

Évolution spatiale et temporelle de la composition des micas du granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir

G. Monier***, B. Charoy***, M. Cuney**, D. Ohnenstetter*, J.L. Robert*

Mots-clés : Donnée microsonde électronique, Lépidolite, Zinnwaldite, Granite (Granite Beauvoir), Allier (Échassières)

Résumé

Plusieurs centaines d'analyses ont été effectuées sur les lépidolites, lato sensu (incluant les zinnwaldites), du sondage GPF Échassières 1, par voie humide sur échantillons séparés, et par microsonde électronique sur lames minces. Toutes les compositions de lépidolites se situent hors de la lacune de miscibilité entre micas trioctaédriques (type biotite) et micas dioctaédriques (type muscovite). La tendance globale observée, de la base au sommet du sondage, est un appauvrissement progressif en Fe et un enrichissement corrélatif en Li (et F), jusqu'à des termes pratiquement trioctaédriques, proches du joint trilitionite-polythionite. Les discontinuités observées dans la zonalité verticale : augmentations brutales des teneurs en Fe reflètent des injections magmatiques successives, en accord avec l'évolution géochimique générale rencontrée le long du sondage. Les contaminations par l'encaissement micaschisteux se traduisent par l'apport de Mg et la migration de Li et F vers les épontes. Les discontinuités observées à l'échelle du cristal reflètent les étapes successives de cristallisation des micas depuis des stades à pression relativement élevée (≥ 3 kbar) où le mica cristallise précocement, jusqu'à la mise en place à pressions faibles (~ 1 kbar) et la cristallisation finale du magma.

Abstract

Time and space evolution of mica composition in the topaz-lepidolite albitic granite of Beauvoir

Several hundred analyses have been performed by wet chemistry and electron microprobe on lepidolites, lato sensu (including zinnwaldites), from the deep drill hole GPF Échassières 1. All the lepidolite compositions lie outside the miscibility gap between trioctahedral micas (biotite-type) and dioctahedral micas (muscovite-type). The general trend observed from base to top is a progressive decrease of Fe content and a correlative enrichment in Li (and F), up to almost purely trioctahedral micas which lie close to the trilitionite-polythionite join. The discontinuities observed marked by strong and sudden enrichments in Fe correspond to the limits of the successive magmatic injections, in agreement with the geochemical evolution observed along the drill core. Close to the contact with enclosing micaschists, the micas are contaminated by Mg, whereas Li and F migrate from the granite to the micaschists. The discontinuities observed within single crystals reflect the successive crystallization steps of the micas from relatively high pressure stages (≥ 3 kbar), with early mica crystallization, to a lower pressure stage (~ 1 kbar) during final emplacement and crystallization of the magma.

Introduction

Les micas des granites et en particulier des leucogranites peralumineux représentent d'excellents marqueurs de l'évolution magmatique et post-magmatique. Ils présentent de multiples types de substitutions caractéristiques des conditions de température, de fO_2 et de la chimie de leur milieu de croissance. Les études expérimentales (Velde, 1965; Massone, 1981; Robert, 1981; Robert et Volfinger, 1979; Monier, 1987; Monier et Robert, 1986) permettent d'estimer ces paramètres.

Ce type de granite présente généralement une variation remarquable de la nature des micas (Beus, 1962). Cependant

aucune étude détaillée de leur composition n'est disponible. Deux modèles principaux ont été proposés pour expliquer les zonalités observées. Beus (1962) défend un modèle de zonalité d'origine métasomatique tandis que Kovalenko et Kovalenko (1984) envisagent un modèle de différenciation magmatique accompagné d'une diffusion des fluides vers la partie apicale de la chambre.

La réalisation du forage de 900 m Échassières n°1 dans un granite présentant des caractéristiques géochimiques très évoluées avec des enrichissements importants en Li, F, Sn, Ta, Nb, Be (Cuney et al, 1986) a permis d'étudier de manière très détaillée, sur un profil continu, l'évolution des caractéristiques cristalochimiques des micas et ainsi d'apporter des contraintes nouvelles pour la discussion du modèle génétique de ce type de granite.

* GIS CNRS-BRGM, 2 Rue de la Ferrollerie, 45045 Orléans Cedex

** CREGU et GS CNRS-CREGU, BP 23, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex

*** CRPG, BP 20, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex

1. – Données disponibles

Nous disposons de deux séries d'analyses qui se complètent :

– Sept analyses de micas séparés, réalisées par voie humide et provenant d'échantillons choisis dans les trois faciès B 1, B 2 et B 3 définis dans les études préliminaires (Cuney et al., 1986). La séparation de ces micas a été faite avec le plus grand soin et les analyses fournies sont complètes et précises ; elles doivent servir de référence pour l'interprétation des compositions incomplètes déterminées au moyen de la microsonde électronique. Mais, à la différence de ces dernières qui sont ponctuelles, ces analyses par voie humide représentent des moyennes, car elles intègrent, en proportions variables, les différentes compositions qui constituent les micas complexes et zonés, ceci est surtout vrai pour les faciès B 2 et B 3.

	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	52.28	52.23	52.05	50.78	47.81	47.43	48.77
Al ₂ O ₃	22.02	22.06	21.54	21.77	22.54	22.66	22.29
Fe ₂ O ₃	0.12	0.16	0.27	0.28	0.30	0.38	0.40
FeO	0.38	0.60	2.48	3.86	5.79	6.86	6.06
MnO	0.13	0.12	0.74	0.72	0.89	0.87	0.84
MgO	0.04	0.03	0.02	0.01	0.07	0.09	0.07
CaO	0.32	0.05	0.07	0.06	0.12	0.09	0.13
Na ₂ O	0.35	0.39	0.86	0.48	0.48	0.50	0.58
K ₂ O	9.43	9.74	9.24	9.53	9.63	9.23	9.22
TiO ₂	0.03	0.03	0.06	0.07	0.13	0.13	0.11
P ₂ O ₅	0.53	0.51	0.57	0.19	0.61	0.41	0.54
CO ₂	0.09	0.07	0.08	0.07	0.08	0.13	0.20
H ₂ O*	0.87	0.50	0.53	0.58	0.81	0.84	0.88
H ₂ O**	0.40	0.34	0.30	0.43	0.43	n.d.	n.d.
Li ₂ O	5.82	6.33	5.29	5.34	4.74	4.28	4.43
Rb ₂ O	1.86	1.72	1.21	1.23	1.10	1.07	1.07
Cs ₂ O	0.28	0.19	0.23	0.28	0.15	0.13	0.13
F	7.80	8.36	7.60	7.72	7.27	7.33	7.00
TOTAL	102.75	103.43	103.14	103.40	102.95	102.43	102.72
O = F	3.28	3.52	3.20	3.25	3.06	3.09	2.95
TOTAL	99.47	99.91	99.94	100.15	99.89	99.34	99.77
Sn ppm	266	167	197	202	230	198	242
Be ppm	237	92	70	56	42	40	38
Si	6.99	6.95	7.05	6.90	6.60	6.58	6.71
Al ^{IV}	1.01	1.05	0.95	1.10	1.40	1.42	1.29
Al ^{VI}	2.46	2.41	2.49	2.39	2.27	2.29	2.32
Li	3.13	3.39	2.88	2.92	2.63	2.39	2.45
Fe ³⁺	0.01(2)	0.01(6)	0.02(8)	0.02(9)	0.03(1)	0.04(0)	0.04(1)
Fe ²⁺	0.04(2)	0.06(7)	0.28(1)	0.44	0.67	0.80	0.70
Mn	0.01(3)	0.01(4)	0.08(5)	0.08(3)	0.10	0.10	0.10
Mg	0.01	0.00(6)	0.00(4)	0.00(2)	0.01(4)	0.02	0.01(4)
Ti	0.00(3)	0.00(3)	0.00(6)	0.00(7)	0.01(4)	0.01	0.01(1)
H ^{VI}	5.67	5.91	5.27	5.86	5.23	5.65	5.64
H ^{IV}	0.33	0.09	0.23	0.14	0.27	0.35	0.36
K	1.61	1.65	1.60	1.65	1.70	1.63	1.62
Na	0.09	0.10	0.23	0.13	0.13	0.13(5)	0.15(5)
Rb	0.16	0.15	0.10(3)	0.10(7)	0.10	0.10	0.09(5)
Cs	0.02	0.01	0.01(3)	0.01(6)	0.00(9)	0.00(8)	0.00(8)
Ca	0.05	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01(3)	0.02
XII							
E	1.93	1.92	1.96	1.91	1.96	1.89	1.90
OH	0.78	0.44	0.48	0.53	0.75	0.78	0.81
F	3.30	3.52	3.26	3.32	3.18	3.22	3.05
E antons	4.08	3.96	3.74	3.85	3.93	4.00	3.86
(P)	0.06	0.06	0.06(5)	0.02	0.07	0.05	0.06(3)

