,69	14,93	15,11	23,72	24,09	18,44	18,36	10,86	10,74	17,50
MgO	0,25	0,26	0,63	0,64	0,66	0,67	0,42	0,42	1,71	1,69	0,45
CaO	6,86	7,00	10,73	10,86	8,02	8,14	6,40	6,37	11,75	11,62	6,10
Na ₂ O	-	-	0,16	0,16	-	-	-	-	-	-	0,01
Total	97,98	100,00	98,83	100,01	98,48	100,00	100,45	100,00	101,16	100,01	99,74
	c	d	c	d	c	d	c	d	c	d	d
P	558	1,97	586	2,01	578	2,00	586	2,03	606	2,04	2,00
Fe	424	1,49	441	1,51	363	1,26	464	1,60	459	1,55	1,71
Mn	320	1,13	213	0,73	340	1,18	259	0,90	151	0,51	0,86
Mg	6	0,02	16	0,05	17	0,06	10	0,03	42	0,14	0,04
Ca	125	0,44	194	0,67	145	0,50	116	0,40	207	0,70	0,38
Na	-	-	3	0,01	-	-	-	-	-	-	-
R ²⁺	-	3,08	-	2,97	-	3,00	-	2,93	-	2,90	2,99

est représentée dans une portion du diagramme triangulaire Fe-Mn-Mg de la figure 1. Comme pour le sarcopside, la figure 2 donne la position des grafteronites, envisagées dans le tableau II, dans un diagramme

la microsonde montrent une fois de plus que Ca n'intervient pas comme élément chimique essentiel du sarcopside, confirmant ainsi les observations de Hurlbut (1965).

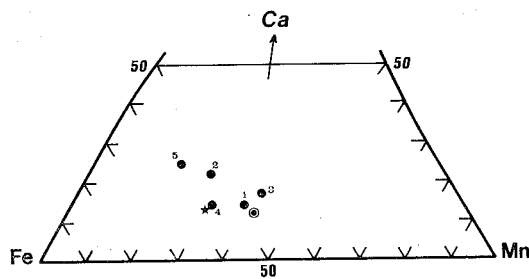
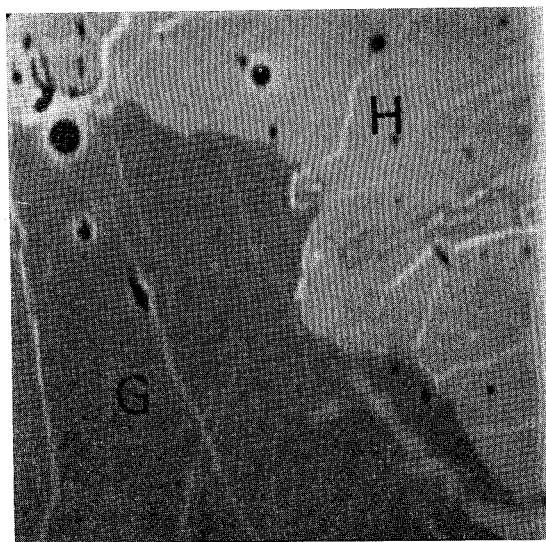
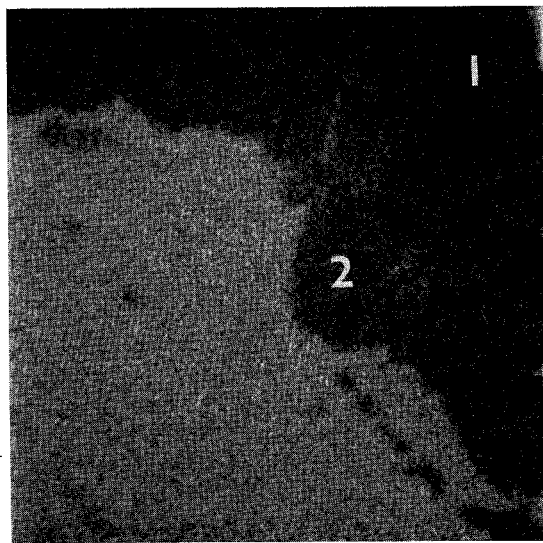


FIG. 2. — Diagramme triangulaire Fe-Mn-Ca indiquant la composition des graffonites. Les numéros renvoient au tableau II; l'étoile représente la graffonite de Sidi-bou-Othmane (Huvelin *et al.*, 1971) et le cercle centré, celle de Kabira (Von Knorring, 1970).



a



b

FIG. 3. Pégmatite de Timoulal. Association graffonite (G) et hétérosite (H).

a : Image électronique (côté de l'image = 200 μm);
b : Carte de distribution du Ca; 1 et 2 renvoient aux analyses du tableau III.

TABLEAU III.

Analyses chimiques de l'hétérosite de Timoulal.

Les numéros 1 et 2 renvoient à la figure 3, précisant la localisation des dosages effectués à la microsonde électronique (B. R. G. M.- C. N. R. S.) sur l'hétérosite, dans la graffonite de la pégmatite de Timoulal.

a. Analyse partielle réalisée à la sonde.
b. Nombre de cations calculés sur la base de 4 P par maille.

	1a	1b	2a	2b
P_2O_5	46,68	4,00	45,51	4,00
Fe_2O_3	41,73	3,18	40,86	3,19
Mn_2O_3	6,23	0,49	6,16	0,49
MgO	2,48	0,37	2,33	0,36
CaO	0,18	0,02	0,89	0,10

Grâce aux balayages, la microsonde a mis en évidence un zonage dans l'hétérosite en inclusions dans la graffonite de la pégmatite de Timoulal. Ce zonage, illustré à la figure 3, est dû à la distribution de Ca. Le tableau III donne la composition chimique de cette hétérosite faiblement calcique. La présence de cet élément accessoire sera discutée plus loin.

DESCRIPTION DES ASSOCIATIONS.

