

La composition chimique des micas lithinifères (et autres minéraux) des granites d'Échassières comme image de leur évolution magmatique

Mots-clés : Granite, Lépidoïte, Zinnwaldite, Zonation, Immiscibilité
Allier (Échassières)

Michel Fonteilles *

Résumé

Les micas du granite de Beauvoir montrent dans chaque échantillon un développement en trois temps : deux stades magmatiques, l'un parfaitement idiomorphe en profondeur, l'autre hypidiomorphe au niveau final d'intrusion, correspondent à des compositions de lépidolites-zinnwaldites, alors que le 3^e stade, post-magmatique, correspond à des compositions de muscovites développées sous l'action d'un fluide d'origine extérieure au granite. La zonation des lépidolites-zinnwaldites est caractérisée par l'existence d'un maximum de teneurs en alumine atteint à la limite du cœur idiomorphe, accompagné le plus souvent de maxima de FeO, MnO et TiO₂. L'apparition d'une lacune de miscibilité observée entre cœur et bord est considérée comme traduisant la forte chute de pression fluide qui accompagne la montée du magma.

Les micas du stade magmatique présentent des variations systématiques de compositions de haut en bas du sondage. Dans l'ensemble, les teneurs en Fe, Mn, Mg augmentent, mais il existe des oscillations importantes à l'échelle de la centaine de mètres. Tous les passages sont progressifs. Les oscillations correspondant à MnO, MgO, TiO₂ coïncident, tandis que Rb₂O montre une décroissance parfaitement régulière sur l'ensemble du sondage. Cette organisation est interprétée comme correspondant à l'intrusion simultanée, ou successive mais en continuité, de magmas cogenétiques de compositions légèrement différentes, suivie d'une fin d'évolution magmatique commune à l'ensemble du granite à son niveau final de mise en place.

L'étude comparative des micas du granite des Colettes et du microgranite banal associé au granite de Beauvoir dans le sondage, montre que ces roches et le granite de Beauvoir correspondent à trois familles de magmas indépendantes, bien que formées en profondeur dans des conditions comparables et peut-être cogenétiques. Les micas de la première de ces roches sont des protolithionites et des muscovites lithinifères, ceux de la seconde constituent une série complète muscovite-zinnwaldite.

Trois domaines d'immiscibilité probables sont mis en évidence et délimités à l'aide des micas d'Échassières :

- un entre micas lépidolites-zinnwaldites plus ou moins riches en polythionite et trithionite ;
- un autre (moins certain) entre protolithionites et zinnwaldites ;
- le troisième entre les micas pauvres en lithium en accord avec les données de Monier (1987).

En l'absence de quartz, ce dernier domaine se réduit fortement ou disparaît, comme le montre l'étude des micas pauvres en lithium développés sur les anciennes cordiérites.

Abstract

*The chemical composition of Li-micas (and other minerals)
in Échassières granites as an indicator of their magmatic evolution*

In Beauvoir granite, three stages of mica development can be distinguished. They include idiomorphic cores, hypidiomorphic rims of large crystals of lepidolite-zinnwaldite, and a later of muscovite, occurring as outer fringes on the large lepidolite crystals, small separate grains, and alteration products (« sericite ») developed on various minerals.

Usually, in lepidolite granites, the micas show a more or less continuous series between lepidolite proper and muscovite. In the case of Beauvoir, the contents of muscovite end-member is constant (15 mole %). This is interpreted as an evidence of saturation at a very early stage by topaze, and very high Li₂O activity, probably associated with the early occurrence of amblygonite. The compositional variations of lepidolite-zinnwaldite in Beauvoir are mainly due to changes in the proportion of polythionite end-member. The idiomorphic cores of lepidolite crystals show a large series of solid solutions between polythionite and trithionite rich compositions, almost without any miscibility gap, but a very conspicuous gap occurs at the edge of the idiomorphic core, suggesting a crystallization of the rim under much lower fluid pressure than in the case of the core. It is concluded that the core was formed at depth, while the rim developed after the emplacement of the granite, and the later muscovite crystallized in post-magmatic hydrothermal conditions in a fluid of non-magmatic origin.

The chemical compositions of the lepidolite-zinnwaldite micas show complicated variations throughout the granite body : iron, manganese and magnesium increase from top to bottom, with a change of the mica from pure lepidolite to typical zinnwaldite. The same elements and titanium show also short range (100 m) oscillations, the maxima and minima of which occur at the same depths, except for iron. All the variations are continuous throughout the granite body. The same is true of a decrease of Rb₂O contents, but in this case the variation is perfectly regular. These data suggest that the whole chamber was simultaneously in at least partly magmatic state in the late stage of its evolution. The origin of the oscillations is tentatively ascribed to partly simultaneous, partly successive but continuous emplacement of various cogenetic magmas carrying, in one case, already crystallized blocks of the same granite.

* UA CNRS 384, Laboratoire de Géologie appliquée UPMC, 4 place Jussieu, 75230 Paris Cedex 5

The nearby cordierite bearing two mica granite of Colettes is also comparatively rich in lithium and fluorine. Its main types of micas are protolithionites and Li-muscovites. In the outer fringe of some protolithionites, zinnwaldite compositions are rarely observed.

The ordinary granite porphyries which occur as xenoliths in the Beauvoir granite or associated with schists septa in the lowest part of Beauvoir granite contain micas richer in lithium than the ordinary micas of Colettes granite. They are not derived from vein type equivalents of Colettes granite metasomatized by Beauvoir. They have a distinctive mica mineralogy, characterized as a transitional series between Li-rich muscovites and Al-rich zinnwaldites.

The MgO, TiO₂ and Rb₂O contents of the micas in Colettes granite, granite porphyries, and Beauvoir granite, show limited ranges of variation in each rock type and are quite distinctive. It is concluded that these types of granites derive from magmas which at depth had an interrelated, more or less simultaneous, perhaps comagmatic origin. We may consider them as a magma serie.

The extensive investigation of the Li-mica series in these various granites support the existence of three solvus areas in their theoretically possible composition field :

- for Li-rich micas of lepidolite-zinnwaldite composition a probable immiscibility at low pressure between comparatively polylithionite and trilitionite rich compositions ;
- possibly another between protolithionite and zinnwaldite compositions ;
- for Li-poor micas, a miscibility gap similar to the one determined by Monier (1987) ; the granite porphyries show micas near the top of this solvus.

The last one exists only in the presence of quartz. Within the former cordierite crystals, and separated from quartz by a fringe of normal Li muscovite and protolithionite, appears a series of special Si-poor Li bearing micas which form a series with very limited or no miscibility gap between biotite and muscovite compositions.

1. — Introduction

1.1. — Généralités et but de l'étude

Les granites d'Échassières (et les minéralisations associées) ont été étudiés dans un article de Vincienne et Pélissonnier (1954), dans les thèses de J. Cantagrel (1963), A. de Rosen (1965), J. Lameyre (1966), G. Aubert (1966), L. Burnol (1974) et dans un rapport BRGM de A. Kosakevitch et al. (1976). Les résultats du sondage GPF n°1 sur le granite de Beauvoir ont fait l'objet, en 1985, d'une présentation préliminaire avec des articles très utiles dans l'optique du présent travail de A. Autran et L. Burnol, de G. Monier, de M. Tegyey, de A. Kosakevitch et de L. Raimbault.

L'examen pétrographique des échantillons de granite de Beauvoir montre qu'il se rattache au type haplogranite. Les relations texturales entre les minéraux sont toujours de même type et sont compatibles, comme nous le verrons, avec l'hypothèse d'une cristallisation à partir d'un liquide. Cependant les proportions des minéraux sont très variables et ne correspondent pas à la composition d'un minimum ternaire, les roches monominérales étant, par exemple, fréquentes. Il est donc difficile de donner, dans l'état actuel de nos connaissances, la composition globale du liquide silicaté à partir duquel se sont formées ces roches.

Il nous semble que l'étude doit être entreprise en considérant les phases dont la composition variable dans le temps comme dans l'espace reflète la composition changeante du liquide. Parmi ces phases, les feldspaths peuvent fournir des informations, mais les variations de composition des micas sont plus évidentes, portent sur un nombre d'éléments plus grand et donc donnent une image plus complète sinon plus facile à interpréter de la cristallisation du granite.

Les variations de composition des micas s'organisent à deux échelles : celle du cristal (zonations) et celle de l'intrusion (zonation du granite). Au cours de cet examen systématique, nous avons pu constater l'existence de lacunes de miscibilité, confirmées par la coexistence dans un même échantillon de micas situés de part et d'autre et définissant ainsi ce

domaine. Une partie de nos résultats confirment des données existantes. D'autres nous conduisent à proposer de nouveaux domaines d'immiscibilité. On comprendra qu'une connaissance précise de ces domaines soit nécessaire avant que les micas puissent être utilisés comme guides pour retracer l'histoire magmatique d'un massif granitique.

Au cours de la présente étude, 73 échantillons provenant du sondage profond (granite de Beauvoir et microgranites) ont été étudiés, ainsi que cinq échantillons de granite des Colettes provenant de sondages courts antérieurs ou des affleurements. 1 200 analyses sonde ont été effectuées dont 900 sur les micas et 200 sur les feldspaths. Tout le travail a été réalisé sur la microsonde CAMEBAX de l'université de Paris VI (CAMPARIS).

1.2. — Convention de notation des divers types morphologiques (et chimiques) des micas observés à Beauvoir.

Les conventions adoptées dans le présent article sont indiquées sur le tableau 1 parallèlement aux notations utilisées antérieurement par Kosakevitch (1976, 1985) et Monier (1985)*.

À Échassières, les *greisens* décrits en surface dans le granite de Beauvoir sont généralement caractérisés par le développement abondant des muscovites II et III et de la séricite. En général, il reste au cœur des micas des lépidolites, mais tout le reste de la roche peut être complètement envahi par muscovite + quartz. Certaines variétés de « granite » de Beauvoir dans lesquelles localement le lépidolite I arrive à constituer la quasi-totalité (passée à 372,35 m) de la roche ne sont pas considérées dans ce qui suit comme greisens. Cette façon de voir se justifie d'une part par le fait déjà mentionné plus haut que, localement, l'albite (à 194, 55 m par exemple) ou le feldspath potassique (à 850,12 m) peuvent également consti-

(*) On trouvera dans le volume des annexes (Document BRGM n°124) la reproduction et la discussion critique des analyses que Kosakevitch avait réalisées dès 1976 à la microsonde électronique ou sur concentrés de micas soigneusement triés. Nous les utiliserons dans ce travail comme référence.

Description	Kosakevitch 1976	Kosakevitch 1985	Monier 1985	Fonteilles
Cœurs idiomorphes en tonnelets etc. souvent avec fines punctuations opaques et/ou variations brusques d'indice en bordure.	« Cristaux fantôme » et « muscovites précoces »	Muscovite	Partie centrale avec taches noirâtres des lépidolites zonés	Lépidolite 0
Agrégats de micas d'assez petite taille avec punctuations et nids de grains de cassitérite.				Lépidolite 0 bis
Taches de remplacement à bords irréguliers mais nets dans les cœurs de cristaux (lépidolite 0). (à composition de lépidolite).	« taches de muscovite »			Lépidolite 0 remanié
Zone externe d'apparence homogène des cristaux trapus, et cristaux en lattes de grande dimension.	Lépidolites	Lépidolite	Lépidolite	Lépidolite I
Excroissances amiboïdes, en dentelles, symplectites avec le quartz etc., sur les grands cristaux de lépidolite. Pas de différences d'indice ou de biréfringence appréciables au microscope avec les grands cristaux.			Micas blancs deutériques	Lépidolite II
Idem. Indice et biréfringence plus élevés que le lépidolite. Limite nette.	Muscovite secondaire	Muscovite II		Muscovite II
Cristaux de petite taille, en éventails, en groupements étoilés, en rosettes.	Muscovite néoformée	Muscovite III	Muscovite en rosettes	Lépidolite III et muscovite III
Agrégats très fins ou lamelles dispersées sur les feldspaths (à composition de muscovite).			Séricite	Séricite

Tabl. 1. — Conventions de notation des divers types de micas de Beauvoir.

tuer la presque totalité de la roche, d'autre part par le fait que les relations texturales entre les différents minéraux restent les mêmes dans ce cas que dans le granite à lépidolite banal. Il ne s'agit pas de zones lessivées et appauvries par les fluides tardifs comme le sont les greisens proprement dits. Cependant les deux phénomènes ont parfois été confondus, d'autant plus naturellement que, dans les échantillons récoltés dans les carrières, ils sont souvent superposés. Tel est probablement le cas du « greisen du Suquet » dont le mica a été analysé par Kosakevitch (analyses K 5 et S1 — cf. Documents BRGM n°124).

2. — Compositions chimiques des micas du granite de Beauvoir

2.1. — Remarques générales

Chaque échantillon du granite de Beauvoir dans le sondage profond est identifié par sa cote de profondeur (exemple Ech. 835.92 parfois simplifié s'il n'y a pas ambiguïté en 835).

Chaque analyse individuelle à la microsonde est désignée par un numéro de série suivi du numéro dans la série (par exemple 19.22). Le nombre des séries étant de 20 et les premiers échantillons de granite ayant une cote supérieure à 90, il ne peut y avoir d'ambiguïté entre ces deux types de numérotations.

Les analyses des lépidotites de Beauvoir montrent des teneurs très constantes en K_2O dans l'intervalle 10,20-10,45 et en Na_2O dans l'intervalle 0,20-0,40. Les teneurs en Rb_2O , plus variables, sont dans l'intervalle 1,20-3,00.