Tabl. 1. – Compositions et formules structurales, calculées sur la base de 24 (O, OH, F), des lépidolites-zinnwaldites des micas séparés du granite de Beauvoir. Ces micas ont été séparés par liqueurs denses et séparateur magnétique Frantz.

Composition and structural formula of the micas separated from the Beauvoir granite, calculated on the basis of 24 (O, OH, F).
Cote des échantillons :

- 1 : – 109,30 à – 110,30
- 2 : – 278,90 à – 279,95
- 3 : – 549,90 à – 550,90
- 4 : – 606,05 à – 606,95
- 5 : – 691,90 à – 692,90
- 6 : – 835,95 à – 836,63
- 7 : – 865,80 à – 866,75.

– plusieurs centaines d'analyses ponctuelles réalisées au moyen de la microsonde électronique à 75 cotes différentes réparties sur la totalité du sondage. Ces déterminations ont permis de réaliser un log détaillé du granite de Beauvoir, avec un pas tout à fait comparable à celui du log géochimique en roche totale dont les résultats sont publiés dans ce même volume (Rossi et al.).

2. – Nature des micas

Les compositions des sept lots de micas séparés et les formules structurales, calculées sur la base de 24 (O, OH, F), sont présentées dans le tabl. 1.

Ces compositions peuvent être décrites comme des solutions solides dans le système polyolithionite [Poly : K₂(Li₄Al₂)Si₈O₂₀F₄] - trillithionite [Tril : K₂(Al₃Li₁)(Si₆Al₂)O₂₀(OH,F)₄] - zinnwaldite [zinn : K₂(Li₂M₂⁺Al₂)(Si₆Al₂)O₂₀(OH,F)₄] - Muscovite [Mu : K₂(Al₄□₂)(Si₆Al₂)O₂₀(OH)₄], où □ représente une lacune octaédrique. Le tabl. 2 donne les compositions de chaque échantillon en termes de proportions molaires de ces quatre pôles purs.

Échantillons : 1 : Poly 49,5	Tril 30,5	Zinn 3,5	Mu 16,5
2 : Poly 47,5	Tril 43,5	Zinn 4,5	Mu 4,5
3 : Poly 52,5	Tril 17,5	Zinn 18,5	Mu 11,5
4 : Poly 45	Tril 22	Zinn 26	Mu 47
5 : Poly 30	Tril 17,5	Zinn 39	Mu 13,5
6 : Poly 29	Tril 7,5	Zinn 46	Mu 17,5
7 : Poly 35,5	Tril 6,5	Zinn 40	Mu 18

Tabl. 2. – Compositions des 7 micas séparés, exprimées en pourcentages molaires des pôles purs polyolithionite [poly], trillithionite [tril], zinnwaldite [zinn], muscovite [Mu].

Composition of the 7 separated micas, expressed as moles % of pure end-members [poly] = polyolithionite, [tril] = trillithionite, [zinn] = zinnwaldite, [Mu] = muscovite.

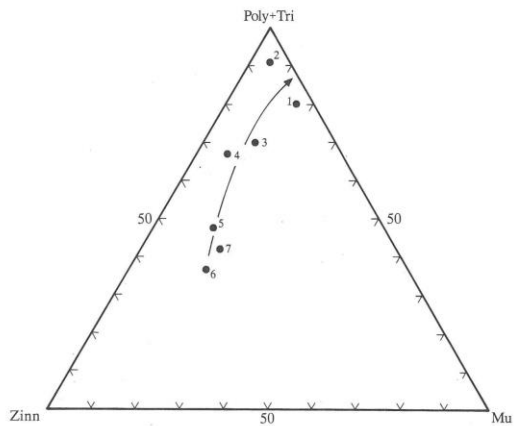


Fig. 1. – Reports dans le triangle Zinn-(Poly + Tri)-Mu des compositions des micas séparés, exprimées en pourcentages molaires des pôles purs. La flèche indique l'évolution depuis la base au sommet du granite de Beauvoir. Zinn-(Poly + Tri)-Mu diagram for the micas separated from seven samples of the Beauvoir granite, in moles % of the pure end-members. The arrow indicates the direction of incompatible elements enrichments from the floor to the roof of the Beauvoir granite.

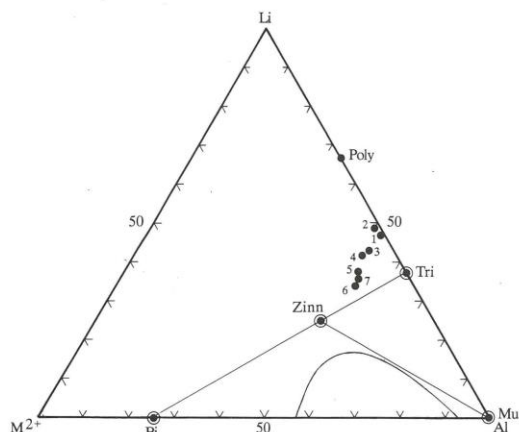


Fig. 2. — Report dans le triangle $M^{2+}=(Fe^{2+}+Mn+Mg)$ -Li-Al des compositions des micas séparés.

Abréviations : voir légende Tableau 2, puis Bi : Biotite (Annite + phlogopite). $M^{2+}=(Fe^{2+}+Mn+Mg)$ -Li-Al diagram for the micas separated from seven samples of the Beauvoir granite.

Abbreviations are indicated in table 2; Bi=Biotite (Annite + Phlogopite).