I. Pégmatites de la plaine des Zenaga (Anti-Atlas, Maroc).

Dans le champ pegmatitique encaissé dans les micaschistes précambriens de la plaine des Zenaga, de nombreuses pégmatites contiennent des amas de phosphates au contact de leur noyau de quartz. Le sarcopside n'a été trouvé que dans un petit échantillon, recueilli parmi les débris de la pégmatite à béryl, sise un peu au nord-est de Tiouine, à l'est de la grande piste qui relie Tazenakht à Timgharghine. On le reconnaît facilement, associé principalement à la graffonite.

Tout comme celle de Tiouine, la graffonite est apparue, mêlée à l'hétérosite, dans les masses de phosphates prélevés au contact est d'un gros noyau de quartz, riche en longs cristaux de béryl verdâtre, dans une mince lentille pegmatitique des environs de Timoulal, à environ 10 km au nord-ouest de Timgharghine.

I.1. L'association de la pégmatite de Tiouine.

La petite masse brunâtre révèle, sous le microscope, une association complexe et originale, ce qui lui vaut d'être examinée en premier lieu. Essentiellement constituée de sarcopside et de graffonite, elle comporte encore de l'alluaudite, de la ferrisicklérinite, de l'hétérosite, de l'apatite et une phase indéterminée.

Relations structurales.

Bien caractérisé par ses macles polysynthétiques, son signe négatif et son 2 V petit ($\pm 10^\circ$), le sarcop-

forme des plages à contours arrondis, de 500 μm de diamètre environ, baignant dans la graftedonite (fig. 4). Ces plages se groupent en ensembles de 10 à 20 grains possédant des orientations optiques identiques ou à peine décalées. Le sarcopside est corrodé par la graftedonite polygranulaire qui affecte une structure poikiloblastique nette. Le contact entre ces deux

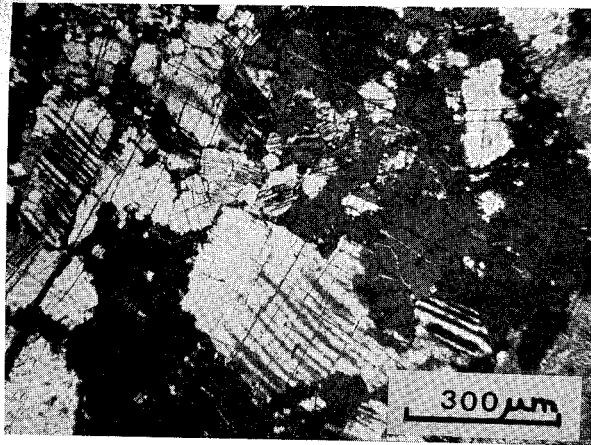


FIG. 4. — Association de sarcopside (blanc ou gris clair) et de graftedonite (gris foncé ou noir), Tiouine. Lum. polarisée analysée.

minéraux, à extinction roulante, est parfois souligné par un mince liseré d'hétérosite développée dans le sarcopside. Des lanières brunes, observées dans celui-ci, dessinent une striation d'orientation différente de celle des macles, se prolongeant d'une plage à l'autre. Il ne s'agit certainement pas de ferrisicklélite et l'hétérosite n'apparaît jamais au contact de cette phase indéterminée qui pourrait constituer une espèce particulière (Moore, 1972).

A la faveur de fissures, comblées d'oxydes de Fe, la ferrisicklélite et l'alluaudite envahissent l'association sarcopside-graftonite. L'alluaudite prédomine largement sur la ferrisicklélite accessoire et il est plus fréquent de la trouver seule, en plages imbriquées, remarquablement fraîches, de 50 à 100 μm , formant des nids ou des zones étirées, indifféremment dans le sarcopside ou la graftedonite.

Enfin, l'apatite, très accessoire, forme quelques minces veines irrégulières recoupant l'association.

D'après les tableaux I et II, la formule chimique du sarcopside de la pegmatite de Tiouine s'écrit : $(\text{Fe}_{0,74}\text{Mn}_{0,23}\text{Mg}_{0,03})_3(\text{PO}_4)_2$ et celle de la graftedonite : $(\text{Fe}_{0,48}\text{Mn}_{0,37}\text{Ca}_{0,14}\text{Mg}_{0,01})_3(\text{PO}_4)_2$.

Discussion.

Le caractère original de l'association sarcopside-graftonite réside dans ses relations structurales. Celles-ci portent à croire que le sarcopside s'est d'abord formé et corrodé ensuite par le développement de la graftedonite poikiloblastique. Sur la base d'une observation unique et localisée, et moyennant des données chimiques qui ne montrent pour la graftedonite qu'un rapport Ca/Mn de 0,37 alors que, dans les autres graftedonites, ce rapport est supérieur à 0,4, il est difficile de découvrir actuellement la raison de cette

crystallisation première de sarcopside. Ce phénomène n'en reste pas moins intéressant car ce minéral n'a jamais été reconnu comme phase primaire (Moore, 1972).

Cette association a ultérieurement subi les effets d'une venue lithique, se traduisant ici par la présence de ferrisicklélite, suivie par le dépôt d'alluaudite et enfin d'apatite. Cette séquence rappelle ainsi celle de Sidi-bou-Othmane (Huvelin *et al.*, 1971).

1.2. L'association de la pegmatite de Timoulal.

Dans la pegmatite de Timoulal, les masses violacées de phosphates de 15 à 20 cm de diamètre, ne montrent pas l'allure nodulaire qu'on a tendance à attribuer, à tort, aux phosphates. En section fraîche, les contours irréguliers, amiboïdes de ces masses phosphatées s'insèrent dans la zone quartzo-feldspathique de la pegmatite et en isolent parfois des résidus. L'association intime de graftedonite et d'hétérosite s'entoure d'une auréole d'apatite cryptogrenue au contact des micas ou des feldspaths.

Relations structurales.

L'examen microscopique de cette association révèle un phénomène d'inclusions d'hétérosite dans la graftedonite (fig. 5). Celle-ci est caractérisée par une structure polygranulaire, constituée de plages de 1 à 3 mm, à extinction onduleuse très marquée.