Les analyses de muscovite ont, pour ces mêmes éléments, un intervalle de teneurs un peu différent : K_2O 10,50-10,95 ; Na_2O : 0, 10-0,25. De nouveau les teneurs en Rb_2O sont plus variables, dans l'intervalle 0,10-0,80.

Ce type de teneurs laisse supposer que la couche interfoliaire est normalement remplie par deux atomes (Na, K, Rb). Dans ces conditions, nous pouvons admettre que les ions en coordination 4 et 6 ont un nombre total de valences égal à 42.

En principe, nous ne disposons pas, avec les analyses à la microsonde, des données nécessaires pour le calcul des formules structurales, puisque nous ne connaissons ni le degré d'oxydation du fer, ni la teneur en lithium.

En ce qui concerne le degré d'oxydation du fer, Foster (1960) note « in most of the analyses of zinnwaldites the amount of Fe_2O_3 present is very small ».

C'est probablement le cas dans le granite de Beauvoir, d'après les analyses chimiques globales disponibles à cet effet (tabl. 2.).

	E11 - 34 à 49 m (2)	ES 4-10 m (1)	ESI-50 m (1)	ES3-60 m (1)	ES5-109 m (1)
Fe_2O_3	.20	.15	0	.10	.83
FeO	1.00	.45	.27	.45	.30

(1) d'après G. Aubert (1966)
(2) d'après A. Kosakevitch (1976).

Tabl. 2. — État d'oxydation du fer dans le granite de Beauvoir.

Deux caractères minéralogico-pétrographiques du granite de Beauvoir suggèrent que le milieu était nettement réducteur. Le premier est l'occurrence d'uraninite pauvre en

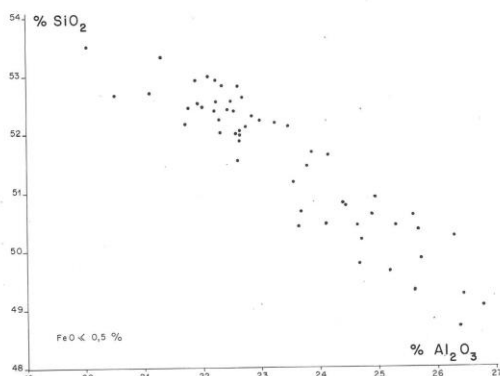


Fig. 1. — Composition du lépidolite dans l'échantillon 194,55 m.
Lepidolite compositions in terms of Al_2O_3 and SiO_2
in specimen 194.55

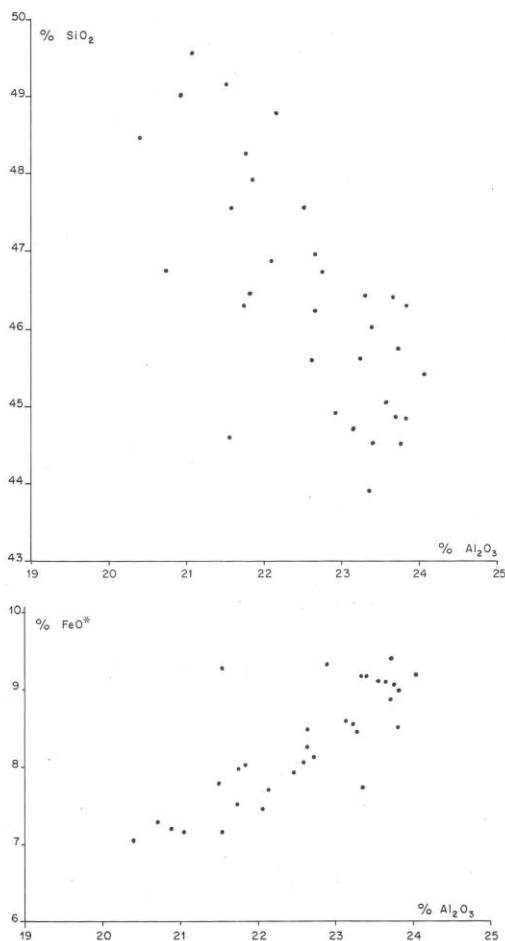


Fig. 2. — Composition de la zinnwaldite dans l'échantillon 835,92 m.
Zinnwaldite compositions from specimen 835.92.

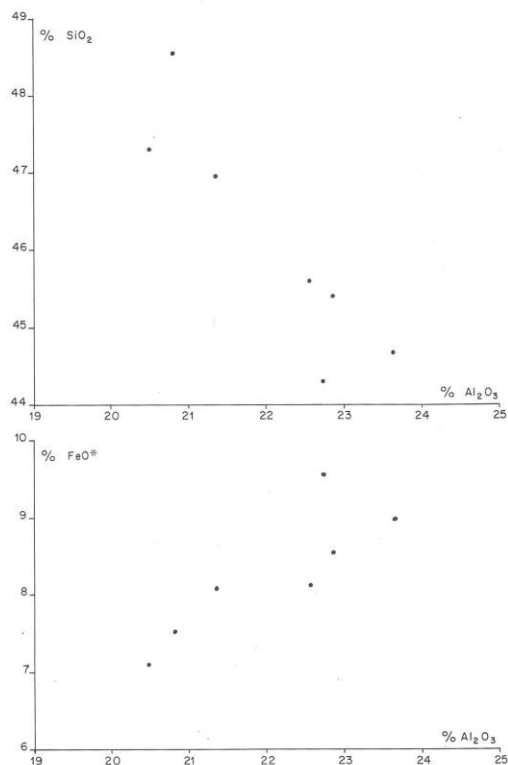


Fig. 3. — Zinnwaldite dans l'échantillon 850,12 m.
Zinnwaldite compositions from specimen 850.12.

thorium (Pagel, 1982, Monier, 1985) dans huit échantillons du sondage profond (657.10, 698, 717, 797.60, 835.92, 844, 848.50, 863.80). Le second est la présence de cassitérite et particulièrement son rassemblement en nids, en étroite association avec le lépidolite Obis dans certains échantillons et sa présence dans des veinules en association avec des phénomènes de greisenisation dans l'environnement plus ou moins lointain du gisement (Aubert, 1966). Ces phénomènes témoignent d'une certaine mobilité de l'étain, mobilité qui selon Eugster (1985) implique des conditions réductrices.

Dans ce qui suit, faute de mieux, nous admettons que tout le fer est sous forme FeO , ce qui n'est sans doute pas très loin de la réalité, mais peut, toutes choses égales d'ailleurs, conduire à une légère surestimation des teneurs en Li_2O .

En ce qui concerne les teneurs en lithium on constate, en comparant les analyses à la microsonde dans lesquelles Rb_2O a été dosé, et H_2O calculé, aux analyses sur micas séparés de Kosakevitch ou aux analyses les plus voisines dans les tables de Foster, que la différence à 100 du total des oxydes (y compris H_2O) des analyses à la microsonde représente très correctement la teneur en Li_2O . On remarquera que le type d'études entrepris dans le présent article ne nécessite pas une très grande précision sur Li_2O . Il suffit que celle-ci permette l'utilisation d'une nomenclature adéquate, ce qui est le cas. Pour une discussion plus détaillée de cette question, on est prié de se référer au volume des annexes (document BRGM n°124).

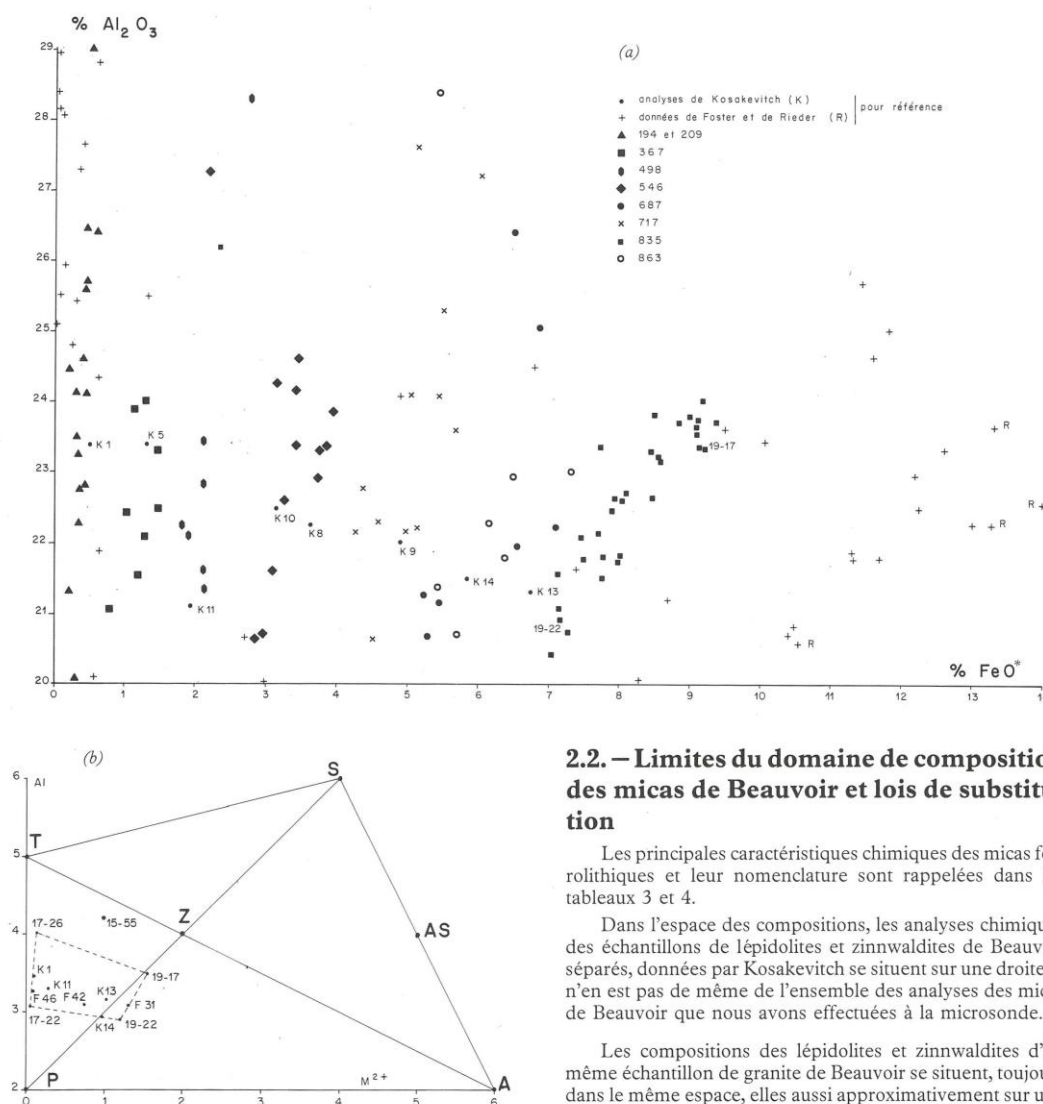


Fig. 4. — a : domaine des compositions des micas de Beauvoir : Al_2O_3/FeO
b : projection sur le plan PTS à partir du pôle muscovite.
P : Polylithionite $Li_4Al_2Si_6$; — T : Trilithionite $Li_3Al_3Si_6$; — A : Annite
 $M_6Al_2Si_6$; — S : Siderophyllite $M_4Al_6Si_4$; — Z : Zinnwaldite $Li_2M_2Al_4Si_6$;
(Coordonnées Al et M^{2+} en nb. at. par maille); — K_1-K_{14} : analyses de
Kosakevitch (1976); 15-55 etc. voir le tableau 7; F31-F45 : analyses de
Foster (1960) pour comparaison.

Mica compositions from the Beauvoir granite.
4a. — Bivariate distribution of Al_2O_3 vs FeO^* ; 4b. — Mica compositions
projected from the muscovite pole onto the P-T-S compositional plane.
P : Polylithionite; — S : Siderophyllite; — T : Trilithionite; — Z : Zinnwal-
dite; — A : Annite; — K_1-K_{14} , in Kosakevitch (1976); — 15-55 : this
study (Table 7); — F31-F46, in Foster (1960).

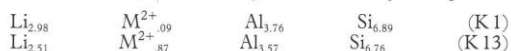
2.2. — Limites du domaine de composition des micas de Beauvoir et lois de substitution

Les principales caractéristiques chimiques des micas ferrolithiques et leur nomenclature sont rappelées dans les tableaux 3 et 4.

Dans l'espace des compositions, les analyses chimiques des échantillons de lépidolites et zinnwaldites de Beauvoir séparés, données par Kosakevitch se situent sur une droite. Il n'en est pas de même de l'ensemble des analyses des micas de Beauvoir que nous avons effectuées à la microsonde.

Les compositions des lépidolites et zinnwaldites d'un même échantillon de granite de Beauvoir se situent, toujours dans le même espace, elles aussi approximativement sur une même droite différente de la précédente et dont la position varie selon la cote de l'échantillon dans le sondage (fig. 1, 2, 3, 4a). Les analyses de Kosakevitch correspondant à une moyenne des compositions des micas individuels dans les échantillons étudiés, on voit que l'ensemble des analyses chimiques des lépidolites et zinnwaldites de Beauvoir correspond en première approximation à une famille à deux paramètres. Nous allons montrer qu'il s'agit d'un plan.