Du bas vers le haut du sondage, les faits majeurs sont l'augmentation des teneurs en lithium (constituant Poly + Tril) et la chute des teneurs en fer divalent et manganèse (constituant Zinn fig. 1 et 2). Le caractère lacunaire de ces micas, mesuré par la proportion du constituant Mu, diminue également vers le haut du sondage jusqu'à l'échantillon 2 qui est une lépidolite presque purement trioctaédrique. Comme le suggère l'observation microscopique, le caractère anormalement lacunaire de l'échantillon 1 semble dû à une séparation incomplète de la lépidolite et de la muscovite secondaire qui la remplace en bordure (phénomène décrit en détail par Kosakevith, 1976).

Dans le triangle Li- M^{2+} -Al avec $M^{2+}=Fe^{2+} + Mn+Mg$, (fig. 2), les compositions se situent toutes dans le domaine à

un seul mica, nettement au dessus de la lacune de miscibilité entre les micas dioctaédriques (famille des muscovites) et trioctaédriques (famille des biotites) observée aussi bien dans les micas synthétiques que dans les micas naturels (Monier, 1987; Monier et Robert, 1986). L'apparition de deux micas, l'un de type biotite, l'autre de type muscovite, dans un granite de cette composition nécessiterait des teneurs en Li (et F) plus faibles que celles observées dans le granite de Beauvoir.

3. — Répartition des éléments Fe, Mn, Mg, et Ti dans les micas et zonalité verticale du granite de Beauvoir

Comme le soulignent déjà bien les sept compositions de micas séparés, la zonalité verticale du granite de Beauvoir est marquée par une décroissance des teneurs en fer et manganèse des micas qui se rapprochent de plus en plus d'une lépidolite pure vers le toit.

L'obtention, au moyen de la microsonde électronique, de plusieurs centaines d'analyses, le lithium ne pouvant malheureusement pas être dosé, à 75 niveaux différents répartis sur l'ensemble du forage, de -86,06 m, premier filon de type Beauvoir jusqu'à -883 m, dernier filon rencontré dans le plancher micaschisteux, permettent de présenter un relevé détaillé de la zonalité verticale du granite.

Les teneurs en Fe, (essentiellement Fe^{2+} , comme le montrent les analyses de micas séparés) et Mn dans les parties les plus internes des cristaux sont, pour chaque échantillon, les paramètres les plus symptomatiques de l'état de différenciation du granite à une cote donnée.

Les figures 3a, b, c, d présentent les variations des teneurs maximales et minimales en Fe, Mn, Mg et Ti en fonction de la profondeur.

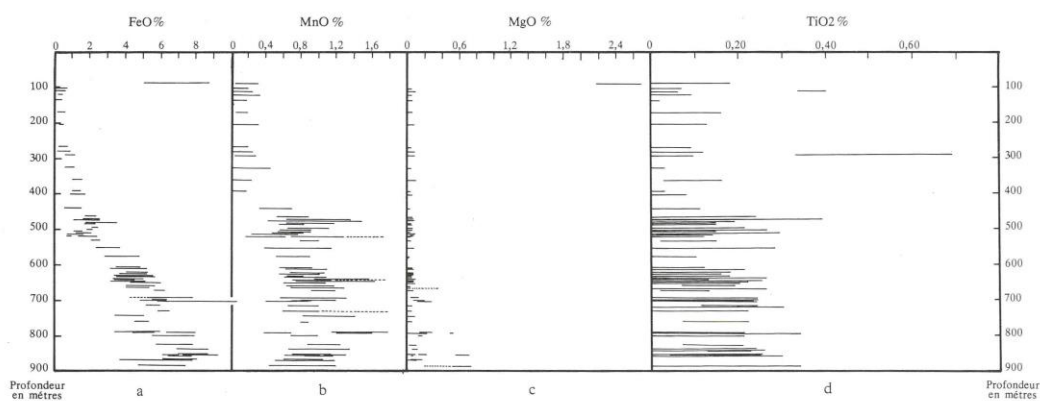


Fig. 3. — Distribution des teneurs en FeO, MnO, MgO, TiO₂ des micas du granite de Beauvoir en fonction de la profondeur dans le sondage GPF. La zonation des cristaux est exprimée par la longueur de chaque barre. Cœur à droite, bord à gauche.

FeO, MnO, MgO, TiO₂ distribution in the micas of the Beauvoir granite with depth in the Echassières n°1, GPF drill hole. Cores at right, border at left.

1. — Répartition de Fe et Mn et zonalité magmatique

La distribution de Fe le long du sondage et, d'une manière plus floue, celle de Mn permettent de mettre en évidence trois entités distinctes de granite de Beauvoir évoluant de façon parallèle et séparés par des zones intermédiaires ou de transition. La figure 4 schématise et interprète, en lissant les irrégularités locales, la distribution de Fe pour faire ressortir ces trois niveaux granitiques, B1, B2 et B3 définis par Cuney et *al.* (1986) :

— du toit à -480 m : l'ensemble B1 globalement le plus évolué,

— de -520 à -700 m : l'ensemble B2,

— de -740 m à la base du forage : l'ensemble B3.

Chacun de ces ensembles possède une partie basale moins différenciée, à micas relativement riches en fer et pauvres en lithium, passant progressivement vers le haut à des faciès plus différenciés à micas pauvres en fer et très riches en lithium. Ces ensembles sont séparés par des zones intermédiaires caractérisées par des variations brutales et apparemment anarchiques des teneurs en Fe et Mn de leurs micas ; ce phénomène est particulièrement net dans le cas de la zone séparant B1 et B2, entre -480 et -520 m (fig. 3a, b et fig. 4). Ceci correspond bien à la description pétrographique préliminaire des carottes (Doc. BRGM n°100), où il a été observé des alternances de faciès à lépidolite nacréée et des faciès à lépidolite dorée dans cette zone de passage entre B1 et B2. On y retrouve même, à -518 m, et sur quelques dizaines de

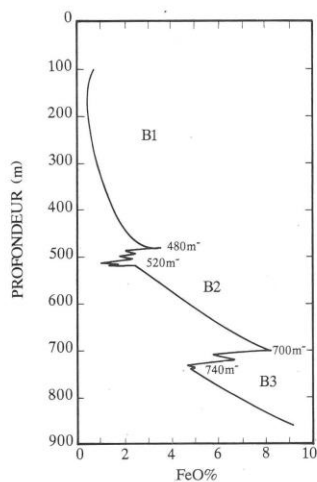


Fig. 4. — Expression schématisée (idéalisée) des faciès B1, B2 et B3 du granite de Beauvoir à partir de l'évolution des teneurs en FeO des micas. Schematic representation of the Fe content evolution in the three facies : B1, B2 and B3 of the Beauvoir granite.

centimètres, un faciès très blanc à texture cloisonnaire à micas très évolués (FeO inférieur à 1 % pds) que l'on ne retrouve que dans la partie supérieure du faciès B1, entre 100 et 280 m. Ce faciès possède des contacts nets avec son environnement moins évolué.

Ce type d'évolution doit s'interpréter comme symptomatique de trois injections successives de magma prélevées à différents niveaux d'une même chambre magmatique ou représentant différents taux de fusion d'une zone anatectique sous-jacente.