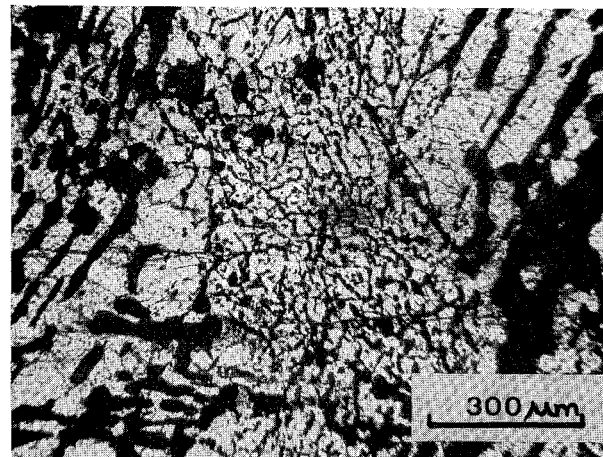


FIG. 5. — Inclusions d'hétérosite (noir) dans une plage de graftedonite (gris clair), Timoulal. Lum. polarisée analysée.

L'hétérosite forme des lamelles longues de 1 à 2 mm, épaisses de 20 à 50 μm suivant des directions parallèles à $\{010\}$ et $\{110\}$ de la graftedonite, ou elle se présente encore en chapelets de grains de 20 à 100 μm plutôt regroupés au contact des plages du minéral hôte. La répartition de la densité de l'hétérosite, soit en lamelles, soit en grains, est fort irrégulière ; de rares sections de graftedonite sont complètement dépourvues du minéral pourpre. Parfois, dans une même plage de graftedonite, les lames d'hétérosite sont brisées, dessinant des chapelets de grains. Là où elle est peu abondante, l'hétérosite apparaît en nuages de petits granules (10 μm), s'éteignant simultanément

et rappelant la structure en échiquier. Les lames et les alignements de grains d'hétérosite sont légèrement incurvés, en relation avec les extinctions onduleuses de la graftedite.

Les silicates isolés dans les phosphates ont également subi les effets d'une contrainte; les plagioclases à 25-30 % An sont cassés et les lames de muscovite, ployées. De la tourmaline bleue et du quartz sont également présents dans ces résidus.

La texture de l'apatite est celle de la fluorapatite d'Angarf-Sud analysée par Fransolet (1975 *b*). Elle contient également un peu de Mn, qualitativement révélé par la microsonde. Ce minéral cryptogrenu dessine une frange pigmentée d'hématite, qui corrode la graftedite par une série de petits golfes. Au contact des inclusions d'hétérosite avec l'apatite, des plages d'alluaudite très mal exprimées, apparemment altérées, remplaceraient l'hétérosite. La frange d'apatite ne se développe pas systématiquement au contact de la graftedite et des silicates. Ceux-ci peuvent se trouver dans la graftedite, simplement bordés de grains d'hétérosite accolés les uns aux autres.

Lorsque l'apatite est en contact avec la muscovite ou l'oligoclase, des paillettes de chlorite vertes pléochroïques se forment dans les silicates. La limite apatite-chlorite très irrégulière se charge d'oxyde de Fe, contrairement à la limite graftedite-apatite. La chlorite, dont l'identification a été contrôlée par diffraction des rayons X, est optiquement négative avec un $2V$ très petit et $N_m = 1,656 \pm 0,003$ (pour λ_{Na}). D'après le diagramme d'Albee (1962), il s'agit d'une chlorite riche en fer.

L'analyse chimique de la graftedite (tabl. II, col. 2) fournit la composition $(Fe_{0,51}Mn_{0,25}Ca_{0,22}Mg_{0,02})_3(PO_4)_2$ et pour l'hétérosite $(Fe_{0,81}^{3+}Mn_{0,12}^{3+}Mg_{0,10}Ca_{0,005})PO_4$. Par balayages, on voit apparaître une zone plus calcique dans l'hétérosite (fig. 3) dont la composition se rapproche de $(Fe_{0,80}^{3+}Mn_{0,12}^{3+}Mg_{0,10}Ca_{0,02})PO_4$.

Discussion.

Les textures de l'hétérosite, son zonage en Ca et sa distribution dans la graftedite feront l'objet d'une discussion générale, exposée plus loin, sur la base d'observations supplémentaires.

L'intérêt de cette association peut déjà être centré sur la présence d'apatite sous forme d'auréole cryptogrenue. Il ne s'agit pas d'une bordure de réaction entre le phosphate Fe-Mn et le silicate.

En effet, la muscovite ou l'oligoclase existent dans la graftedite, sans bordure d'apatite. Celle-ci résulte d'une phase postérieure, riche en Ca, qui a corrodé et dissous l'association graftedite-hétérosite, remobilisant les cations réputés immobiles Fe, Mg et Mn. Les premiers se fixent notamment, par réaction et corrosion avec le feldspath ou la muscovite, dans une chlorite trioctaédrique et l'excès de Fe s'exprime sous forme d'hématite, dispersée dans l'apatite; Mn éventuellement dans le réseau de la fluorapatite et aussi dans celui des oxydes de Fe.

Dans les résidus de muscovite ou de feldspath piégés dans le phosphate Fe-Mn, on n'observe pas de scorzalite comme à Angarf-Sud (Fransolet, 1975 *a*). Cette absence pourrait être due, ici, à la teneur en Ca

du milieu générateur de graftedite, qui contrarie la formation de scorzalite (Lugovskoi, 1965).

2. La pegmatite de Marivolinatra (Madagascar).

La pegmatite de Marivolinatra fait partie du champ pegmatitique d'Ampandramaika, injecté dans des micaschistes précambriens. Riche en muscovite et beryl et avec son noyau de quartz très développé, cette lentille rappelle le type des pegmatites caractéristiques de la plaine des Zenaga; cependant, son contenu en columbo-tantalite paraît plus élevé et ses dimensions beaucoup plus grandes.