K_1 et K_{13} sont deux analyses de Kosakevitch suffisamment différentes pour que la substitution permettant de passer de l'une à l'autre puisse être définie avec précision. Les formules de ces deux micas, réduits à 42 valences pour les atomes en coordination 4 et 6, s'écrivent de façon simplifiée :



Et la substitution correspondante



Pôles purs			
M Pole muscovite	$K_2 (Al_4 \square_2)$	(Si_6Al_2)	$O_{20}(OH)_4$
P Polyolithionite	$K_2 (Li_4Al_2)$	Si_8	$O_{20}F_4$
T Pole trilithionite	$K_2 (Li_3Al_3)$	(Si_6Al_2)	$O_{20}(OH,F)_4$
S Pole sidérophyllite	$K_2 (Fe^{2+}_4Al_2)$	(Si_4Al_4)	$O_{20}(OH)_4$
Autres compositions théoriques			
$Z_2=SP$ Zinnwaldite	$K_2 (Fe^{2+}_3Li_3Al_2)$	(Si_6Al_2)	$O_{20}(OH,F)_4$
$R=SPT_{-1}$ Protolithionite	$K_2 (Fe^{2+}_4Li Al)$	(Si_6Al_2)	$O_{20}(OH)_4$
$A_2=S_3P_3T_{-4}$ Annite	$K_2Fe^{2+}_6$	(Si_6Al_2)	$O_{20}(OH)_4$
Exemples de compositions réelles de zinnwaldites			
Z_H :	$K_2(Fe^{2+}_{1,5}Li_2Al_{2,17}\square_{0,33})$	$(Si_{6,5}Al_{1,5})$	$O_{20}(OH,F)_4$
Limite de la série lépidolite zinnwaldite (voir dessous)			
$(Z_p)_4=PZ_3$	Z_p :	$K_2 (Fe^{2+}_{1,5}Li_{2,5}Al_2)$	$(Si_{6,5}Al_{1,5})$
Limite des séries muscovite-zinnwaldite et trilithionite-zinnwaldite			
$(Z_T)_2=TZ$	Z_T :	$K^2(Fe^{2+}Li_{2,5}Al_{2,5})$	(Si_6Al_2)
Exemples de compositions réelles de sidérophyllites			
Selon Nockolds et Richey (in Foster 1960)			
$(AM)_{1/2}$:	$K_2(Fe^{2+}_3Al_2\square)$	(Si_6Al_2)	$O_{20}(OH)_4$
Selon Winchell (in Foster 1960)			
$(AS)_{1/2}$:	$K_2(Fe^{2+}_5Al)$	(Si_5Al_3)	$O_{20}(OH)_4$

Tabl. 3. — Micas lithiques et ferreux
Pôles purs

	FeO % total	Li ₂ O %	Al ₂ O ₃ %
Muscovite	< 7	< 0,75	
Muscovite lithique		> 0,75	
Lépidolite		< 2,50	
Trilitionite		> 2,50	< 26,5
Sidérophylite	> 7	< 0,75	> 20
Lépidomelane*		< 0,75	< 20
Protolithionite		> 0,75	
Zinnwaldite		< 2,50	
Cryophyllite		> 2,50	> 17

* Contiennent une proportion importante de Fe³⁺

Tabl. 4. — Micas lithiques et ferreux
Subdivision du domaine des compositions réelles

Dans les échantillons 835,92 et 850,12, les analyses montrent que K₂O et Rb₂O ne varient pas. Dans ces conditions, on peut déterminer directement la loi de substitution sur les diagrammes donnant les pourcentages en poids d'oxydes (fig. 2 et 3). Approximativement Si_{5,6} est remplacé par AlFe_{0,5}, ce qui doit être équilibré en introduisant dans l'équation la quantité nécessaire de Li (non déterminé à la microsonde) :



La caractéristique la plus remarquable de ces deux substitutions (1) et (2) est que le nombre total d'atomes ne varie pas. Nous concluons que le domaine de compositions des micas lépidolite et zinnwaldite est bien un plan dans l'espace des compositions des micas lithiques et ferreux, caractérisé par un nombre de sites octaédriques lacunaires approximativement constant qui, d'après les analyses K₁ et K₁₃, est voisin de 0,30 site/f.u. soit 15 % de pôle muscovite.

Le tableau 5 donne la composition et les formules structurales d'un certain nombre de micas présentant des compositions extrêmes parmi les lépidolites, zinnwaldites et trilitionites de Beauvoir. Li₂O a été évalué dans chaque cas par différence à 100 du total de l'analyse (y compris H₂O calculé) sous réserve des diverses précautions indiquées en annexe. Compte tenu de la teneur à peu près constante en pôle muscovite, nous avons adopté sur la figure une représentation en projection à partir du sommet M sur le plan des micas lithiques et ferreux triocatédrques PTS.

Les compositions des lépidolites et zinnwaldites de Beauvoir tombent dans le quadrilatère représenté en pointillé sur la figure 4b. On remarquera que la composition extrême pour Beauvoir par sa teneur en fer 19-17 se projette approximativement au point $(PZ_3)_{1/4} = Z_p$ que nous considérons ainsi comme l'une des compositions réelles de zinnwaldite, limite de la série lépidolite-zinnwaldite de Beauvoir.

N° d'analyse	17,22	17,26	19,22	19,17	15,55
Profondeur dans le sondage	160,00	160,00	835,92	835,92	863,80
SiO ₂	53,19	49,43	49,01	45,04	44,53
Al ₂ O ₃	21,19	26,21	20,91	23,54	28,38
TiO ₂	.05	.15	.04	.26	.22
FeO	.17	.11	7,21	9,10	5,45
MnO	.08	.24	.94	1,21	.69
MgO	0	.01	.09	.11	.06
ZnO			.26	.35	
CaO	.07	.05			
BaO	0	.10	0	.03	0
Na ₂ O	.39	.39	.39	.37	.30
K ₂ O	9,79	10,77	9,92	9,56	10,75
Rb ₂ O	3,15	1,90	1,90	1,52	1,29
F	7,97	6,73	7,19	5,84	4,64
H ₂ O	.36	1,00	.67	1,27	1,95
F=0	-3,36	-2,83	-3,03	-2,46	-1,95
Total	93,07	94,24	95,49	95,75	96,35
Li ₂ O	6,00	5,76	4,20	3,60	3,70
évalué					
Si ^{IV}	7,15	6,60	6,84	6,39	6,14
Al ^{IV}	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{VI}	2,51	2,73	2,28	2,32	2,76
Ti	.01	.01	0	.03	.02
Fe	.02	5,78	.01	5,61	.63
Mn	.01	.03	.86	.15	.08
Mg	0	0	.02	.02	.01
Li	3,23	3,08	2,35	2,04	2,04
Na	.10	.19	.11	.10	.08
K	1,68	2,05	1,83	1,73	1,89
Rb	.27	.16	.17	.14	.11

Tabl. 5. — Exemple d'analyses de lépidolites et zinnwaldites de Beauvoir à la microsonde (compositions extrêmes).

Les analyses de mica les plus proches du pôle polyolithionite ont été rencontrées parmi les lépidolites III à 194.55 m. Nous donnons les analyses microsonde du mica le plus pauvre en alumine comparées à celles des micas de composition voisine dans Foster (tabl. 6).

	7-5	Foster	Foster	Foster	7-5	
SiO ₂	194.55	54(6)	55(6)	57(6)	194.55	
Al ₂ O ₃	57.76	54.40	58.56	57.03	57.76	Si ^{IV}
	16.95	17.95	14.97	15.35	16.95	Al ^{VI}
TiO ₂	.06	.02	.36	.03	.06	Al ^{III}
FeO	.13	.21	.39	.12	.13	Fe
MnO	.07	2.06	.14	.72	.07	Ti
MgO	.02	.30	1.30	.22	.02	Mn
Li ₂ O	6.00	6.18	6.21	6.84	6.00	Mg
K ₂ O	10.05	10.28	10.63	10.65	10.05	Li
Na ₂ O	.08	.72	.84	.44	.08	K
Rb ₂ O	3.00	1.22		1.35	3.00	Na
F	7.37	9.18	4.34	9.00	7.37	Rb

Tabl. 6. — Polyolithionite de Beauvoir.

La teneur probable en Li_2O est de l'ordre de 6 %. Le total de l'analyse est d'ailleurs 91 % et la teneur en Rb_2O dans les lépidolites pauvres en alumine du haut du sondage ~ 3 %.

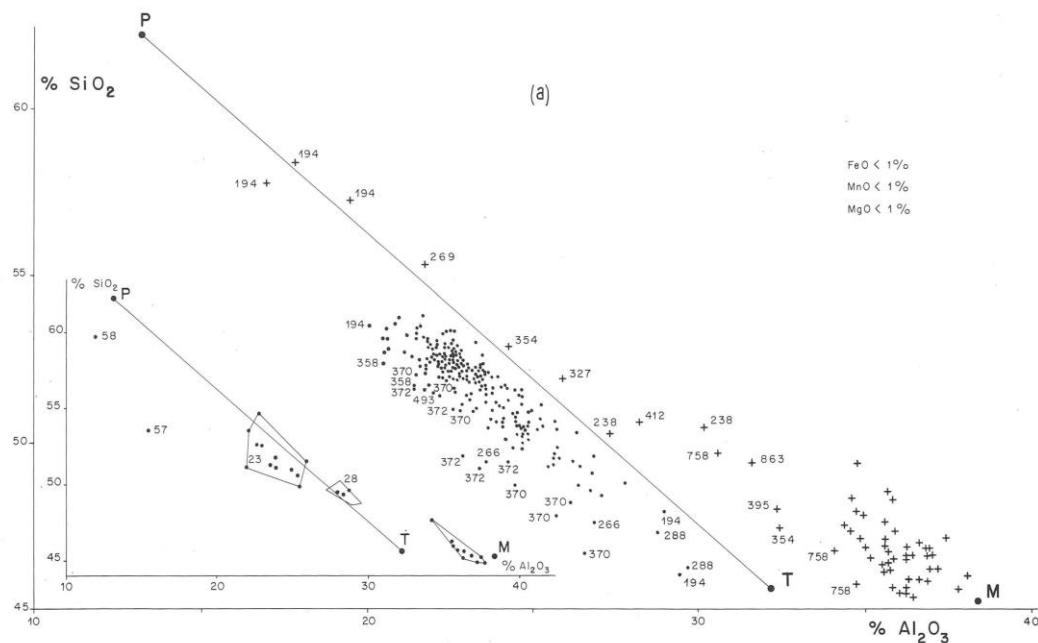
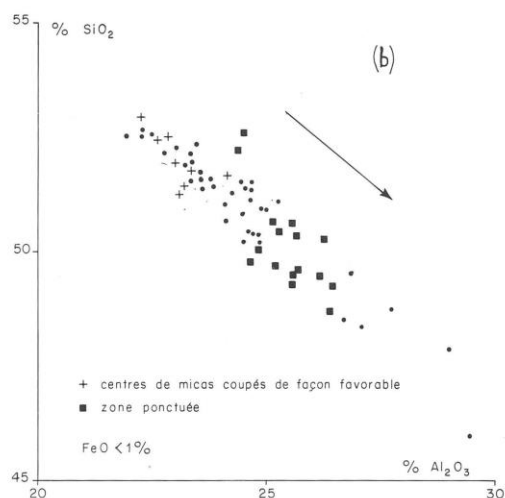


Fig. 5a. — Compositions SiO_2 et Al_2O_3 dans les micas lithinifères pauvres en fer de Beauvoir des types 0-1 (●) et II-III (+).

En référence, en bas à gauche, les compositions des micas lithinifères pauvres en Fe, Mn et Mg dans Foster (1960). P, T, M: Polyolithionite, Trilithionite, Muscovite. 5b et 5c: idem profondeur > 238 m.

5b. Lépidolites de type 0; — 5c. Lépidolite de type 1. Les lépidolites 1 avec $\text{SiO}_2 < 51,3\%$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 > 24\%$ n'existent que dans les échantillons 194,55 et 209 m; — 5d. Domaine possible d'immiscibilité entre les micas lépidolites et trillithionites de Beauvoir. (Les lignes relient des compositions directement en contact).

Li-bearing Fe-poor micas from Beauvoir. Types 0-1 (●) and II-III (+).

Figure 5b and 5c: similar diagrams for depths below 238 m
5b: Type 0 lepidolites

2.3. — Particularités des lépidolites les plus pauvres en fer de Beauvoir.
Comparaison avec les analyses de Foster
Existence de trilitlionite presque pure

Nous examinons dans cette section le cas des lépidolites dans lesquels $\text{FeO}^* < 1\%$ $\text{MnO} < 1\%$ $\text{MgO} < 1\%$. Tous les micas d'Échassières présentant ce type de composition ont été reportés sur un diagramme (SiO_2 ; Al_2O_3) (fig. 5a).

On constate :

1) Un alignement remarquable des analyses effectuées

sur les lépidolites de types morphologiques O ou I provenant des échantillons entre 99 et 238 m de profondeur, parallèlement à la ligne joignant les compositions théoriques P (polyolithionite) et T (trilithionite) ; toutes les compositions entre $P_{1/2}$ et T sont représentées, avec peut-être un domaine vacant au voisinage de $Al_2O_3 = 28\%$ (fig. 5a).

2) Si le domaine à densité maximum coïncide assez bien avec le groupe 23 de Foster, le champ des trilithionites (échantillon 194 et 288) ne présente aucune superposition avec celui du groupe 28 de Foster. L'alignement observé à Échassières est selon la ligne P-T alors que celui trouvé par Foster est entre le groupe 23 et la muscovite (M).

3) Les échantillons de Beauvoir entrant dans la catégorie définie ci-dessus, mais situés à profondeur un peu plus élevée (266-517 m) présentent une plus grande dispersion vers les valeurs plus faibles en SiO_2 et Al_2O_3 (à l'exception des échantillons 288 et 517 qui se superposent parfaitement à l'alignement précédent). Ce décalage s'explique par les teneurs un peu plus élevées en FeO.