2. — Répartition de Mg et influence de l'encaissant

Le magnésium est un constituant mineur des lépidolites du granite de Beauvoir. Dans la plupart des échantillons, MgO ne dépasse pas 0,1 % pds ; ce « bruit de fond » n'augmente pas avec la profondeur. Pourtant, à partir de -700 m et au-delà, on rencontre un certain nombre d'échantillons au sein desquels les teneurs en MgO dépassent largement cette valeur (jusqu'à 0,72 % pds de MgO), (fig. 3c). Ces « hautes » teneurs en magnésium sont symptomatiques de la proximité de l'encaissant (micaschistes) mais aussi du microgranite, deux roches globalement beaucoup plus riches en Mg que le granite de Beauvoir. La figure 5 montre les variations des teneurs en Mg des micas en fonction de la distance par rapport au contact avec l'encaissant micaschisteux ou le microgranite. Jusqu'à 10 cm, cette « contamination » par l'encaissant peut être localement très forte, elle diminue rapidement au-delà et aucune influence n'a pu être décelée au-delà de 80 cm à 1 m environ. Outre la distance, le taux de « contamination » dépend aussi, pour chaque échantillon, des rapports volumétriques entre les panneaux d'encaissant et les filons recoupants. On notera, à ce propos, le cas du filonnet de granite de Beauvoir d'une puissance de 2 à 3 cm situé à la côte 86,06, soit 14 m environ au-dessus du contact principal du granite avec le toit micaschisteux : les teneurs en MgO des micas y sont comprises entre 2,16 et 2,70 % pds (fig. 3c et 5).

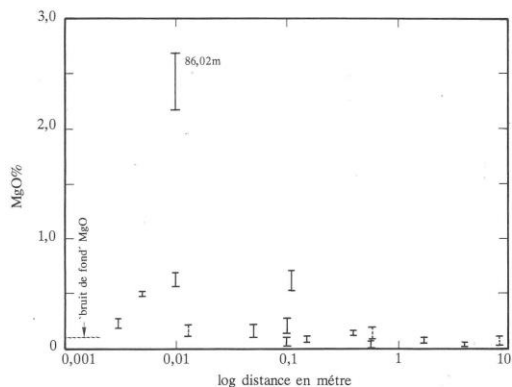


Fig. 5. — Diagramme montrant l'évolution des teneurs en MgO des micas du granite de Beauvoir en fonction de la distance (échelle logarithmique) entre l'échantillon étudié et le plus proche contact avec l'encaissant. Intervalles en traits pleins : distances par rapport aux micaschistes ; Intervalles en traits pointillés : distances par rapport aux microgranites. MgO contents variation in the micas of the Beauvoir granite in relation with the distance (logarithmic scale) between the studied sample on the nearest contact with enclosing rocks. Solid lines : distance with the micaschists ; stippled lines : distance with the microgranite dyke.

Dans les micaschistes, il existe, au contact du granite de Beauvoir et sur quelques centimètres, une zone isotropisée dans laquelle les biotites sont recristallisées en zinnwaldite et fortement appauvries en Mg; il en est de même des biotites des passés microgranitiques. Il y a donc, lors de la mise en place du granite, apport de Mg de l'encaissant vers le granite par le biais de la destruction de la biotite dans une mince frange de cet encaissant. Il y a bien sûr, de façon concomitante, apport considérable de Li et F du granite vers l'encaissant. Le fer a un comportement analogue au magnésium : ses teneurs peuvent croître de façon très importante à proximité des contacts (comparer fig. 3a et 3c). L'irrégularité des teneurs en FeO des micas du faciès B3 provient, pour une large part, de ce type de contamination par l'encaissant. De tels phénomènes d'échange granite-encaissant doivent nécessairement se retrouver pour quelques éléments, dans le faciès B3, au niveau des teneurs en roche totale du log géochimique.

Par contre, les teneurs en Ti des micas du granite ne semblent pas modifiées au contact de l'encaissant. Dans les micaschistes, le titane est expulsé de la phase micacée lors de la recristallisation des biotites en zinnwaldite et il précipite sur place sous la forme d'oxydes non caractérisés.

4. — Description et composition des générations successives de lépidolites-zinnwaldites. Implications

1. — Description et composition

La figure 6 montre quelques textures typiques de ces micas. La figure 7 est une présentation synthétique et schématique de l'évolution des compositions des lépidolites-zinnwaldites du granite de Beauvoir à l'échelle de chaque échantillon, le long du sondage. L'utilisation du diagramme M^{2+} -Al-Si est la mieux adaptée au report des compositions

Fig. 7. — Report des compositions des micas du granite de Beauvoir dans le triangle $M^{2+}=(Fe+Mn+Mg)-Al-Si$. Comparaison avec les muscovites d'autres leucogranites du Massif central.

(1) — Muscovites des leucogranites légèrement enrichis en lithium (ex : Les Colettes, Saint-Sylvestre Sud Est).

(2) — muscovites des leucogranites fortement enrichis en lithium (ex : Saint-Sylvestre grain fin).

(3) — Composition rare de micas localisés au coeur des cristaux de lépidolite du granite de Beauvoir.

(4) — Exemple d'évolution des compositions des lépidolites du granite de Beauvoir à différents niveaux du sondage.

(5) — Muscovites des leucogranites pauvres en lithium (ex : Millevaches, Saint-Sylvestre Ouest).

Les aires de répartition des compositions des micas des zones (2), (3) et (3') sont également représentées pour l'échantillon -691,90 du granite de Beauvoir.

1 à 7 : composition des micas séparés du granite de Beauvoir (cf T2).

$M^{2+}=(Fe^{2+}+Mn+Mg)-Al-Si$ diagram for the micas of the Beauvoir granite, analyzed by electron microprobe. Comparison with muscovite compositions from other peraluminous leucogranites of the French Massif Central.

(1) — Muscovites from peraluminous leucogranites moderately enriched in Li (ex : Les Colettes, St-Sylvestre S.E.).

(2) — Muscovites from peraluminous leucogranites strongly enriched in Li (ex : St-Sylvestre fine grained).

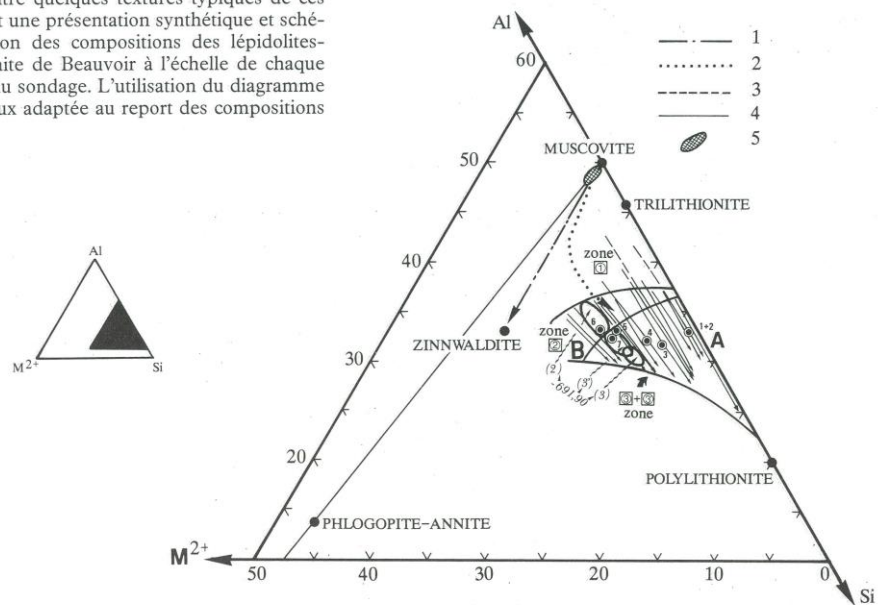
(3) — Composition of rare micas located in the core of lepidolite crystals in the Beauvoir granite.