Parmi les échantillons provenant de cette importante pegmatite, actuellement très altérée, mais dont un inventaire minéralogique a été dressé par Béhier (1960), la graftedite, assez fréquente, présente des associations remarquables avec la triphylite et le sarcopside. Ce dernier montre, soit des lattes maclées dans la graftedite, rappelant singulièrement l'association d'East Alstead (Hurlbut, 1965), soit des allures de « perthites » dans l'hétérosite en inclusions dans la graftedite, comme Laubmann *et al.* (1920) semblent l'avoir observé à Marchaney (Allemagne).

Trois types d'associations seront décrits successivement :

- graftedite-triphylite,
- graftedite-sarcopside,
- graftedite-hétérosite-sarcopside.

2.1. L'association à graftedite-triphylite.

La description s'attache surtout à préciser les relations du couple graftedite-triphylite dans des assemblages assez complexes donnant l'impression d'une brèche à éléments roses d'environ 2 cm, cimentés par une pâte de phosphates verts enchevêtrés (barbo-salite, rockbridgite notamment) avec quelques grains de pyrrhotite. Une arrojadite plombifère (Fransolet, 1975 *b*), peu abondante, de teinte vert clair, se développe en noyaux de taille très variable, sans montrer de relations particulièrement nettes avec la graftedite ou la triphylite. Sa présence pose un problème qui n'est pas le propos de ce travail.

Relations structurales.

Dans les masses roses, la graftedite $(Fe_{0,42}Mn_{0,39}Ca_{0,17}Mg_{0,02})_3(PO_4)_2$, en grandes plages à extinction faiblement ondulante, contient de la triphylite en inclusions. Le minéral lithique offre une grande variété de formes : des lattes et des fuseaux, larges de 50 à 150 μm , des gouttelettes de 50 μm ou encore des grains hypidiomorphes de 100 à 500 μm . Dans une plage monominérale de graftedite, les grains de triphylite présentent des extinctions différentes (fig. 6). Un grain isolé peut comporter deux plages à orientations optiques différentes ou se développer à cheval sur les contacts de deux sections de graftedite. Enfin, quelques grandes plages de triphylite montrent un faible zonage parallèle au contact avec le minéral hôte.

On remarque encore des résidus de plagioclases à 10-15 % An, cassés et recimentés par la graftedite poikilitique ou par la pyrrhotite xénomorphe. Ces

résidu
à très
covite



Fig. 6.
plage
anal

2.2. L'association à graftedite-sarcopside.

Ass
le sar
vert
derni
0,5 cr
grenu
sarcop
(Fe_{0,5}
(PO₄)₂)

Relat

Cor
deux
struc

La
appari
l'autr
ture
ponts
extin
maclé
obliqu
qu'au
tation

En
détac
faible
ration
miné
typic
linati
but,

Su
comr
dente
lame

résidus atteignent 500 μm et contiennent du quartz à très forte extinction onduleuse et des plages de muscovite incurvées.

minéral hôte, nuages ou bouffées de granules de 10 μm . Une même inclusion de sarcopside peut présenter des orientations optiques différentes.

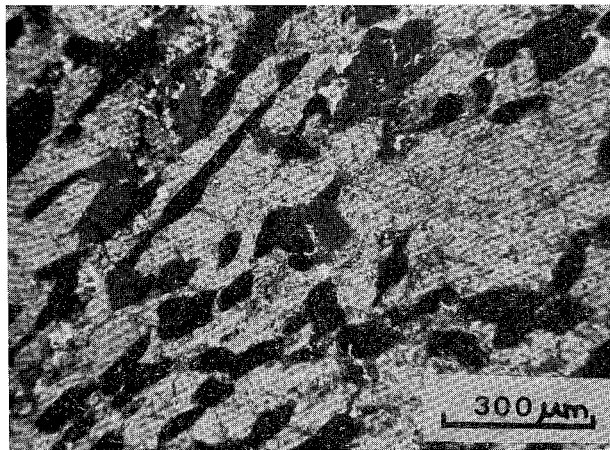


FIG. 6. — Inclusions de triphylite (noir ou gris foncé) dans une plage de graffonite (gris clair), Marivolinatra. Lum. polarisée analysée.

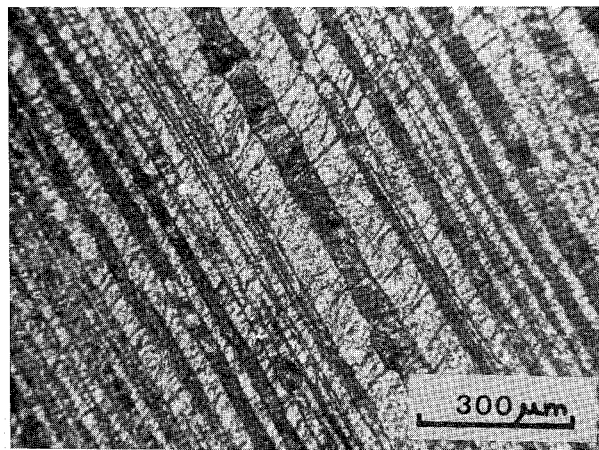


FIG. 7. — Lamelles de sarcopside (gris foncé) dans la graffonite (gris clair), Marivolinatra. Lum. polarisée analysée.

2.2. L'association à graffonite-sarcopside.

Associés en une masse gris rosâtre, la graffonite et le sarcopside s'altèrent simultanément en une masse vert sombre de barbosalite. Le contact avec cette dernière est festonné par une bande vert pâle, large de 0,5 cm au maximum, de ludlamite à texture cryptogrenue, qui remplace indifféremment graffonite et sarcopside dont les compositions sont respectivement : $(\text{Fe}_{0,53}\text{Ca}_{0,24}\text{Mn}_{0,18}\text{Mg}_{0,05})_3(\text{PO}_4)_2$ et $(\text{Fe}_{0,78}\text{Mg}_{0,12}\text{Mn}_{0,09})_3(\text{PO}_4)_2$ (tabl. I et II).

Relations structurales.