4) A des profondeurs inférieures à 238 m, les seuls autres types de micas rencontrés (de morphologie II ou III) sont des muscovites faiblement lithinifères ($Al_2O_3 > 34.5\%$) et des polyolithionites ($17 < Al_2O_3 < 20$) dans l'échantillon 194. A plus grande profondeur, il apparaît une série plus ou moins continue dans les micas II et III correspondant à des points représentatifs alignés entre les polyolithionites 194 et les muscovites ; cet alignement ne correspond pas non plus à celui trouvé par Foster. Il s'agit cependant dans les deux cas de solutions solides lépidolite-muscovite.

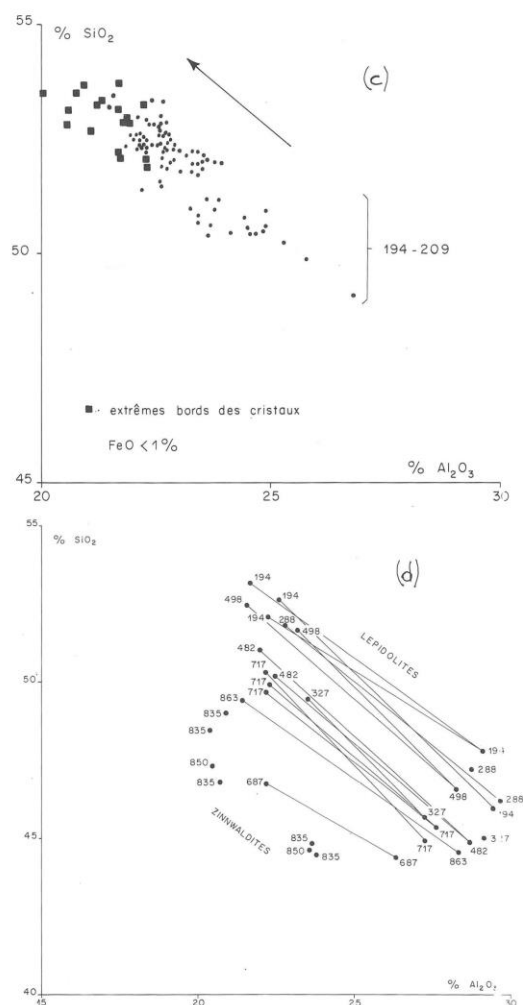
Dans les conditions O-I, le lépidolite et la trilithionite se sont développés en présence de topaze et d'amblygonite. On peut penser que dans les conditions où la fugacité de F et l'activité de Li permettaient l'apparition de ces minéraux, à relativement haute température, la muscovite était instable, et ses solutions solides avec les lépidolites très réduites, ce qui limitait les compositions possibles pour cette phase au voisinage de la ligne polyolithionite-trilithionite.

3. — Zonation des micas de Beauvoir et zonation du granite

3.1. — Quelques précisions sur les types morphologiques de micas des stades 0-1 et leur distribution dans le granite de Beauvoir

On peut distinguer parmi les micas du granite de Beauvoir deux types morphologiques pour le stade I : 1) les micas de forme aplatie (épaisseur $\leq 1/5$ du diamètre, en grandes lattes plus ou moins divergentes, en éventail, en association sub-parallèle, et 2) les micas trapus à tendance idiomorphe d'ensemble mais bordures plus ou moins déchiquetées, amiboïdes, xénomorphes etc.) (fig. 6 et 7).

Le premier type est le seul rencontré du sommet du sondage jusqu'à 367,10 m. De 370,60 m à 517,40 m, les deux types alternent régulièrement selon les échantillons. À partir de 521,80 m et jusqu'au fond du sondage les micas sont toujours du 2^e type morphologique avec développement plus ou



5c: Type 1 lepidolites (only found in specimens 194.5 and 209 m ; — 5.d : Possible miscibility gap as defined by lepidolites and trilithionites from Beauvoir. Lines are drawn between analyses obtained from adjacent points.

moins important des bordures amiboïdes ou squelettiques. La taille des micas devient simplement plus petite dans les échantillons les plus profonds 883,15 et 883,22.

Il faut noter que, dans les échantillons de premier type, on n'observe généralement pas de micas trapus du deuxième type. L'inverse n'est pas vrai. Dans les échantillons du deuxième type, on rencontre jusqu'au bas du sondage assez souvent des lattes divergentes ou en association sub-parallèle mais en quantité subordonnée.

Dans le premier type (partie haute du sondage), les coeurs idiomorphes repérables au microscope par leurs ponctuations opaques ou leur différence de biréfringence sont petits (diamètre $1/5$ ou $1/10$ de celui de la latte) et ils n'occupent pas nécessairement une position centrale dans le mica.

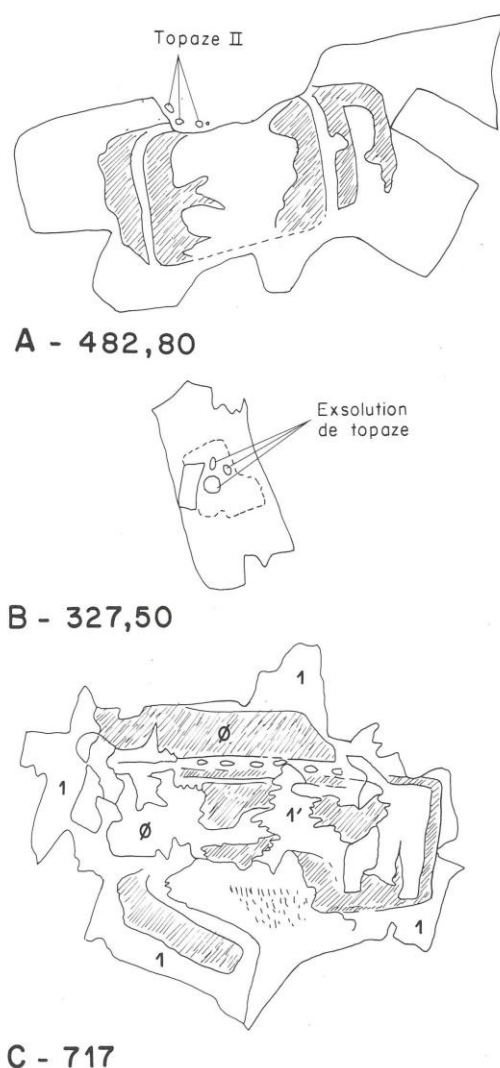


Fig. 6. — Micas du granite de Beauvoir à « faciès trapu » de type 0-1 avec zones de trilitionite en bordure externe de la zone 0 (zones hachurées).

Dans le mica B (327,5) exsolution apparente de topaze.
Line drawings of typical mica sections from the Beauvoir granite
Nearly equant mica laths type 0-1. Trilitionite zones (lined).
Mica B contains topaze inclusions (exsolutions?).

Dans les lattes subparallèles d'une manière générale, on observe assez souvent un autre type de zonation caractérisé toujours par une zone ponctuée : celle-ci apparaît à proximité des deux extrémités de la latte, qu'elle recoupe chaque fois de part en part, et ne se prolonge apparemment pas parallèlement aux faces (001).

Dans les micas trapus, le cœur, avec ses zones visibles, occupe une position centrale et a un diamètre généralement égal au moins à la moitié de celui de l'ensemble du mica.

Outre les zones ponctuées, qui peuvent être répétées, et à l'extérieur de celles-ci, on observe souvent une zone présentant des changements nets de biréfringence et d'indice.

Même dans le cas des micas trapus du deuxième type, ces zones dessinent rarement des contours fermés. Elles sont le plus souvent « en atolls », partiellement effacées par des modifications de composition, dont la trace est observable également dans les plages internes où n'apparaît pas de zonation idiomorphe du type précédent, sous forme d'une juxtaposition de domaines le plus souvent allongés selon les feuillets du mica et présentant à leurs limites des différences d'indice et de biréfringence sensibles. On observe parfois, dans ces zones centrales également, l'apparition d'un autre cristal, à contours nets, géométriques, indentés ou en îlots, de même composition que le mica englobant, mais d'orientation très différente. Il semble donc que les modifications de composition des parties internes se soient souvent accompagnées de recristallisation. Les parties internes des micas recristallisées avec une orientation différente ne contiennent jamais de zones ponctuées.

3.2. — Caractéristiques chimiques de la zonation des micas des stades 0-1 de Beauvoir

Bien que 1) le cœur étant souvent petit le nombre de sections utiles soit limité — 2) le plan de coupe passe assez rarement par le centre — 3) les micas de la partie profonde du sondage diffèrent systématiquement de ceux de la partie haute, en particulier par leur teneur en Fe et Mn, il est malgré tout possible de proposer un schéma d'ensemble de leur zonation, caractérisé par un mode de comportement uniforme de Al et Ti du cœur vers le bord.

Dans les exemples de zonation que l'on peut considérer comme complets, l'alumine dans la zone non ponctuée centrale présente une teneur voisine de 22 % ; cette teneur augmente progressivement vers le bord de celle-ci et atteint 23,5 à 24,5 % dans la zone ponctuée. Des teneurs plus élevées en alumine n'apparaissent que dans la zone suivante à biréfringence variable, avec zonation interne idiomorphe. Dans cette région, apparaissent parfois des teneurs de 28 à 29 % Al_2O_3 , toujours dans des zones minces à forte biréfringence avec contacts nets et différence d'indice avec le mica environnant, dont la teneur en alumine est comprise entre 22 et 23 % (fig. 6). Ces zones à haute biréfringence sont interprétées comme dues à une immiscibilité entre trilitionite et lépidolite (fig. 5d). Ce type de zone à haute biréfringence étant le plus souvent non répété et idiomorphe, cette immiscibilité s'est produite au stade magmatique et il s'agit d'un phénomène qui s'est développé en cours de croissance et non d'une démixion. Dans deux cas, on a observé l'apparition de petits grains de topaze dans cette région de micas zonés (fig. 6B).

Au-delà, dans la partie externe du cristal apparemment homogène (lépidolite 1), la teneur en alumine retombe à 23 et décroît ensuite régulièrement jusqu'à une valeur, dans l'extrême bord du mica, généralement voisine de 21 % s'abaissant exceptionnellement jusqu'à 20 % (243,60 par exemple).

Les teneurs en titane sont plus variables (du simple au double) à un niveau donné de cette zonation que les teneurs en alumine. Mais le schéma de variation paraît bien être unique. Typiquement on a des teneurs moyennes (par exemple 0,15 %) au cœur. Ces teneurs s'élèvent jusqu'à un maximum de l'ordre de 0,20 à 0,30 % dans la zone ponctuée, retombent

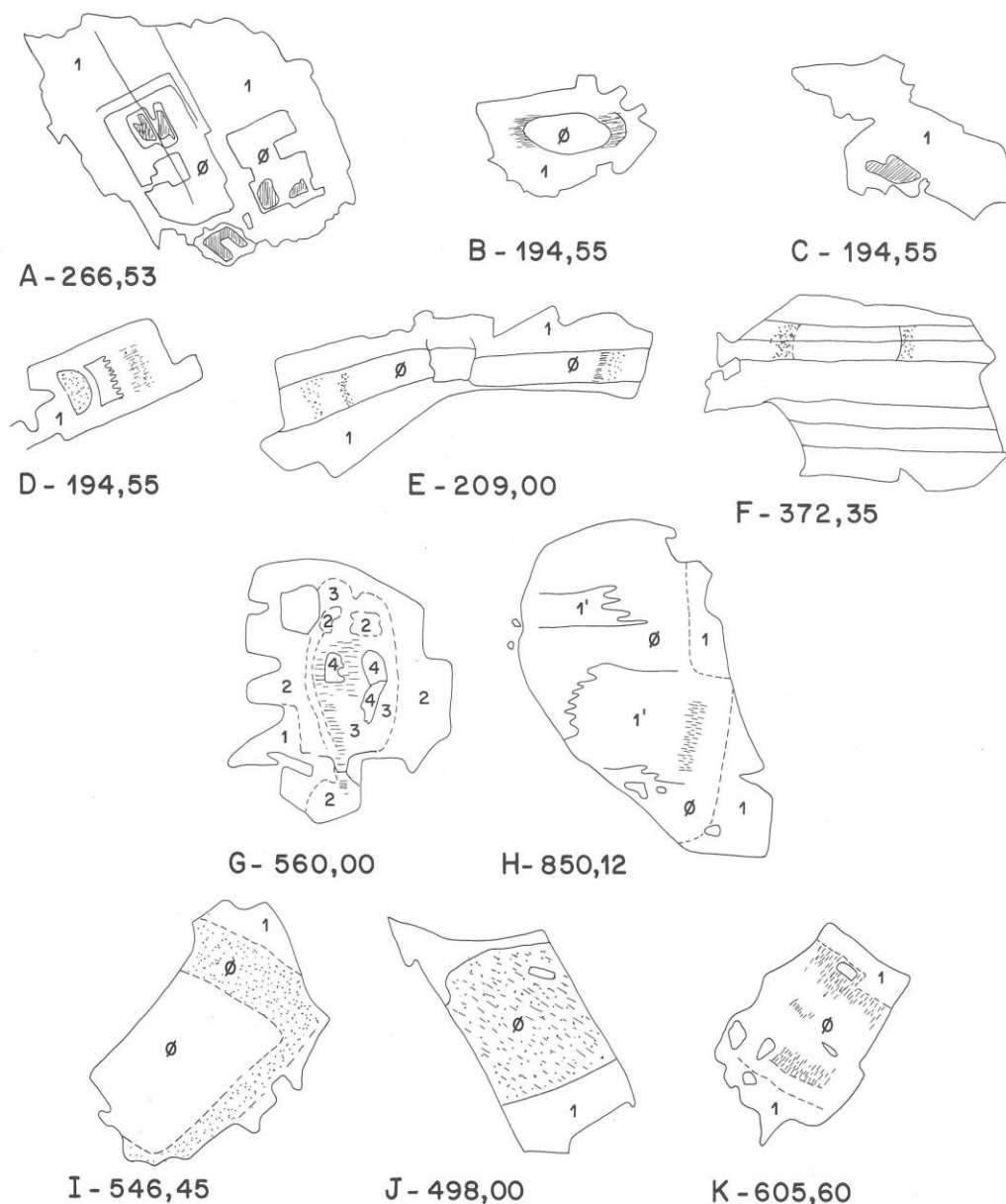


Fig. 7. — Micas de type Ø-1 dans le granite de Beauvoir (les zones « ponctuées » dans le cœur idiomorphe de type Ø sont hachurées ou ponctuées).