(4) — Examples of lepidolite composition evolution at different levels in the G.P.F. drill hole, in the Beauvoir granite. Each line represents the evolution of the composition in one sample.

(5) — Common muscovite of Li-poor peraluminous leucogranite (Millevaches, St-Sylvestre Ouest).

For sample -691,90 of the Beauvoir granite, the areas representing the composition of the micas for zones (2), (3) and (3') are represented. 1 to 7 composition of the micas separated from the Beauvoir granite (T.2.).

A-B represents the evolution from the roof to the floor of the Beauvoir granite.



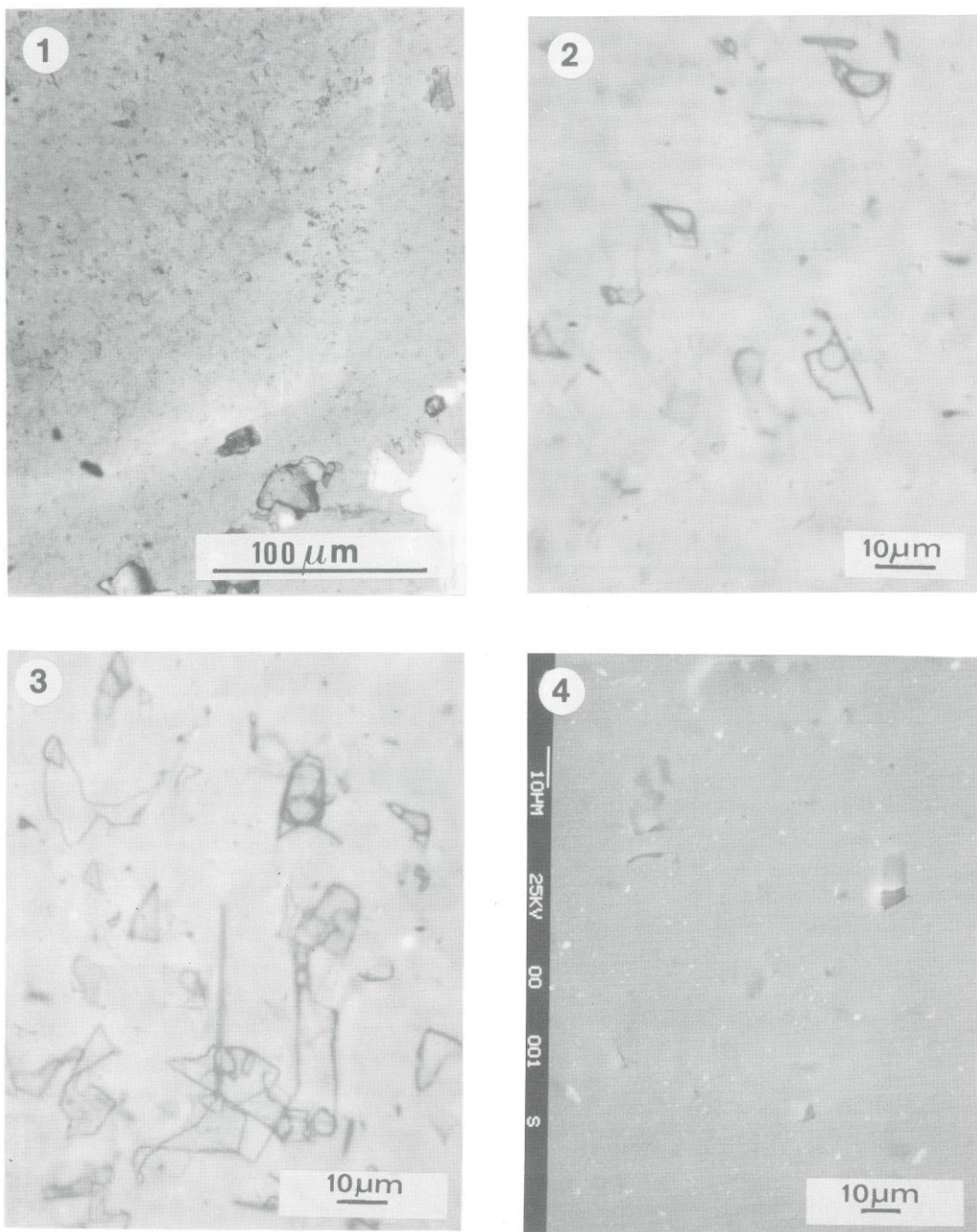
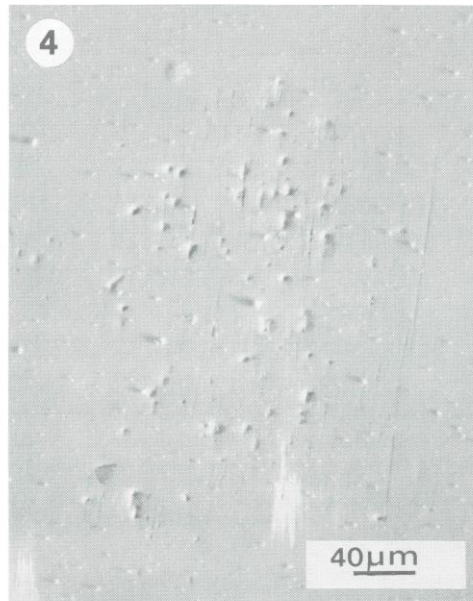
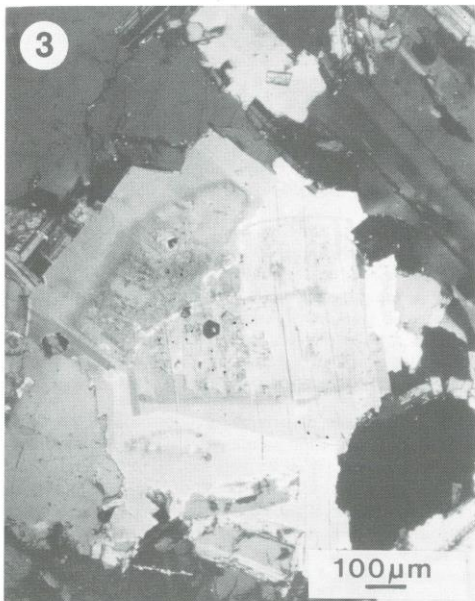
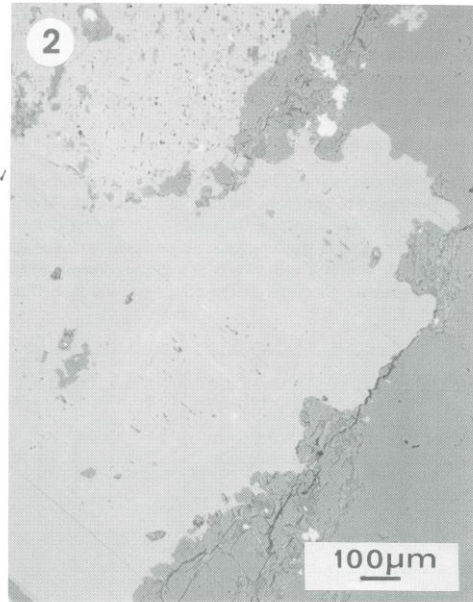


Fig. 6. — Microphotographies des micas du granite de Beauvoir.
 a : cote -742,10. Aspects, dans le plan (001) de la zone centrale (zone 2) des lépidolites-zinnwaldites du granite de Beauvoir.
 a(1) : Les limites entre la zone 2 (interne) et la zone 3 (externe) sont rectilignes ; la zone 2 possède une forme géométrique parfaite (cristaux automorphes).
 a(2) ; a(3) : Les cavités et (ou) inclusions fluides diphasées de la zone 2.
 a(4) : Aspect en relief des cavités de la zone 2 ; microscope électronique à balayage (MEB).