Contrairement aux relations observées entre ces deux minéraux dans l'association de Tiouine, la structure est ici de type nettement lamellaire.

La structure du sarcopside est très complexe. Elle apparaît lépidoblastique, mais, d'un « feuillet » à l'autre, l'orientation optique du minéral et la structure intime varient. Les lamelles sont crénelées et des ponts relient parfois deux bandes voisines. Leur extinction est commune sur de grandes plages et les macles polysynthétiques apparaissent généralement obliques sur la direction texturale des lamelles sans qu'aucune loi particulière ne se dégage de leur orientation.

Entre les différentes lamelles de sarcopside, se détache la graffonite, monominérale, de biréfringence faible et d'orientation constante dans toute la préparation. Localement, la graffonite est moins contaminée par le sarcopside, montrant des relations typiques, fréquentes dans les échantillons de Marivolinatra (fig. 7) et rappelant celles d'East Alstead (Hurlbut, 1965).

Sur la figure 8, les inclusions de sarcopside montrent, comme celles de la triphylite de l'association précédente, des formes très variées : texture micrographique, lames parallèles aux directions $\{010\}$ et $\{110\}$ du

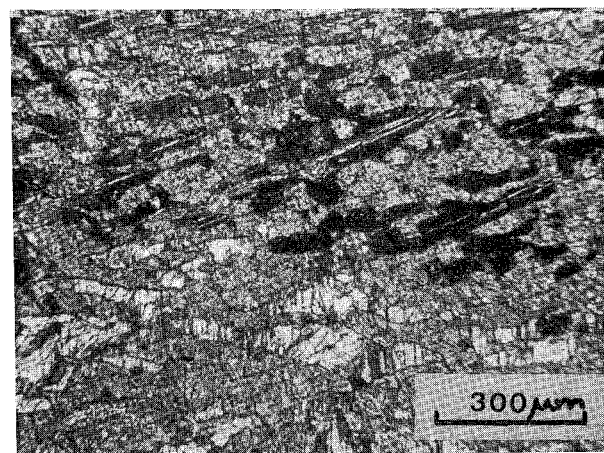


FIG. 8. — Inclusions de sarcopside (blanc, noir ou gris foncé) dans la graffonite (gris clair), Marivolinatra. Lum. polarisée analysée.

2.3. L'association à graffonite-hétérosite-sarcopside.

Sans tenir compte de quelques phases très peu abondantes et dont le rôle est manifestement accessoire dans le problème qui nous occupe, cette association importante et fréquente est représentée à la figure 9.

Relations structurales.

Développée en monocristaux, la graffonite contient des inclusions où apparaissent très localement la transformation de triphylite en ferrisicklélite, ainsi que celle de ferrisicklélite en hétérosite.

L'hétérosite est de loin la plus abondante et les phénomènes d'oxydation ne sont pas suffisamment démonstratifs pour en permettre une description précise. Ainsi, dans une inclusion, la ferrisicklélite se développe à partir d'une trame subrectangulaire qui envahit la triphylite suivant ses clivages $\{011\}$.

Les inclusions d'hétérosite sont généralement hypidiomorphes, accessoirement globuleuses ou même à contour irrégulier ; ce sont des lamelles très étirées, des grains sublosangiques ou des bâtonnets terminés

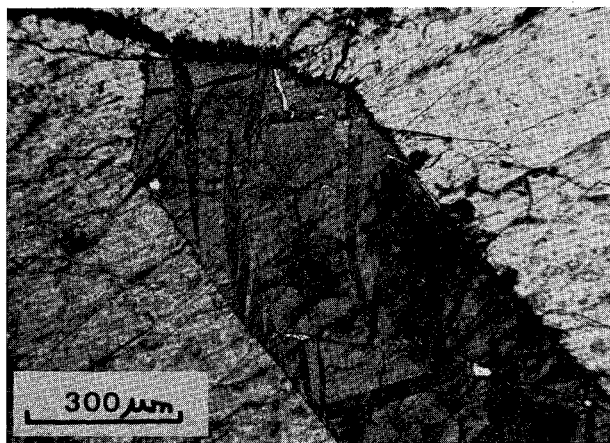


FIG. 9. — Inclusion d'hétérosite à démixtions de sarcopside dans une plaque de graftonite, Marivolinatra. Lum. polarisée analysée.

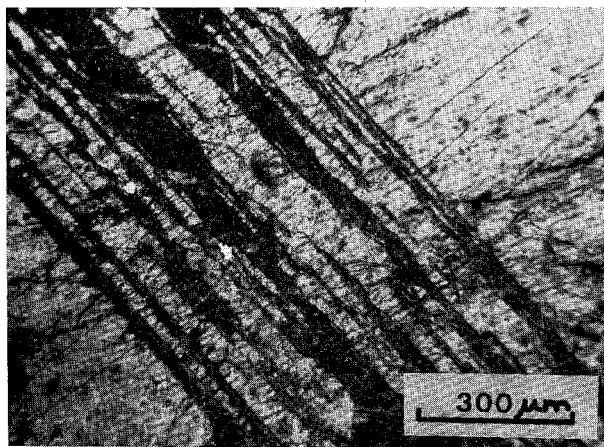


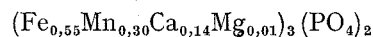
FIG. 10. — Structure en relais des lamelles d'hétérosite dans la graftonite, Marivolinatra. Lum. polarisée analysée.

aux deux extrémités par un triangle trapu. Ces inclusions s'alignent plus ou moins suivant leur propre forme, selon une direction perpendiculaire au clivage fin (010) de la graftonite. Elles communiquent entre elles par une série de fines connections ou se relaient par un système en bayonnette, le tout conservant la même direction (fig. 10). Ces inclusions forment ainsi des ensembles de plages à orientation optique commune.