A → F : Partie supérieure du forage : la zone externe 1 est très développée. Dans les micas « en lattes » (E et F) la zonation n'apparaît qu'aux extrémités de certaines lamelles.
G → K : Zonation large des micas « faciès trapu » caractéristiques du bas du sondage : zone 1 peu développée par rapport au cœur automorphe Ø.
— le mica G montre 4 zones de biréfringence croissante de 1 à 4.
— le mica H montre une modification de la composition de la zone Ø en une composition 1' proche de celle de la zone 1.
— le mica A est un exemple probable de croissance en syneusis de deux ou trois cristaux Ø accolés en un seul au stade 1.

Line drawings of typical mica sections from the Beauvoir granite.
Type Ø-1 micas.

Dusty zones (see text) in the euhedral core are stippled or lined.

A-F Upper zone of the drill hole. External border zone is large. In the lath-shaped micas (E and F) zoning is only apparent on some sections;
G-K Wide zones visible in the near equant micas found in rocks sampled in the lower parts of the drill-hole. Zone « 1 » is small relative to the large euhedral core.
G — Micas with four zones whose birefringence increases from 1 to 4.
H — This crystal shows a modified core composition leading to a chemical analysis « 1' » close to that corresponding to composition 1.
A — Probable example of syneusis type growth of two/three type 0 crystals adjacent at crystallization stage 1.

à $\approx 0,15\%$ dans la zone intermédiaire à biréfringence variable, et passent assez brutalement à des valeurs encore décroissantes mais dans la gamme 0,5-0 dans la partie externe, apparemment homogène, du mica.

Dans un cas de mica 0bis, les granules opaques de la zone ponctuée ont pu être analysés à la microsonde. Il s'agit de TiO_2 .

Un dédoublement de la zone ponctuée s'observe quelquefois. La zone non ponctuée intermédiaire entre les deux zones ponctuées est comparable à celles-ci par la teneur en TiO_2 mais présente une teneur en alumine plus faible (22 %). On peut donc penser que ce domaine de composition (23-24 %) est un domaine limite pour la stabilité de la solution solide. A température décroissante ces compositions deviennent instables et il se produit une exsolution de TiO_2 .

Les **teneurs en fer et manganèse** dans les micas présentent des variations importantes du haut en bas du sondage.

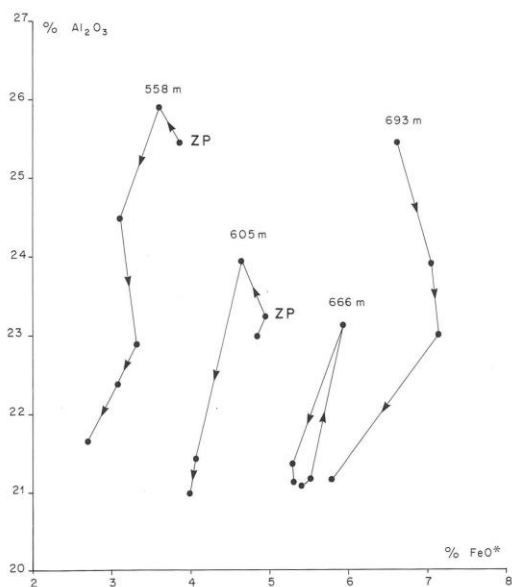


Fig. 8. — Quelques exemples de zonation des compositions des micas de Beauvoir de type 0-1 où n'apparaît pas la zone de trillithionite. (ZP: zone 0 ponctuée).

Zoning as demonstrated in typical Beauvoir micas represented in terms of Al_2O_3 and FeO^* . Type 0-1. A trillithionite zone is not present. ZP: dusty zone (see text).

Les variations relatives de la teneur en fer, dans un même échantillon, sont limitées. Au maximum la variation est de 2 % sur une teneur moyenne de 8 % pour les échantillons les plus riches en fer (835.92, 850, 850.12). Les teneurs en fer sont positivement corrélées aux teneurs en Al_2O_3 dans un échantillon donné. Cela n'exclut pas des oscillations des teneurs en fer dans les zones internes, mais l'importance de ces oscillations est limitée. Cette corrélation ne s'étend pas aux zones de trillithionite. La teneur en fer de la trillithionite

est pratiquement identique à celle du lépidolite associé (fig. 9).

Il y a des exceptions à cette règle générale de corrélation Fe Al dans le même échantillon. Elles impliquent toujours, semble-t-il, un domaine de composition $\text{Al}_2\text{O}_3 > 23\%$. Beaucoup d'entre elles correspondent à des variations importantes de Al à Fe constant. Plus remarquable est le cas limité aux micas riches en fer où la succession de certaines zones est caractérisée par une variation inverse de Fe et Al (fig. 9). Ces relations pourraient s'expliquer par un élargissement à basse température du domaine d'immiscibilité.

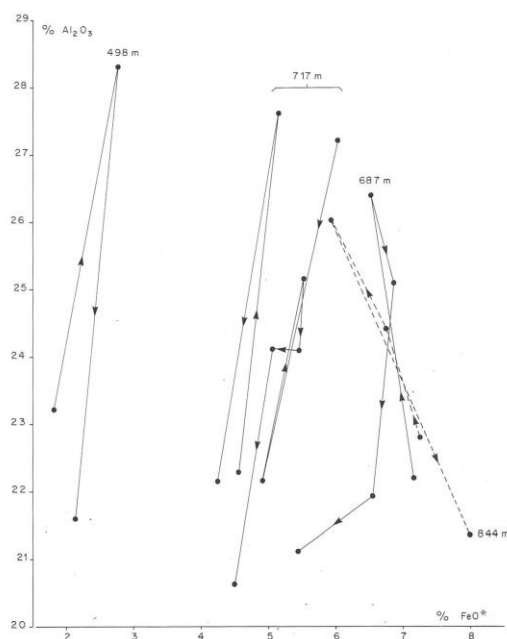


Fig. 9. — Exemples de zonation des micas de Beauvoir. Les échantillons 498, 717 et 687 m montrent des zones à composition de trillithionite. L'échantillon 844 m montre l'inversion de la pente des lignes joignant les compositions des zones dans les micas très riches en fer. Comparer avec l'amorce de cette tendance exprimée sur les échantillons 687 et 693 m.

Typical examples of compositional variations within individual crystals of the Beauvoir granite.

Specimens 498, 717 and 687 show zones with trillithionite composition. Specimen 844 shows an inversion of the slopes of the lines tying compositions of adjacent zones in the Fe-rich micas. This phenomenon is indicated but much less visible in specimens 687 and 693.

Les variations de MnO sur un diagramme $\text{MnO} : \text{Al}_2\text{O}_3$ sont assez comparables à celles de FeO sur le diagramme $\text{FeO} : \text{Al}_2\text{O}_3$, mais les variations relatives sont plus importantes que dans le cas de FeO .

Dans chaque échantillon les **teneurs en Rb_2O** présentent une corrélation inverse étroite avec les teneurs en Al_2O_3 (fig. 10). Cependant, d'un échantillon à l'autre, à même teneur en Al_2O_3 , la teneur en Rb_2O présente des variations. Ainsi, pour $\text{Al}_2\text{O}_3 = 21\%$, la teneur en Rb_2O peut varier de 1,5 à 3 %, la teneur la plus fréquente étant 2 %. A cette teneur, dans le lépidolite à 21 % Al_2O_3 , correspond une teneur de 1,2 % Rb_2O dans la trillithionite à 29 % Al_2O_3 .

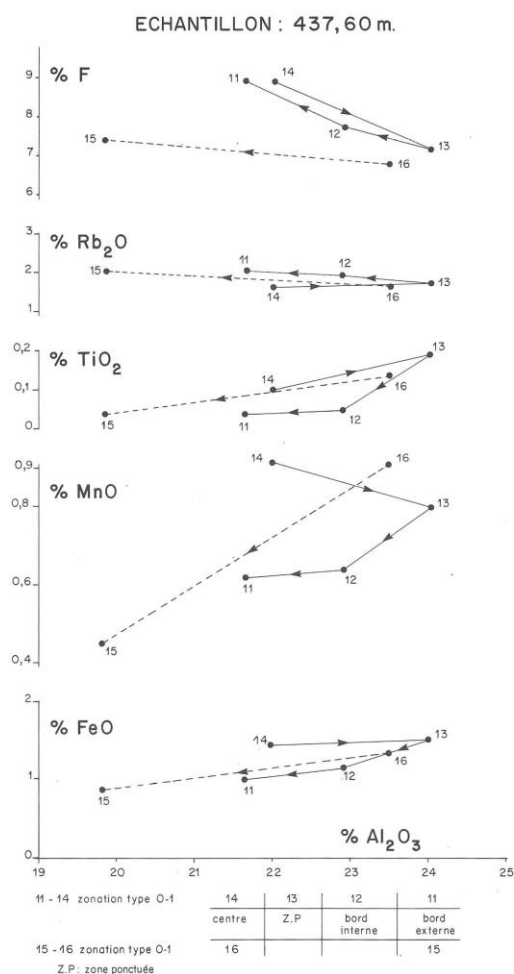


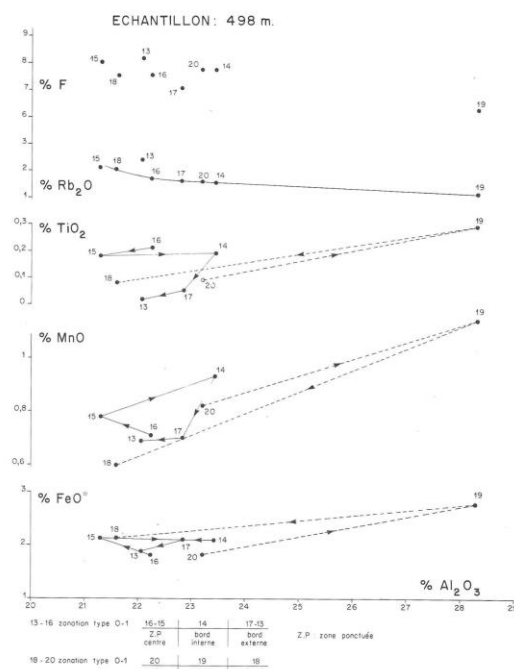
Fig. 10. — Zonation de type 0-1 dans les micas des échantillons 437, 6 et 498 m. (dans l'échantillon 498, la composition 19 correspond à une zone de trilithionite).

Les variations de Na_2O sont difficiles à interpréter. Les teneurs sont typiquement de l'ordre de 0,30 % ($\pm 0,10$ %). Les parties internes qui ont subi des modifications de composition avec disparition de la zonation visible et les zones ponctuées ont souvent des teneurs de l'ordre de 0,20 %.

Enfin les teneurs en fluor sont variables dans la gamme 6 à 8 % avec des teneurs plus élevées dans les bords des micas (7 à 8 %) que dans le centre.

Modifications de composition dans les zones internes.

L'échantillon 850.12 présente un cas particulièrement net de modification des zones internes. La composition 26 (tableau 7) représente la composition des zones internes non



Zoning (Type 0-1) in micas from specimens 437 and 498. Analysis 19 from specimen 498 corresponds to a trilithionite zone.

	26	25	22	21
SiO ₂	44.63	48.55	46.96	47.31
Al ₂ O ₃	23.62	20.81	21.36	20.49
TiO ₂	.22	.13	.04	.03
FeO	8.97	7.53	8.03	7.10
MnO	1.22	.82	.70	.79
MgO	.13	.15	.17	.13
K ₂ O	9.98	9.89	10.10	9.89
Na ₂ O	.35	.37	.40	.37
Rb ₂ O	1.29	1.47	1.80	1.67
F	6.10	7.50	7.90	7.68
H ₂ O				
calculé	1.12	.49	.26	.31
Total	95.07	94.64	94.64	92.55

Tabl. 7. — Composition modifiée dans le cœur d'une zinnwaldite de 850.12

modifiées, celle de 25 la composition modifiée et 22 et 21 les compositions de la zone de bordure (pour comparaison).

La modification correspond donc principalement à une diminution forte de Al_2O_3 (et corrélativement augmentation de SiO_2), à une diminution de TiO_2 , à une augmentation sensible de F et probablement aussi de Li si on en juge par le total. Les zones centrales du mica évoluent ainsi vers une composition proche de celle du mica de la bordure, avec notamment un enrichissement net en pôle polyolithionite. La chute de la teneur en TiO_2 reste modérée et la composition 25 à cet égard ne peut être confondue avec une composition de bordure type 22 ou 21.

3.3. — Lattes de lépidolite I sans zonation apparente, lépidolites II et III et muscovites II et III

Les lattes de lépidolite I présentent des variations de composition le plus souvent semblables à celle du lépidolite I de la zone externe des cristaux zonés. La gamme de composition peut cependant être décalée vers les compositions plus alumineuses (dans la gamme Al_2O_3 22 à 23 %) dans la partie haute du sondage (99-107 m.). Plus exceptionnellement des lattes voisines peuvent présenter des gammes de composition différentes et ce phénomène peut s'accompagner d'une inversion dans la variation des teneurs en Al_2O_3 du centre vers le bord (croissance) (échantillons 194 et 209, voir aussi section 3.7).