Microphotography of the Beauvoir micas.
 a - (-742.10). Central zone (zone 2) of lepidolite-zinnwaldite, in the (001) plane.
 a(1) : the limits between the internal zone (zone 2) and the external one (zone 3) are straight ; zone 2 present a perfect geometric shape (idiomorphic crystals).
 a(2) and a(3) : cavities and/or diphasic fluid inclusion in zone 2.
 a(4) : S.E.M. image of the cavities in zone 2.



b : cote - 469,25 (1) et (2), cote - 463,00 (3), cote - 691,90 (4). Aspects, dans des plans perpendiculaires à (001), des zones 1, 2, 3 et 3' des lépidolites-zinnwaldites du granite de Beauvoir.

b(1); b(2) : Zone 2(+1) en forme de tonnelet, entourée de la zone 3 et partiellement remplacée par la zone 3'.

La zone 2(+1) est en sombre dans b(1) - microscopie optique - et en clair dans b(2) - MEB. Les zones 3 (entourant 2) et 3' (amiboïde, remplaçant partiellement 2) sont en clair dans B(1) et en sombre dans b(2).

b(3) : Assemblage de 3 tonnelets imbriqués et entourés par des zones 3.

b(4) : Aspect des cavités et (ou) inclusions fluides de la zone 2.

b - Aspects of zones 1, 2, 3 and 3' in the lepidolite-zinnwaldite of the Beauvoir granite, in planes perpendicular to (001).

b(1) and b(2), (-469,25 m) : Zone 2 (+1) with a barrel shape surrounded by zone 3 and partly replaced by zone 3'. b(1) is taken by transmitted light with an optical microscope, zone 2 (+1) appears in dark grey; b(2) is a S.E.M. microphotography and zone 2 (+1) appears in light grey. The reverse is observed for zones 3 (surrounding zone 2) and 3' (amiboid, partly replacing zone 2).

b(3), (-463,00 m) : Assemblage of barrel shaped micas enclosed by a zone 3.

b(4), (-691,90 m) : Reflected light and optical microscope, aspects of the cavities and/or fluid inclusions in zone 2.

de micas lithinifères dosés à la microsonde électronique (Li non dosé), (Monier et Robert, 1986). La comparaison avec les données obtenues sur micas séparés (Li dosé) est satisfaisante. Sur la figure 7, chaque flèche en trait plein représente l'évolution des compositions des micas à l'échelle d'un ou plusieurs cristaux dans une collection d'échantillons représentatifs, choisis le long du sondage.

Les micas des faciès B2 et B3 et de la base du faciès B1 sont, d'une manière générale, fortement zonés. Dans la plupart d'entre eux, deux zones principales peuvent être délimitées, correspondant à deux stades de croissance : nous les qualifierons de stades 2 et 3, (fig. 6). Quelques compositions caractéristiques de chacune de ces zones ont été sélectionnées (tabl. 3)

N° d'analyse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	45,60	44,40	47,51	48,37	51,44	54,05	52,07	52,57	45,90	46,52	50,77	48,58
Al ₂ O ₃	28,47	29,26	26,92	25,45	22,59	21,02	21,54	23,39	23,58	23,55	21,41	22,05
FeO	2,18	2,09	2,53	1,96	2,16	1,75	1,76	1,79	9,28	8,74	7,25	7,35
MgO	0,07	0,03	0,01	0,00	0,06	0,04	0,02	0,00	0,59	0,62	0,69	0,70
MnO	1,12	1,35	1,11	0,82	0,96	0,65	0,02	0,64	0,86	0,75	0,62	0,91
TiO ₂	0,16	0,20	0,18	0,17	0,19	0,09	0,05	0,12	0,20	0,17	0,04	0,13
K ₂ O	11,23	11,30	11,15	11,05	10,73	11,12	10,60	11,43	10,75	10,82	10,84	10,58
Na ₂ O	0,27	0,41	0,44	0,27	0,37	0,18	0,33	0,25	0,23	0,23	0,32	0,32
F	10,07	6,12	8,29	8,46	9,83	10,07	9,14	9,05	7,30	6,82	9,02	8,59
Si	6,24	6,45	6,44	6,59	6,73	6,97	7,00	7,13	6,72	6,78	7,22	7,06
Al ^{IV}	1,76	1,55	1,56	1,41	1,27	1,03	1,00	0,87	1,28	1,22	0,78	0,94
Al ^{VI}	2,83	3,46	2,74	2,68	2,21	2,16	2,41	2,75	2,79	2,83	2,81	2,84
Fe	0,25	0,25	0,29	0,22	0,24	0,19	0,20	0,20	1,14	1,07	0,86	0,89
Mg	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,13	0,13	0,15	0,15
Mn	0,13	0,17	0,13	0,09	0,11	0,07	0,00	0,07	0,11	0,09	0,07	0,11
Ti	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01
K	1,96	2,09	1,93	1,92	1,79	1,83	1,82	1,91	2,01	2,01	1,96	1,96
Na	0,07	0,12	0,11	0,07	0,09	0,05	0,09	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09

Tabl. 3. — Quelques exemples de compositions des zones 1, 2, 3 et 3' des micas zonés du granite de Beauvoir (compositions partielles obtenues à la microsonde électronique).

Selected microprobe analysis of zones 1, 2, 3 and 3' in the micas of the Beauvoir granite.

N° 1 à 8 : cote — 469,25 1-2 : zone 1
3-4 : zone 2
5-6 : zone 3
7-8 : zone 3'

N° 9 à 12 : cote — 851,55 9-10 : zone 2
11 : zone 3
12 : zone 3'

La zone 2 correspond à la partie centrale, ou cœur, de ces micas. Les caractéristiques principales de ces cœurs sont :

- Forme géométrique (losange, hexagone...) de leurs contours sur les plans (001) et forme fréquemment en tonnelet

de ces mêmes contours sur les sections perpendiculaires à (001), (fig. 6b).

- Contours souvent bien délimités avec présence fréquente d'une frange de Becke au contact avec la zone 3 externe.
- Présence systématique de cavités aplaties dans le plan (001), dont certaines (ou la totalité ?) sont des inclusions fluides (fig. 6a).
- Trace discontinue des clivages, flexueuse et très irrégulière. Cette génération 2 est celle dont la composition se rapproche, en moyenne, le plus de celle des zinnwaldites.

La zone 3 correspond à la partie corticale de ces micas zonés, greffée autour de la zone 2 et en continuité cristallographique avec cette dernière. Cette zone 3 est limpide, dépourvue de cavités ou inclusions fluides, la trace des clivages y est beaucoup plus continue et rectiligne que dans la zone 2.

La composition de cette génération 3 évolue depuis celle des zinnwaldites jusqu'à celle des lépidolites franches.