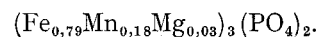
Le sarcopside apparaît sous un aspect caractéristique des « flammes perthites » (Laubmann *et al.*, 1920). D'après les observations à la platine de Fédorov, malgré les fortes absorptions de l'hétérosite dans laquelle le sarcopside se présente le mieux (fig. 9), l'orientation des démixtions paraît en accord avec {112} du minéral hôte et du sarcopside (Peacor, 1969). Ces démixtions sont parfois en contact avec la graftonite. Dans les inclusions d'hétérosite de même orien-

tation optique, le sarcopside s'éteint simultanément. Enfin, la disposition générale et la géométrie des inclusions dans la graftonite reste identique quelle que soit l'orientation de la section dans l'échantillon.

La composition de graftonite est :



et celle du sarcopside :



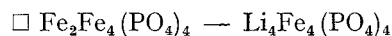
DISCUSSION SUR LES RELATIONS GÉNÉTIQUES DES ASSOCIATIONS TRIPHYLITE-SARCOPSIDE-GRAFTONITE.

Cette partie est subdivisée en trois volets où sont successivement envisagées les réflexions et les conclusions sur les relations structurales présentées par les trois couples de minéraux à savoir, triphylite-sarcopside, graftonite-sarcopside et graftonite-triphylite.

I. Triphylite-sarcopside.

Le phénomène de démixtion de sarcopside dans la triphylite semble moins fréquent que les inclusions ou les intercroissances observées dans les associations graftonite-sarcopside ou graftonite-triphylite.

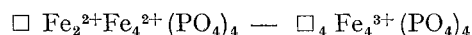
Les relations observées entre le sarcopside et la triphylite, transformée en hétérosite, dans la masse de graftonite à Marivolinatra (fig. 9) sont typiquement celles qui caractérisent les exsolutions. Tous les faits d'observations sont en accord avec les critères définis par Schwartz (1942) et aucun phénomène ne suggère le remplacement. L'orientation des exsolutions de sarcopside dans la triphylite suivant {112}, d'après les données de Peacor (1969), est régulière et la distribution des figures de démixtion de sarcopside et de la triphylite sont très comparables ; le groupe spatial du sarcopside $P2_1/a$ est toutefois différent de celui de la triphylite $Pnam$ (Moore, 1972). Cet auteur propose, entre ces deux phases isostructurales, la possibilité d'une série :



continue à haute température, provoquant la formation de deux phases solides au cours de la cristallisation.

Les lamelles de sarcopside s'observent dans la triphylite fraîche et dans la phase oxydée, l'hétérosite. L'oxydation, qui s'accompagne d'un lessivage de Li dans la triphylite et qui préserve le sarcopside isostructural, a pu être décelée lors de l'examen microscopique.

Cette relation hétérosite-sarcopside démontre clairement que l'hétérosite ne peut constituer une phase de première génération. De plus, elle ne permet pas d'imaginer, comme dans le cas d'une série continue sarcopside-triphylite (Moore, 1972), une série analogue :



qui, en se refroidissant, provoquerait la cristallisation de deux phases solides, l'une ferreuse, l'autre ferrique.

La présence de sarcopside, en démixtions dans l'hétérosite ou la ferricklélite, pourrait donc constituer un témoin d'une phase lithique.

2. Graftonite-sarcopside.

Dans le cas des relations qui caractérisent l'association graftonite-sarcopside, fréquente dans les pegmatites granitiques, l'interprétation de ce phénomène semble délicate et les auteurs ont proposé diverses explications. Peacor *et al.* (1964) ainsi que Hurlbut (1965) considèrent les lamelles de sarcopside dans la graftonite comme un phénomène d'exsolution. Peacor (1969) observe toutefois que les eutectiques présentent des structures semblables. Huvelin *et al.* (1971) admettent cette dernière hypothèse comme plus vraisemblable, moyennant certaines critiques. Pour Moore (1972), le sarcopside est de toute évidence un produit d'exsolution de la graftonite.

L'étude détaillée des associations de Marivolinatra fournit de nouveaux arguments, permettant d'étayer une hypothèse différente encore.

Grâce aux critères de Schwartz (1942) requis pour l'identification des exsolutions, les points suivants écartent l'hypothèse du phénomène d'exsolution. De plus, le moindre critère positif de remplacement est un critère négatif d'exsolution (Schwartz, 1942) :

- la structure cristalline de la graftonite est différente de celle du sarcopside (Calvo, 1968 et Moore, 1972) ;

- les orientations optiques des inclusions du sarcopside sont très variables et leur distribution dans la graftonite, très inégale ;

- une concentration parfois élevée en inclusions minuscules de sarcopside se localise près des fissures.

A Sidi-bou-Othmane, dans l'association graftonite-sarcopside, Huvelin *et al.* (1971) observent toutes les structures qui sont décrites dans les associations de Marivolinatra. Ainsi les nuages de sarcopside en grains de 10 μ m, à extinction commune, que ces auteurs appellent texture pegmatique, sont qualifiées ici structure en échiquier. Cependant, d'après la description fine de l'association de Sidi-bou-Othmane (Huvelin *et al.*, 1971), seule la graftonite montre les effets d'une protoclaste et le sarcopside n'est pas signalé avec des extinctions onduleuses mais bien en relation avec un régime de fissures ; à Marivolinatra, ni la graftonite ni le sarcopside ne présentent d'extinction roulante.

Lorsqu'on compare les faits structuraux propres aux intercroissances graphiques de quartz dans les feldspaths potassiques, décrites et très bien illustrées par Seclaman *et al.* (1972) qui attribuent une origine métasomatique au quartz, le feldspath étant seul affecté par des extinctions roulantes, on réunit, moyennant les observations faites à Marivolinatra et à Sidi-bou-Othmane, un éventail d'arguments militant en faveur d'une origine métasomatique du sarcopside.

Dans les deux associations, le sarcopside est postérieur et remplace la graftonite. Huvelin *et al.* (1971) admettent déjà qu'une partie du sarcopside est plus tardive que la graftonite de Sidi-bou-Othmane.

Comme l'albitisation peut se développer dans un plagioclase avec une structure en échiquier, il est

intéressant d'établir ici la comparaison et de proposer le même terme pour désigner cette structure de remplacement métasomatique de la graftonite par le sarcopside.