Les lépidolites II et III, de petite taille, souvent en éventail ou squelettiques, ont une composition proche du lépidolite I, mais qui s'étend parfois au-delà vers les faibles teneurs en alumine (jusqu'à 17 %) (micas proches des polyolithionites) (échantillon 194, analyse 7-5, tabl. 6).

Les bords des micas zonés et des lattes sans zonation visible sont fréquemment corrodés au même titre que les feldspaths avec développement de golfes de corrosion peu profonds en bordure desquels s'observe le développement de granules plus ou moins gros de topaze II, à partir de la profondeur 327 m (fig. 6A).

À l'extérieur du lépidolite I, se développe dans certains cas, une muscovite II avec une limite nette. Cette muscovite peut également constituer des prolongements amiboïdes ou des petits cristaux plus ou moins en éventails. Il s'agit là de muscovites vraies à teneurs en F faibles (maximum 1 à 2 %) et dans lesquelles le total de l'analyse ne permet pas de mettre en évidence de façon indiscutable la présence de lithium. Les teneurs en Rb_2O restent cependant non négligeables, souvent proches de 1 % (voir Volfinger (1974, 1975), Volfinger *et al.*, (1985)). L'altération en séricite massive de la topaze et celle beaucoup plus discrète du feldspath correspondent au développement de micas de compositions très analogues.

3.4. — Conclusion sur le domaine de composition des micas lithiques de Beauvoir

Il résulte de l'ensemble des considérations des sections 2.2., 2.3., 3.2 et 3.3 que les micas de Beauvoir appartiennent à deux séries de solutions solides séparées par un domaine d'immiscibilité représenté sur la figure 5d.

— Une série continue entre les termes P, $P_{1/2}T_{1/2}$ et Z_p (série lépidolite-zinnwaldite P).

— Une série moins bien connue, mais qui pourrait elle aussi être continue, entre trillithionite et zinnwaldite T.

3.5. — Zonation géochimique dans le granite de Beauvoir d'après la composition des micas

Les travaux antérieurs ont mis en évidence une croissance progressive de la teneur en fer des micas du granite du haut en bas du sondage, mais aussi des oscillations à certains niveaux ce qui est confirmé par la présente étude. L'interprétation suggérée était l'intrusion successive de plusieurs unités magmatiques adjacentes subcontemporaines.

La présente étude a mis en évidence des variations du même type pour MnO et MgO , et même pour TiO_2 . Mais elle a surtout mis en évidence, lorsque l'échantillonnage était suffisant, qu'il s'agissait toujours d'évolutions très progressives en fonction de la profondeur et que les discontinuités supposées n'existaient probablement pas. Le log détaillé des compositions des micas est donné figure 11a. La figure 11b résume ces variations.

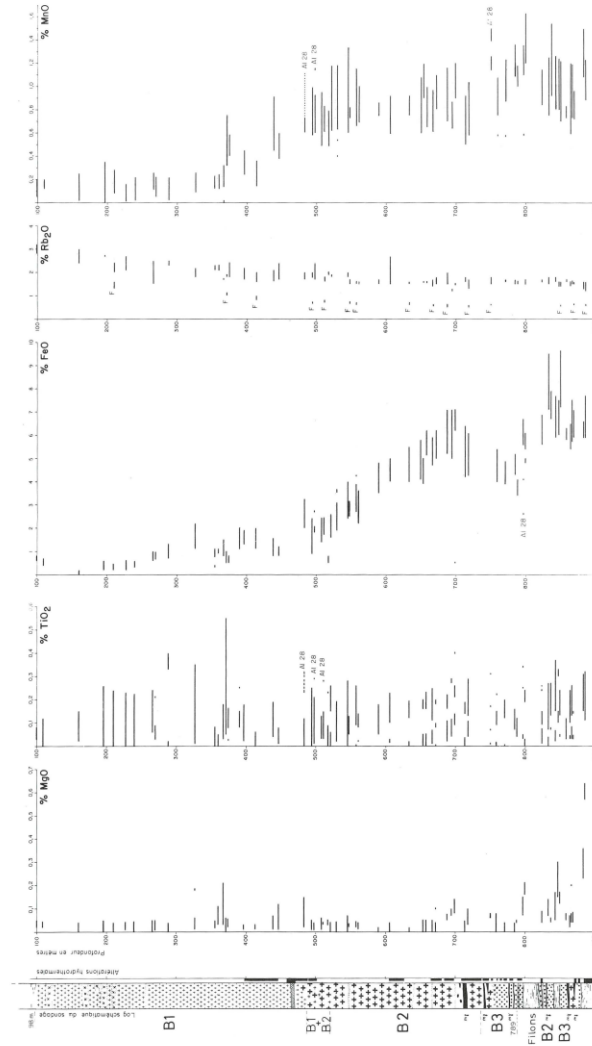
Dans ces conditions, l'hypothèse de l'existence de plusieurs unités intrusives mérite d'être réexaminée. La continuité est confirmée de façon spectaculaire par les dosages du rubidium dans les micas. Rb_2O montre une décroissance continue du sommet à la base du sondage (exception faite des intercalations de microgranites), ce qui suggère qu'il s'agit d'un seul et même corps de magma (fig. 11 et 12).

Comme Rb_2O est dans chaque échantillon corrélé à Al_2O_3 (fig. 10), on a choisi (1) d'étudier les variations de Rb_2O pour $Al_2O_3 = 22 \pm 0,5$ %. Rb_2O décroît rapidement de 3 % à 1,75 % entre 100 et 500 m ; il se stabilise ensuite aux environs de 1,60 dans les 400 m suivants. Ce genre de variation régulière pourrait représenter la variation interne par diffusion dans une seule masse magmatique. On ignore à ce stade si cette variation régulière est gouvernée par la gravitation et les variations de pression fluide, ce qui produirait une zonation verticale, ou s'il s'agit de surfaces obliques parallèles à celles qui délimitent, semble-t-il, les autres variations chimiques dans l'intrusion de Beauvoir (Autran et Burnol, 1955).

Les teneurs moyennes en FeO dans les lépidolites-zinnwaldites croissent progressivement du haut en bas du sondage de moins de 1 % entre 100 et 250 m à 9 % entre 830 et 880 m. Mais, dans le détail, les variations sont beaucoup plus compliquées avec des oscillations dont la longueur d'onde est variable mais de l'ordre de la centaine de mètres en moyenne et l'amplitude individuelle de 1 à 2 %. Ces oscillations se superposent à deux grandes tendances : de -100 à -450 m dans tout le faciès B 1 du granite, la teneur en fer du mica croît très peu et atteint au maximum dans les coeurs de cristaux des teneurs comparables à celles des micas du sommet du faciès B 2 du granite ; par contre de -450 à -750 m, dans tout le faciès B 2 on a une croissance continue et régulière du fer vers le bas.

Les teneurs moyennes en manganèse croissent également avec la profondeur, mais de façon très différente. On a un palier à 0,15 % MnO entre 100 et 350 m. Ensuite la teneur

(1) Les micas de cette teneur en Al_2O_3 sont les mieux représentés à la fois dans les coeurs et les bordures des cristaux (cf. fig. 4) et à toutes les profondeurs du forage.



Variation de composition des micas lithophylles du granite de Beauvoir en fonction de la profondeur. (Rapport graphique de 900 analyses à la microanalyse électronique sur 73 échantillons.)

Fig. 11a. — Log des compositions de micas mesurées dans les échantillons étudiés du sondage G.P.F.

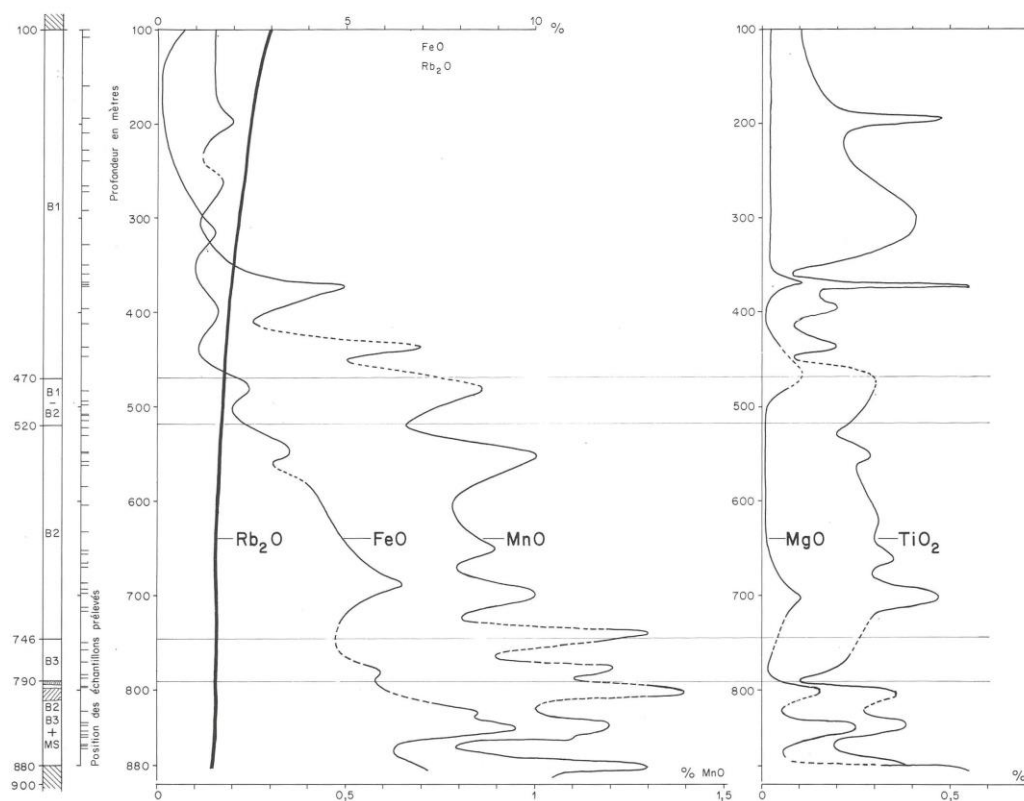


Fig. 11b. — Représentation schématique des variations de composition des micas du granite de Beauvoir selon la profondeur du forage G.P.F.

On a reporté pour chaque échantillon dont la position est indiquée à gauche, le long du log du forage :

- la moyenne de la gamme des teneurs pour FeO, MgO, MnO ;
- la teneur maximale pour TiO₂ ;
- la teneur en Rb₂O pour les compositions à Al₂O₃ ≈ 22 % (voir texte).

Simplified variation diagram showing the composition of Beauvoir granite micas in terms of Rb₂O, FeO, MnO, MgO and TiO₂ as a function of depth

For each specimen whose position is recorded on the vertical axis are reported :

- Average FeO, MgO and MnO contents
- Maximum TiO₂ content
- Rb₂O content for a fixed 22 % Al₂O₃ content (see text for discussion).

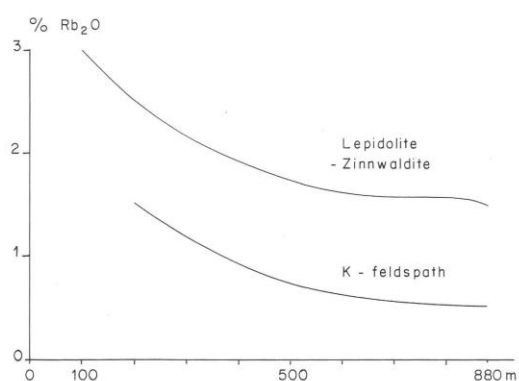


Fig. 12. — Variations comparées des teneurs en Rb₂O des micas et des K-Feldspaths de Beauvoir en fonction de la profondeur.
Rb₂O content of micas and K-feldspars as a function of depth.

augmente régulièrement sur 200 m, jusqu'à un autre palier de 0,85 % MnO entre 550 et 750 m. Entre 750 m et le fond du sondage (880 m) la teneur moyenne est voisine de 1,05 %. On observe pour le manganèse le même type d'oscillation que pour le fer, mais les deux systèmes d'oscillation sont indépendants. Le nombre d'oscillations pour le manganèse est plus grand que pour le fer (11 maxima). La longueur d'onde est donc plus faible, de l'ordre de 50 m, et l'amplitude est variable, de l'ordre de 0,20 en moyenne pour une variation totale de l'ordre de 1 % MnO.

Les teneurs moyennes en magnésium restent inférieures à 0,05 % entre 100 et 350 m, présentent quelques variations entre 350 et 550 m (notons au passage que c'est la zone où MnO croît très rapidement de 0,15 à 0,85 %), en particulier deux maxima à 0,10 %, l'un à 365 m, l'autre entre 450 et 480 m (pas d'échantillons dans cet intervalle). Elle retombe ensuite au-dessous de 0,05 % de 500 à 650 m, puis présente une série de quatre maxima dont les positions coïncident avec celles des maxima de MnO entre 700 et 880 mètres.

On voit que les variations de MgO présentent certaines relations avec les variations de MnO : dans les deux zones de palier des teneurs en MnO, les teneurs en MgO restent au-dessous de 0,05 %. Les oscillations n'apparaissent que 1) dans la zone où MnO croît rapidement avec la profondeur — 2) dans la zone à $\text{MnO} \geq 1\%$ et dans cette zone les maxima se correspondent très précisément pour les deux oxydes. La longueur d'onde est donc dans cette zone de l'ordre de 50 m et l'amplitude des oscillations de 0,10 %.