Au sein de la zone 2, deux autres domaines, de moindre importance peuvent se rencontrer : les zones 1 et 3'.

La zone 1, très rare, rencontrée au sein de trois cristaux seulement sur la totalité des échantillons étudiés, correspond à de tout petits domaines reliques. Dépourvue de cavités ou inclusions fluides et bien cristallisée, cette génération possède des compositions plus primitives que la zone 2 et qui correspondent à des compositions proches du pôle trilitihionique.

La zone 3', à l'inverse, provient d'une recristallisation de la zone 2, contemporaine de la croissance de la zone corticale 3. Elle se présente sous forme de zones dentelliformes corrodées dans la zone du cœur. La recristallisation 2 → 3' s'accompagne, outre le changement de composition, d'une disparition des cavités de la zone 2 et de l'apparition d'un mica bien cristallisé à clivages rectilignes, comparable à 3. Il y a donc effacement de toutes les irrégularités qui caractérisent 2.

L'importance relative de ces différentes zones est fonction de l'état de différenciation de la roche-hôte et donc de la profondeur. Moins la roche est différenciée, i.e. plus le mica est globalement riche en fer, plus la zone 2 a d'importance par rapport à 3 et moins 3' possède d'importance. Au sommet du faciès B1, les micas sont formés presque uniquement par la zone 3, la zone 2 n'existe plus, mais on peut y observer quelques cœurs-fantômes qui sont probablement de type 3'.

Les domaines de composition des zones 1, 2 et 3 + 3' ont été délimités schématiquement sur la figure 7. La zone 1 possède les rapports Si/Al les plus bas, elle est la moins riche en Li ; la zone 3 possède les rapports Si/Al les plus élevés, elle est la plus lithinifère ; la zone 2 est intermédiaire. On remarquera surtout que pour une cote donnée, les compositions des zones 1 à 3 sont situées dans le prolongement l'une de l'autre, donnant une unité remarquable de l'évolution des compositions à l'échelle locale.

Le parallélisme (ou plutôt la lente convergence) des lignées individuelles est lié au comportement du fer dont la teneur est, dans les micas de Beauvoir, le paramètre qui caractérise le mieux un stade de différenciation donné, depuis les faciès les moins évolués (en B, fig. 7) jusqu'aux plus évolués au sommet du sondage (en A, fig. 7).

On notera également, pour la plupart des échantillons, une lacune de composition entre les zones 2 et 3 (fig. 7). Les

zones 2 et 3 doivent s'interpréter comme deux étapes de cristallisation séparées dans le temps. L'impression de continuité n'est bien souvent due qu'à la composition de 3' qui, tout en étant contemporaine et proche de 3, hérite partiellement des caractères chimiques de la zone 2 préexistante dans laquelle ses compositions s'enracinent.

Enfin en périphérie de la zone 3, en continuité cristallographique, se développent des micas de type muscovite lithinifère, formant parfois des associations symplectiques mica-quartz. Ils représentent une altération précoce observée dans toute la masse du granite.

2. — Discussion, implications

Parmi les trois générations de micas décrites précédemment, seul le stade 3 (+ 3') apparaît en équilibre avec la paragenèse minérale de type Beauvoir telle qu'elle peut être observée aujourd'hui. Les stades 1 et 2 sont totalement ou partiellement déstabilisés et représentent des témoins, plus ou moins importants selon la profondeur, de stades de cristallisation antérieurs.

Les stades 1 et 2 forment le cœur des micas de Beauvoir. Le stade 2, de texture vacuolaire et irrégulière, est vraisemblablement issu de la recristallisation de 1. C'est donc ce stade 1 qui, primitivement formait des cristaux automorphes, en tonnelet à bases losangiques ou hexagonales. Ce type morphologique est fréquent pour les muscovites, lithinifères ou non, d'origine magmatique (voir par exemple Monier, 1987; Schleicher et Lippolt, 1981). Notons, en outre, que parmi les 75 lames minces utilisées pour l'analyse à la microsonde électronique, deux cristaux seulement ont montré des cœurs (zone 2) riches en titane (voir fig. 3d) dont l'un contient des grains de rutile (anciennes biotites ?). Toutes les autres zones 2 ont des teneurs très basses en Ti qui tendent à indiquer que les micas anciens, desquels elles dérivent possédaient des compositions de type muscovite lithinifère.

Le stade 1 précoce possède une composition de muscovite lithinifère proche du pôle trillithionite, très peu fréquente dans les leucogranites. La figure 7 montre, de façon schématique, une représentation des différentes compositions de « micas blancs » habituellement rencontrés dans les leucogranites français. Elle met en évidence, de façon nette, la lacune qui sépare le domaine de composition des micas des granites monomicacés type Beauvoir — c'est-à-dire à teneur en Li (+ F) élevée maintenant les compositions au-dessus de la lacune de miscibilité des micas, voir paragraphe II et figure 2 — du domaine de composition des micas des leucogranites communs pauvres en Li (type Les Colettes, Saint-Sylvestre Sud-Est...). Entre ces deux ensembles principaux, n'existe que la lignée de compositions des muscovites lithinifères et trillithionites de quelques rares leucogranites à grain fin à biotite absente ou rare dont l'exemple type est représenté par un petit massif de leucogranite à grain fin : la « granulite ultime de Saint-Sylvestre », qui occupe une surface de quelques km² au sein du massif complexe de Saint-Sylvestre, décrit en détail par ailleurs (Friedrich, 1984; Monier, 1987). La lignée dessinée par la composition de ces micas (fig. 7) diverge à partir du domaine de composition des micas des leucogranites communs, occupe le même espace que la muscovite lithinifère du stade 1 de Beauvoir et rejoint le stade 2. De là d'autres lignées plus ou moins parallèles à cette dernière peuvent être envisagées qui rejoindraient les lignées type Beauvoir.

Ces différents éléments permettent d'entrevoir, pour le granite de Beauvoir et ses micas, une filiation possible, à considérer comme hypothèse de travail, avec des leucogranites à muscovite seule du type « granulite ultime » de Saint-Sylvestre à grain fin. Le stade 1, relictuel, pourrait ainsi représenter, dans l'hypothèse d'une évolution par différenciation magmatique, des cristaux de muscovite lithinifère entraînés à partir du magma-père (type Saint-Sylvestre grain fin ?) par un liquide silicaté résiduel de composition de type Beauvoir. A l'inverse, et à la simple observation de la figure 7, il est peu probable qu'un ensemble modérément lithinifère tel que le granite des Colettes puisse engendrer un magma résiduel de type Beauvoir.

Sans exclure totalement l'hypothèse précédente, les stades de cristallisation successifs des micas observés dans le granite de Beauvoir peuvent s'expliquer simplement à partir des données expérimentales obtenues par Pichavant et al (ce volume). L'ordre de disparition de la lépidolite dans les expériences de fusion varie considérablement en fonction de la pression. A 3 kb, la lépidolite est parmi les dernières phases à disparaître alors qu'à 1 kb elle est la première. Dans la mesure où ces expériences pourront être confirmées par les essais en cristallisation, beaucoup plus délicats, il apparaît donc qu'en profondeur avant la mise en place, le mica cristallise précocement et matérialise lors de la mise en place du granite, la fabrique magmatique étudiée à Beauvoir par Gagny et Jacquot (1985 et ce volume). La baisse de pression consécutive à la remontée du magma conduit à la redissolution du mica précocement formé dans des conditions T, P plus élevées. Cette corrosion pourrait correspondre aux zones 3'. Des stockages intermédiaires du magma permettraient d'expliquer les zones successives. Les micas cristallisant de plus en plus tardivement seront à l'équilibre avec un magma de plus en plus riche en F et Li, ce qui correspond aux évolutions de compositions observées.