3. Graftonite-triphylite.

Huvelin *et al.* (1971) ont encore remarqué que le sarcopside disparaît dans le cortex des cristaux de graftonite où se développent la ferricklélite et l'alluaudite.

La texture « pegmatitique » remarquable est commune à deux phases isostructurales, le sarcopside et la triphylite (ou ferricklélite). Ce mécanisme donne l'impression d'un remplacement de la graftonite par une phase lithique qui s'oxyde finalement au contact d'un milieu enrichi en (Na, Ca), favorable à l'alluaudite.

D'après les observations microscopiques, les relations structurales propres au couple graftonite-sarcopside se retrouvent dans l'association graftonite-triphylite de Marivolinatra.

Les propriétés structurales du sarcopside et de la triphylite sont très comparables ainsi que l'ont souligné Čech *et al.* (1962) et Huvelin *et al.* (1971). L'hétérosite de Timoulal montre une structure en échiquier ; les lames et les grains de ce minéral ont des allures micrographiques, comme dans le sarcopside de Marivolinatra. Chaque occurrence a révélé des inclusions d'hétérosite ou de triphylite avec des orientations optiques différentes dans des plages monominérales de graftonite.

La forme géométrique particulière des inclusions d'hétérosite dans la graftonite de Marivolinatra pourrait suggérer une relation eutecticale. D'une part, on ne peut être certain qu'une intercroissance de deux minéraux soit effectivement produite par la cristallisation eutecticale (Ingerson, 1955). D'autre part, une telle hypothèse n'explique pas les bayonnettes qui relient ces inclusions les unes aux autres, comme le montre la figure 10. La présence de filonnets polygranulaires d'hétérosite observés à Marivolinatra et celle de grains du même minéral développés entre les plages plus grandes de graftonite à Timoulal ne constituent pas des arguments favorables à l'hypothèse d'exsolution de triphylite dans la graftonite.

En s'appuyant encore sur les critères de Schwartz (1942), les relations structurales propres au couple graftonite-triphylite s'expliquent mieux si on conçoit une métasomatose lithique de la graftonite qui développe des plages de triphylite dans le minéral hôte, celles-ci subissant sélectivement l'oxydation ultérieure en ferricklélite et en hétérosite.

L'hypothèse de la métasomatose lithique explique également les intercroissances de lithiophilite suivant le clivage (010) de la beusite $(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ca})_3(\text{PO}_4)_2$ et les « intercroissances granulaires » entre ces deux minéraux manganésifères, illustrées et décrites par Hurlbut *et al.* (1968).

Il serait souhaitable de doser à la sonde et dans diverses occurrences d'inclusions de triphylite (ou de sarcopside) dans la graftonite, le rapport $\text{Fe}/\text{Mn}/\text{Mg}/\text{Ca}$ d'une grande population d'inclusions présentant des aspects ou des dispositions différentes. Dans le cas de

Timoulal, un zonage est apparu dans certaines inclusions d'hétérosite : non repérable optiquement, il se marque par la distribution du Ca, concentré au contact de la graftedite (fig. 3). Dans l'association de Marivolinatra, l'hétérosite à exsolution de sarcopside ne présente pas de zonage, repérable à la sonde, au contact de la graftedite. La distribution zonaire du Ca dans les inclusions de triphylite ou d'hétérosite ne semble pas systématique mais suggère un processus de remplacement interrompu, voire en déséquilibre. Il y aurait une analogie avec la faible teneur en Ca dans le sarcopside de Marivolinatra qui traduirait également, mais sans faire apparaître un zonage, une expulsion imparfaite de cet élément, lors de la métasomatose ferreuse.

CONCLUSIONS.

Cette recherche, limitée à quelques associations graftedite-sarcopside-triphylite, montre la complexité des mécanismes de mise en place de ces minéraux.

L'observation des relations structurales confirme le phénomène de démixtion de sarcopside dans la triphylite ; la cristallisation de ces deux phases isostructurales provient d'une phase unique, homogène à plus haute température (Moore, 1972).

Les relations analogues entre graftedite et triphylite ou graftedite et sarcopside ne permettent pas de reconnaître ce type de phénomène. De telles relations s'expliquent et se justifient par l'hypothèse d'un processus métasomatique essentiellement lithique dans le premier couple envisagé, et plutôt ferreux dans le second. Ces considérations ne concernent pas le cas isolé de l'association problématique de Tiouine où le sarcopside se serait formé en premier lieu.

Les conditions de formation de ces trois phosphates, replacés dans leur contexte pegmatitique, sont loin d'être élucidées. Cependant, on peut avancer quelques considérations d'ordre chimique.

De manière très générale, la graftedite se présente souvent en relations assez intimes avec l'oligoclase. A Sidi-bou-Othmane, Huvelin *et al.* (1971) placent la graftedite en tête de la séquence de dépôts des phosphates. A Marivolinatra, sur la seule base des échantillons observés, la graftedite est nettement antérieure au sarcopside ou à la triphylite. Dans la mince lentille de Timoulal, d'un type peu évolué de pegmatite zonée à beryl pierreux, sans développement d'une phase lithique ou sodique notable, la graftedite apparaît également comme de première cristallisation, largement développée.

Dans le processus métasomatique proposé ici, le calcium de la graftedite est expulsé lors de l'apport du fer, ce qui conduit à la formation de sarcopside ; ou lors de l'intervention du fer et du lithium, ce qui favorise l'élaboration de triphylite avec ou sans sarcopside en exsolution suivant la valeur du rapport Li/Fe.