Pour le titane, nous avons reporté non la teneur moyenne comme pour FeO et MgO, mais le maximum. En effet le minimum, qui correspond à l'extrême bord du mica, est toujours très proche de zéro. On constate que, mis à part les 80 premiers mètres où elle est $< 0,20\%$, la teneur moyenne est de l'ordre de 0,25 à 0,30 % et varie peu. En revanche on note de nombreuses oscillations d'amplitude atteignant $\pm 0,20$. Les positions des maxima coïncident presque toujours avec ceux observés pour MnO, en particulier les positions des pics importants à 375 m, à 700 et à partir de 800 m (identiques sur les diagrammes représentant les variations de TiO_2 , MnO et MgO), et celle du premier pic à 194,55 (non visible sur MgO).

Deux hypothèses peuvent, dans l'état actuel des recherches, être énoncées pour expliquer ces variations.

— Une contamination

1) d'une part parce que la première perturbation observée (de caractère local à 194-209 m) correspond à un passage remarquable où des enclaves anguleuses de granite type Beauvoir sont nettement observées sur les carottes, ainsi d'ailleurs que des litages magmatiques à tendance monominérale ;

2) d'autre part parce qu'une augmentation sensible des teneurs en magnésium n'est observée que dans la partie basse du sondage, là où le granite de Beauvoir renferme une proportion importante de xénolites (microgranites et schistes pélitiques), en particulier à 883 m, point le plus bas où est observé le granite au contact immédiat de l'éponte de schistes du plancher.

Cependant, un examen plus attentif montre que cette hypothèse est inadéquate pour expliquer l'ensemble des faits :

1) Des matériaux étrangers n'existent que dans la partie la plus profonde du granite. La contamination ne peut donc expliquer un phénomène à caractère rythmique avec une longueur d'onde de 100 m, apparaissant dès la profondeur de 200 m.

2) Les enclaves observées à 194 m ne sont pas des xénolites, mais du granite de Beauvoir. Elles sont d'ailleurs accompagnées par des litages magmatiques à tendance monominérale (lépidolite, albite) dans le granite.

3) La montée exceptionnelle des teneurs en MgO observée à 883 m ne se reproduit ni dans les autres contacts avec les septa des schistes, ni au toit de l'intrusion. Il s'agit donc beaucoup plus probablement d'un faciès précoce (le grain de cette roche est particulièrement fin), conservé dans les contacts d'un filon intrusif mince (1 m), à l'abri de l'évolution d'ensemble de la masse magmatique. La découverte à 837 m d'un microgranite à composition très proche du granite de

Beauvoir, mais à teneur en MgO de ses micas encore plus élevée que celle des échantillons 883 vient conforter cette interprétation. Ce microgranite apparaît comme une *intrusion liée au magma de Beauvoir*, à peine moins évoluée que la masse principale.

— **L'intrusion successive de plusieurs unités magmatiques** paraît en revanche susceptible d'expliquer l'ensemble des faits observés, à condition que le phénomène soit assez rapide pour que les premières unités ne soient pas refroidies et entièrement cristallisées lorsque les dernières se mettent en place. En effet, *cette mise en place par pulsions successives de magmas légèrement différents* doit permettre à des échanges internes de se poursuivre assez longtemps à l'état magmatique après la mise en place de l'ensemble, pour qu'un certain type d'équilibre d'ensemble puisse s'établir pour des éléments tels que les alcalins, comme le suggère la répartition monotone de Rb_2O .

3.6. — Variations de la teneur en Rb_2O dans le feldspath potassique.

Étant donné la régularité des variations observées pour Rb_2O à travers le sondage, nous avons admis que l'on avait affaire dans les micas à une seule masse magmatique, avec une distribution de $\mu \text{Rb}_2\text{O}$ non uniforme, mais équilibrée compte tenu des contraintes physico-chimiques imposées au bain. Si tel est le cas, le feldspath potassique doit avoir enregistré le même type de variations de teneurs en Rb_2O que le lépidolite.

Effectivement, la figure 12 montre une décroissance régulière de la teneur en Rb_2O dans le feldspath potassique avec la profondeur, parallèle à celle du mica. Les teneurs en Rb ne présentent pas de variations à l'intérieur d'un même échantillon.

Le coefficient de partage varie fortement. Comme les teneurs en K_2O du lépidolite et du K feldspath sont pratiquement constantes on peut écrire :

$$\frac{(\text{Rb}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) \text{ lépid.}}{(\text{Rb}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) \text{ K Feldsp.}} = \frac{15}{10} \frac{(\text{Rb}_2\text{O}) \text{ lépid.}}{(\text{Rb}_2\text{O}) \text{ K Feldsp.}}$$

Ce dernier rapport $\frac{\text{Rb}_2\text{O} \text{ lépid.}}{\text{Rb}_2\text{O} \text{ K Feldsp.}}$ varie de $\sim .60$ dans

la partie haute du sondage à ~ 3 dans la partie profonde. On peut penser que cette variation est liée au fait qu'il s'agit de lépidolite dans le premier cas et de zinnwaldite dans le second (voir Volfinger et Robert (1980)).

La remarquable corrélation observée dans la plupart des cas entre Rb_2O et Al_2O_3 dans un mica donné implique, compte tenu des variations très rapides des teneurs en Al_2O_3 (cristallisation alternante de deux micas immiscibles) qui ne peuvent s'accompagner de variations comparables de Rb_2O dans le bain, que la concentration de Rb_2O dans un mica à $\mu \text{Rb}_2\text{O}$ donné dépend de façon importante de sa composition dans les sites tétraédriques et octaédriques, puisque les variations très rapides des teneurs en Al_2O_3 , correspondant à la cristallisation alternante de deux micas immiscibles, ne peuvent s'accompagner de variations comparables de $\mu \text{Rb}_2\text{O}$ dans le bain silicaté.

Compte tenu de cette remarque, la courbe plus régulière de variation de la teneur en Rb_2O dans le K feldspath est probablement une image plus significative de la variation de $\mu\text{Rb}_2\text{O}$ dans le bain silicaté

3.7. — Remarque sur la zonation des lépidolites pauvres en fer

Dans l'alignement remarquable de lépidolite pauvre en fer sur le diagramme $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ (fig. 5a) (profondeurs < 238 m), on peut distinguer la part des micas 0 et celle des micas I.

1) Pour les cœurs de micas zonés (type 0), on observe un très bel alignement (fig. 5b) entre $\text{Al}_2\text{O}_3 = 22\%$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 = 29\%$ (trilithionites). Les points $\text{Al}_2\text{O}_3 = 22-23,5\%$ correspondent à des centres de micas 0; les points $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25$ à 27% à leurs bords, à proximité du mica I. Dans l'extrême bord on note exceptionnellement des alternances entre deux types de compositions présentant des contacts nets et hypidiomorphes $\text{Al}_2\text{O}_3 = 26\%$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 = 29\%$. Il pourrait s'agir d'une lacune de miscibilité (assez restreinte à la température où cristallisaient les micas 0).

2) La plupart des micas I (lattes et bords de cristaux zonés) se situe dans le domaine $20,5 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 23,5$ et ils présentent toujours une zonation avec Al_2O_3 décroissant du cœur vers le bord.

Les compositions (fig. 5c) les plus proches du cœur ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 23\%$) sont ainsi en contact avec le bord du mica 0 ($\text{Al}_2\text{O}_3 26-29\%$). Nous pensons qu'aux températures plus faibles où se sont développés les micas I, le domaine d'immiscibilité entre lépidolite banal et trilithionite s'est élargi à toute la gamme $23-29\%$ et que les lépidolites $\text{Al}_2\text{O}_3 = 24$ à 26 ne se conservaient que de façon métastable à cette température, ce qui expliquerait l'effacement partiel des zones et leur recristallisation plus ou moins poussée dans les bordures du mica 0, alors que le mica I ne présente jamais de marques de modification interne.

Une exception concerne l'échantillon 194. Dans cet échantillon apparaissent des micas du type I en lattes, bords de micas zonés etc. avec des compositions dans la gamme $23 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 25$, $50 < \text{SiO}_2 < 51,20$. On est tenté de mettre en relation l'existence de ces compositions exceptionnelles pour des micas I avec deux autres caractères exceptionnels de cet échantillon.

a) L'existence dans certains micas I de 194 de zonations inverses (avec Al_2O_3 croissant vers la périphérie).

b) L'existence à ce niveau du sondage d'enclaves très nettes, anguleuses, dans le granite de Beauvoir d'un autre granite très analogue à la fois du point de vue granulométrique et minéralogique.

Dans ces conditions, on peut être tenté de reconstituer le phénomène de la façon suivante :

1) Cristallisation en profondeur des micas 0.

2) Mise en place d'une première intrusion de granite type Beauvoir de petite taille plus chaud (?) que le granite de Beauvoir final et cristallisant des micas I dans la gamme $23 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 25$.

3) Mise en place du granite de Beauvoir actuel, plus riche en F et Li que le précédent, cristallisant des micas I dans la gamme $20,5 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 23,5$ remaniant l'intrusion précédente et contaminé par celle-ci.

En faveur de cette interprétation, on peut noter que la seule autre analyse de mica I dans la gamme $23 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 25$ a été trouvée dans l'échantillon 209, le plus proche de 194 parmi les échantillons à notre disposition et lui aussi situé dans la zone de profondeur 190-220 m où ont été observés de nombreux indices de réintrusions.

4. — Les micas du granite des Colettes et des microgranites

Comparaison avec les micas du granite de Beauvoir

4.1. — Nature du problème

Monier (1985) considère que les compositions des micas du microgranite sont « extrêmement proches de celles des micas les plus précoces de l'échantillon du granite de Beauvoir prélevé à proximité » et plus loin il affirme que l'on trouve aujourd'hui la biotite de ces microgranites « totalement recristallisée en amas de zinnwaldite dont la composition est mise en équilibre avec celle des micas primaires du granite de Beauvoir, vraisemblablement sous l'effet de circulations de fluides issus de ce granite de Beauvoir ». L'étude systématique des micas du microgranite nous a montré qu'il n'y a pas identité avec les micas du granite de Beauvoir. Les micas des microgranites peuvent être interprétés comme des solutions solides muscovite-zinnwaldite T. Par ailleurs ils sont plus riches en Mg et plus pauvres en Rb que les micas du granite de Beauvoir, qui englobe ces microgranites.

Nous avons tenté d'obtenir des indications complémentaires sur cette question en examinant si les micas du granite des Colettes, qui forme une intrusion de 2,5 km de diamètre dont Beauvoir n'est qu'un satellite (diamètre 300 m), présentaient ou non une évolution finale vers la zinnwaldite.

4.2. — Les micas du granite des Colettes

Cinq échantillons ont été étudiés, deux de granite des Colettes banal, type Nigon ou Mazet (NM), trois du faciès finement grenu porphyrique dit Croix Lambin (CL). Trois analyses de micas du faciès Nigon ou Mazet et de façon moins typique deux analyses de micas du faciès Croix Lambin sont des zinnwaldites P, mais la plupart des micas sont des biotites et des muscovites.

Ces biotites et muscovites ont des teneurs en fluor remarquablement élevées, comme on peut s'en rendre compte sur le diagramme (F : Al_2O_3) (fig. 13). En fait, il s'agit de biotites et muscovites lithinifères. Les quatre analyses données par Aubert (1966) montrent que la teneur en lithium de ces granites est comprise entre 700 et 1 600 ppm. A. de Rosen (1965) indique des teneurs « moyennes » et « très fortes » respectivement dans les muscovites et les biotites. La table (7) de Foster contient une analyse de protolithionite (8) pratiquement identique aux biotites du granite d'Échassières (tabl. 8).

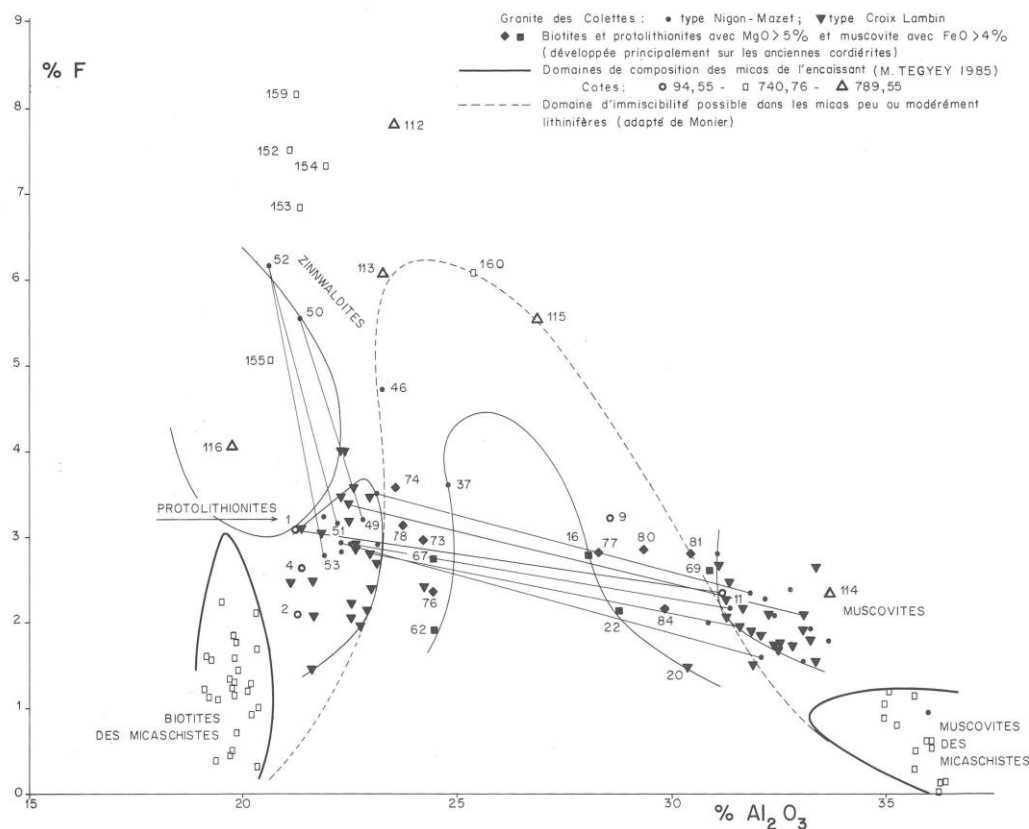


Fig. 13. — Composition (F/Al_2O_3) des micas du granite des Colettes. Pour comparaison on a reporté les compositions des micas des micaschistes encaissants d'après Tegye (1985) : les numéros sont ceux des analyses publiées.