5. — Conclusion

Les micas du granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir ont des compositions s'inscrivant dans le triangle zinnwaldite-trillithionite-polythionite. Leur évolution à la fois spatiale et temporelle peut être ramenée à quatre stades :

1. — Un stade magmatique précoce, rencontré au cœur de certains cristaux, correspond à des compositions proches du pôle trillithionite : rapports Si/Al et teneurs en Li les plus faibles. Ces micas, maintenant relictuels, ont été parmi les premiers minéraux à se développer au sein du magma en profondeur comme le suggèrent leur relations texturales en lame mince et les relations de phase établies expérimentalement Pichavant et al, ce volume; Weidner et Martin, 1987). C'est à ce stade que le liquide silicaté ayant encore peu cristallisé de quartz et feldspaths était le plus pauvre en lithium.

2. — Un stade également magmatique voit la recristallisation des premiers micas formés, donnant des micas à texture irrégulière et vacuolaire (zone 2) ou à texture dentelliforme (zone 3'). L'importance du développement de ce stade croît avec la richesse en fer du système global. Ces micas présentent des rapports Si/Al intermédiaires et des teneurs en Li plus élevées; leur composition se rapproche de celles des zinnwaldites avec la profondeur (de B 1 à B 3), correspondant à un magma de plus en plus riche en fer. La recristallisation résulterait d'une baisse de pression consécutive à l'ascension

du magma, conduisant à une rééquilibration des compositions, voire même une redissolution des micas du stade 1.

3. — Ce stade prédominant dans les faciès les moins ferri-fères (faciès B1) montre une variation brutale de composition avec les stades 1 et 2 précédents. Il correspond à la partie corticale des micas. Elle présente les rapports Si/Al et les teneurs en Li les plus élevées et des compositions intermédiaires entre les pôles zinnwaldite et protolythionite. Ce stade de croissance caractérise les conditions proches ou égales à celles de la mise en place du magma.

4. — Il correspond aux muscovites développées en épitaxie sur les cristaux de lépidolite à un stade subsolidus et non abordées dans ce travail.

A ces variations à l'échelle de l'échantillon, se superposent des évolutions à l'échelle du sondage. La croissance globale des teneurs en Fe et Mn des micas se fait en au moins trois pulsions magmatiques successives, correspondant aux trois faciès précédemment définis (Cuney et al., 1986). Ces caractéristiques sont interprétées comme le reflet de la mise en place de trois injections successives de magma dont le cogénéisme ou le non-cogénéisme reste à démontrer. Des discontinuités de moindre amplitude sont observées, mais la complexité des variations de composition des micas du granite de Beauvoir ne permet pas de les définir sans ambiguïté.

Un dernier type de variation de composition des micas correspond aux enrichissements en Mg et peut-être Fe par échange avec les micaschistes encaissants au toit ou enclavés à la base, par l'intermédiaire d'une phase fluide. Ces variations se retrouvent par ailleurs au niveau de la géochimie de certains éléments en traces (Rossi et al., ce volume ; Raimbault et Azencott, ce volume).

Une lacune de composition existe entre les micas les plus précoces (stade 1) de Beauvoir et ceux des leucogranites plus pauvres en Li, en particulier avec le granite des Colettes. Par contre, des compositions intermédiaires ont été observées dans certains granites tels que ceux à grain fin du massif de Saint-Sylvestre qui, dans l'hypothèse d'une origine par différenciation magmatique, pourraient représenter le chaînon manquant. Un approfondissement du forage donnerait une chance de le toucher et donc de mieux contraindre les liaisons génétiques entre les différentes unités magmatiques du complexe d'Échassières.

Remerciement

Nous tenons à remercier MM. A. Kosakevitch, Ph. Rossi, A. Autran, ainsi que MMe^s V. Johan, M. Tegye^y pour de nombreuses et fructueuses discussions sur les granites de Beauvoir.

Références bibliographiques

- BEUS A.A., SEVEROV V.A., SITNIN A.A., SUBBOTIN R.D. (1962). — Albitized and greisenized granites (apogranites). *Acad. Sci. Press, Moscou*, 213 p.
- CUNNEY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON Ph., FEYBESSE J.L., GAGNY Cl., JACQUOT Th., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G., TEGYEY H. (1986). — Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur la coupole de granite albitique à topaze lépidolite de Beauvoir. *C.R. Acad. Sci., Fr., (2)*, **303**, 7, pp. 569-574.
- FRIEDRICH M. (1984). — Le complexe granitique hyperalumineux de Saint-Sylvestre, Nord-Ouest du Massif central français. *Géol. Géochim. Uranium Mém.*, Nancy, 5, 361 p.
- GAGNY Cl., JACQUOT Th. (1985). — Présentation de quelques problèmes mis en évidence par la pétrologie structurale. *Doc. BRGM n°100*, 139-163.
- KOSAKEVITCH A. (1976). — Évolution de la minéralisation en Li, Ta et Nb dans la coupole granitique de Beauvoir (massif d'Échassières, Allier). Rapport BRGM 76 SGN. 316 MGA, 96 p.
- KOVALENKO V.I., KOVALENKO N.I. (1984). — Problems of the origin, ore bearing and evolution of rare metal granitoids. *Physics Earth Planet. Int.*, **35**, pp. 51-62.
- MARTIN, MASSONE H.J. (1981). — Phengite : Eine experimentelle Untersuchung ihres Druck — Temperature — Verhaltens im System $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$. Thèse, Bochum, 211 p.
- MONIER G. (1987). — Cristallochimie des micas des leucogranites. Nouvelles données expérimentales et applications pétrologiques. *Géol. Géochim. Uranium, Mém.* Nancy, 14, 347 p.
- MONIER G., ROBERT J.L. (1986). — Evolution of the miscibility gap between muscovite and biotite solid solutions with increasing lithium content : an experimental study in the system $K_2O-Li_2O-MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-HF$ at 600°C, 2 Kbar PH_2O . Comparaison with natural lithium micas. *Min. Mag.*, 50, pp. 641-651.
- ROBERT J.L. (1981). — Études cristallographiques sur les micas et les amphiboles. Applications pétrographiques et géochimiques. Thèse d'Etat, Paris XI, 260 p.
- ROBERT J.L., VOLFINGER M. (1979). — Etude expérimentale de lépidolites triaédriques hydroxylées. *Bull. Minéral.*, 102, pp. 21-25.
- SCHLEICHER H., LIPPOLT H.J. (1981). — Magmatic muscovite in felsitic parts of rhyolites from Southwest Germany. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **78**, pp. 220-224.
- VELDE B. (1965). — Phengite micas : synthesis, stability and natural occurrence. *Amer. J. Sci.*, **263**, pp. 886-913.
- WEIDNER J.R., MARTIN R.F. (1987). — Phase equilibria of a fluorine rich leucogranite from the St-Austell pluton, Cornwall. *Geochim. Cosmochim. acta*, 51, pp. 1591-1597.