La figure II présente schématiquement cette évolution. Le mécanisme géochimique est en accord avec

le comportement généralement admis pour ces éléments dans la phase pegmatitique proprement dite, qui permet la formation des pegmatites à plagioclases, microcline et muscovite. Ce sont les types 2 et 3 et encore un peu le type 4 de Ginzburg (Varlamoff, 1959), caractérisées par l'étape géochimique II, dite potassique (Ginzburg, 1960). Il semble que la graftedite s'élabore au départ de cette étape, au cours de laquelle s'effectue le remplacement du plagioclase par le micro-

	TYPES DE FILONS DE PEGMATITES			
	1	2	3	4
ETAPE GEOCHIMIQUE	Ca.Na	Ca.Na	(Ca.Na)	(Ca.Na)
I				
II		K	K	K
III				(Li)
MINERALISATION		A MUSCOVITE		
			A BERYL	
GRAFTONITE	—————			
SARCOPSIDE	—————			
TRIPHYLITE	—————			
Comportement du FER	—————			

FIG. II. — Les associations graftedite-sarcopside-triphylite et la classification des pegmatites « non remplacées » de Ginzburg

cline, mobilisant Na et notamment Ca, indispensable à ce phosphate. La fin de l'étape potassique est la période de formation de schorlite, beryl, ilménorutile, etc. (Ginzburg, 1960). C'est vraisemblablement un moment d'activité suffisante de Fe pour que le sarcopside remplace la graftedite et que la triphylite, témoin des toutes premières manifestations lithiques, même modestes, intervienne également. Le rôle du magnésium, tout comme un épanouissement de celui de Ca et Fe, sont directement déterminés par le contexte géologique encaissant.

Remerciements. — J'exprime mes très vifs remerciements à M. J. Mantiene, B. R. G. M., Orléans, qui m'a si aimablement fourni des échantillons pour la présente étude. J'adresse ma sincère gratitude à MM. R. Pierrot et Z. Johan ainsi qu'aux techniciens de la microsonde B. R. G. M.-C. N. R. S., Orléans. Je remercie encore M. F. Permingeat qui m'a conseillé au cours de cette recherche et M. le professeur P. Bourguignon qui a critiqué le manuscrit. Le séjour au Maroc a pu être réalisé grâce à l'aide efficace du S. E. G. M. de Rabat et l'appui financier du Ministère de l'Éducation Nationale de Belgique et celui à Madagascar, grâce à une bourse du Fonds National de la Recherche Scientifique de Belgique.

Reçu le 25 janvier 1977.

Accepté le 7 mars 1977.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBEE, A. L. (1962). — Relationships between the mineral association, chemical composition and physical properties of the chlorite series. *Amer. Mineralogist*, 47, 851-870.
- BEHIER, J. (1960). — Contribution à la minéralogie de Madagascar. *Ann. Géol. Madagascar*, fasc. n° 29, 78 p.
- CALVO, C. (1968). — The crystal structure of grafftonite. *Amer. Mineralogist*, 53, 742-750.
- ČECH, F., PADĚRA, K. and POVONDRA, P. (1962). — The sarcopside problem. *Acta Univ. Carolinae, Geol.* 3, 145-157.
- FRANSOLET, A.-M. (1975 a). — On scorzalite from the Angarf-Sud pegmatite, Zenaga Plain, Anti-Atlas, Morocco. *Fortschr. Mineral.*, 52, spec. issue : I. M. A. papers 9th Meeting Berlin 1974, 285-291.
- FRANSOLET, A.-M. (1975 b). — Étude minéralogique et pétrologique des phosphates des pegmatites granitiques. Thèse de doctorat inédite, Institut de Minéralogie, Univ. de Liège.
- GINZBURG, A. I. (1960). — Specific geochemical features of the pegmatitic process. Intern. Geol. Congress, Rep. 21th Sess., Norden, part XVII, sect. 17, 111-121.
- HURLBUT, C. S. (1965). — Detailed description of sarcopside from East Alstead, New Hampshire. *Amer. Mineralogist*, 50, 1698-1707.
- HURLBUT, C. S. and ARISTARAIN, L. F. (1968). — Beusite, a new mineral from Argentina and the grafftonite-beusite series. *Amer. Mineralogist*, 53, 1799-1814.
- HUVELIN, P., ORLIAC, M. et PERMINGEAT, F. (1971). — Grafftonite et sarcopside de Sidi-bou-Othmane (Jelibet, Maroc). *Notes Serv. Géol. Maroc*, Rabat, 31, n° 237, 277-284.
- INGERSON, E. (1955). — Methods and problems of geologic thermometry. *Econ. Geol.*, 50th Anniv. Vol., 341-359.
- LAUBMANN, H. und STEINMETZ, H. (1920). — Phosphatführende Pegmatite des Oberpfälzer und Bayerischen Waldes. *Z. Krystallogr.*, 55, 523-586.
- LUGOVSKOĬ, G. P. (1965). — Scorzalite from siberian pegmatites. *Zap. Vses. Min. Obsh.* (Mem. All. Union Min. Soc.), 94, 212.
- MOORE, P. B. (1972). — Sarcopside : its atomic arrangement. *Amer. Mineralogist*, 57, 24-35.
- PEACOR, D. R. and GARSKE, D. (1964). — Sarcopside from Deering and East Alstead, New Hampshire. *Amer. Mineralogist*, 49, 1149-1150.
- PEACOR, D. R. (1969). — Triphylite-sarcopside-grafftonite intergrowths from Custer, South Dakota. *Amer. Mineralogist*, 54, 969-972.
- SCHWARTZ, G. M. (1942). — Progress in the study of exsolution in ore minerals. *Econ. Geol.*, 37, 345-378.
- SECLAMAN, M. and CONSTANTINESCU, E. (1972). — Metasomatic origin of some micrographic intergrowths. *Amer. Mineralogist*, 57, 932-940.
- VARLAMOFF, N. (1959). — Zonéographie de quelques champs pegmatitiques de l'Afrique centrale et les classifications de K. A. Vlassov et de A. I. Guinsbourg. *Ann. Soc. géol. Belgique*, LXXXII, B 55-B 87.
- VON KNORRING, O. (1970). — Mineralogical and geochemical aspects of pegmatites from orogenic belts of equatorial and southern Africa. In Clifford T. N. and Gass I. G., Eds., African Magmatism and Tectonics, Oliver and Boyd, Edinburg, p. 157-184.