Bivariate distribution of F and Al_2O_3 in micas from the Les Colettes granite.

Composition of the surrounding micaschists as reported by Tegye (1985) have been reported for comparison. Numbers refer to analysis number.

	Foster 8 (7)	16,35 Nigon	16,43 ou	16,48 Mazet	16,49	16,53	16,28 Croix Lambin
SiO ₂	38,00	38,01	37,57	36,25	37,97	38,07	36,91
Al ₂ O ₃	23,63	23,11	22,53	22,28	22,81	22,18	22,43
TiO ₂			1,78	2,22	1,75	2,42	1,99
FeO	20,37	18,68	20,35	20,90	18,37	19,24	20,06
MnO	.24	.32	.19	.28	.21	.22	.32
MgO		3,50	2,63	2,39	2,53	1,95	1,85
Li ₂ O	1,29	(1,70)		(1,10)	(2,10)	(1,10)	(1,70)
K ₂ O	9,40	9,85	9,59	9,58	9,22	9,44	9,80
Na ₂ O	1,08	.20	.37	.38	.29	.28	.19
Rb ₂ O		.30	.54	.32	.50	.59	.52
F	3,80	3,50	2,89	2,82	3,19	3,33	3,38

Tabl. 8. — Composition de biotites (prolithionites) du granite des Colettes.

Les biotites du granite de Croix-Lambin sont en moyenne un peu plus pauvres en Al_2O_3 (18-20 %) et en MgO (1,6 à 1,85 %). Les autres teneurs sont comparables à celles des biotites faciès Nigon ou Mazet, mais les totaux sont plus

bas (96 à 97 % le plus souvent) bien que les analyses aient été effectuées au cours de la même séance de microsonde (ce qui pourrait suggérer des teneurs en Li_2O plus élevées). Il s'agit également de prolithionites.

Un des aspects intéressants est que les lignes de jonction des couples de micas biotite et muscovite associés dans les granites sont parallèles sur les diagrammes ($Al_2O_3 : SiO_2$) et ($Al_2O_3 : F$) (fig. 13 et 14), ce qui permet d'étendre vers les micas fluorés et lithinifères les domaines d'immiscibilité observés entre biotite et muscovites dans les micaschistes encaissants étudiés par M. Tegye (1985).

La fermeture de ce domaine vers les hautes teneurs en Li_2O (et en F) a été mise en évidence expérimentalement pour des compositions simplifiées par G. Monier (1987). L'existence de micas de type zinnwaldite dans certaines enclaves ou schistes au contact immédiat du granite de Beauvoir et dans le granite des Colettes est en accord avec l'extension de ce résultat aux micas réels plus complexes des granites, comme le propose Monier.

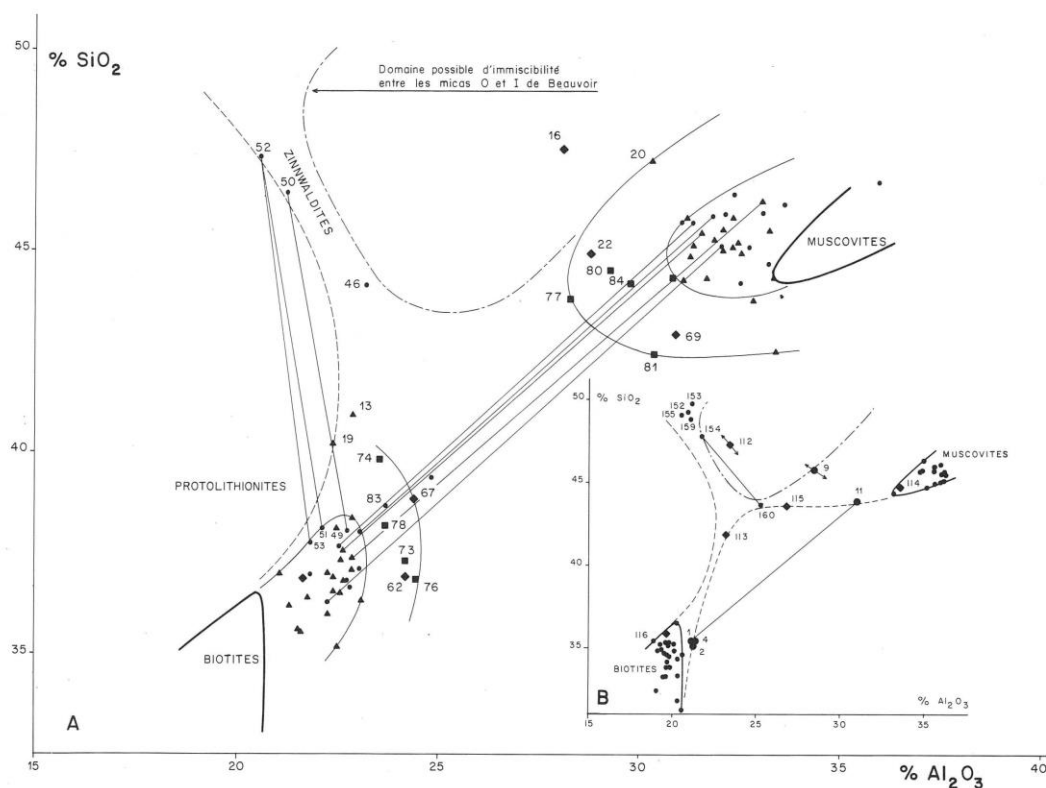


Fig. 14. — Compositions $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ des micas du granite des Colettes (A) en (B) idem pour les micas de l'encaissant du granite de Beauvoir (même origine et légende que pour la fig. 13).
Bivariate distribution of SiO_2 and Al_2O_3 in micas from the Les Colettes granite (A) and micas (B) from the surrounding micaschists. Symbols as in fig. 13.

Dans le granite type Nigon ou Mazet les zinnwaldites 50 et 52 ont été trouvées en association étroite (lamelles alternantes ou bordures de cristaux) avec les protolithionites 49 ou 53. La régularité des lignes de jonction suggère l'existence d'un domaine d'immiscibilité entre protolithionite et zinnwaldite P dans les conditions de fin de cristallisation du granite.

4.3. — Les micas des microgranites de type banal inclus dans le granite de Beauvoir

L'expression « microgranites de type banal » (microgranites dans ce qui suit) désigne ici l'ensemble des microgranites échantillonnés dans le sondage profond à l'exception des échantillons 837 qui, comme on l'a vu en 3.5, ne représentent qu'une variété du magma de Beauvoir.

Tous les micas que nous avons observés dans les microgranites sont des micas blancs. Ces microgranites ne contiennent pas de micas présentant une zonation bien idiomorphe comme le granite de Beauvoir. Ils contiennent cependant plusieurs types morphologiques de micas. On peut distinguer :

1) De grands micas, produit vraisemblablement de la recristallisation de phénocristaux de micas du microgranite. Dans un cas (705.98) l'un de ces micas est une muscovite lithinifère d'aspect homogène. Dans tous les autres cas, on observe soit une association complexe de lamelles, d'orientation et de composition un peu variables, soit plus souvent un mica présentant des zones à biréfringence différentes et des zones ponctuées, souvent organisées en centre et bordure d'aspects différents.

2) Des micas plus petits, mais encore en cristaux bien formés, homogènes en apparence.

3) Des sérícites soit en agrégats, soit dispersées, en particulier sur les feldspaths.

Les sérícites ont la composition de muscovites pures caractérisées par $\text{Al}_2\text{O}_3 > 35,80\%$ et $F < 1,50\%$, semblables aux muscovites II et aux sérícites du granite de Beauvoir. Il n'en sera plus question dans la suite.

Les autres micas présentent des compositions chimiques différentes.

Avant d'entrer dans le détail, trois points précis méritent d'être notés :

1) Les teneurs en MgO ($0,62 < MgO < 1,63$) sont plus élevées que celles des micas du granite de Beauvoir.

2) Les teneurs en Al_2O_3 sont toutes inférieures à 25,5 %.

3) Les teneurs en Rb_2O sont toujours très faibles $0,30 < Rb_2O < 0,80$ % et ces micas ne vérifient pas la relation $Rb_2O : Al_2O_3$ observée dans le granite de Beauvoir.

Ces quelques caractéristiques générales étant précisées, on peut distinguer parmi les micas des microgranites, deux groupes de compositions :

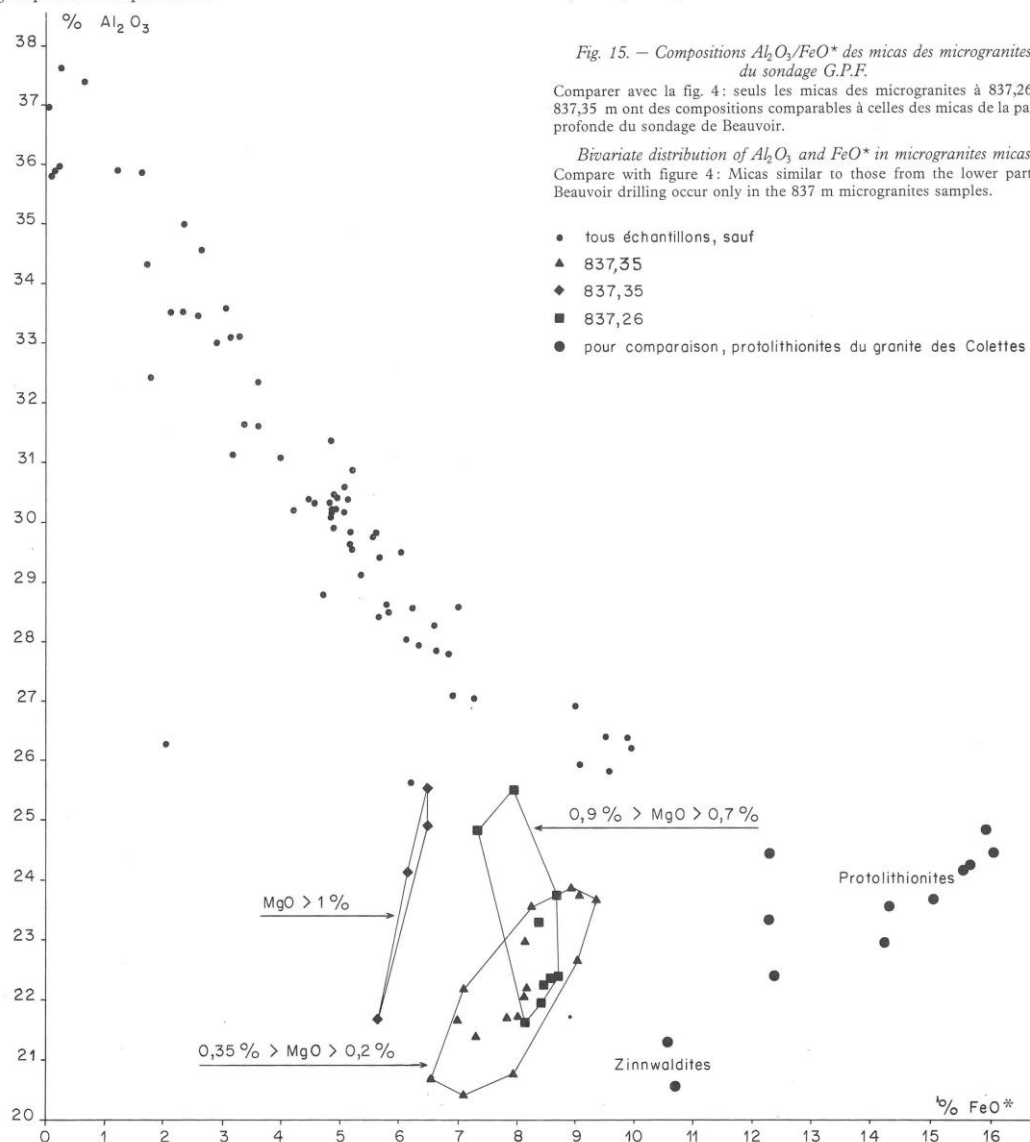
a) Une série continue dont un pôle est une muscovite (lithinifère ?) $Al_2O_3 \sim 34$ % - $SiO_2 \sim 46$ % - $FeO \sim 2$ % - $F \sim 1,5$ à 2 %, et l'autre pôle un mica se rapprochant un peu d'une zinnwaldite, mais sans analogue réel dans la littérature à notre connaissance, dont le type peut être l'analyse 2-11 (705.98) ou l'analyse 16-32 (861-90). $Al_2O_3 \sim 27$ % - $SiO_2 \sim 44$ % - $FeO \sim 7$ % - $F \sim 4,80$ % (tableau 9). Cette série donne lieu à un très bel alignement des points représentatifs sur les diagrammes $(Al_2O_3 : FeO)$ (fig. 15), $(Al_2O_3 : SiO_2)$ (fig. 16), $(Al_2O_3 : F)$ (fig. 17), et même à une corrélation convenable sur les diagrammes $(Al_2O_3 : \text{total}^* \text{ de l'analyse})$ (fig. 18), ou $(F : \text{total}^* \text{ de l'analyse})$ (fig. 19), ce qui suggère

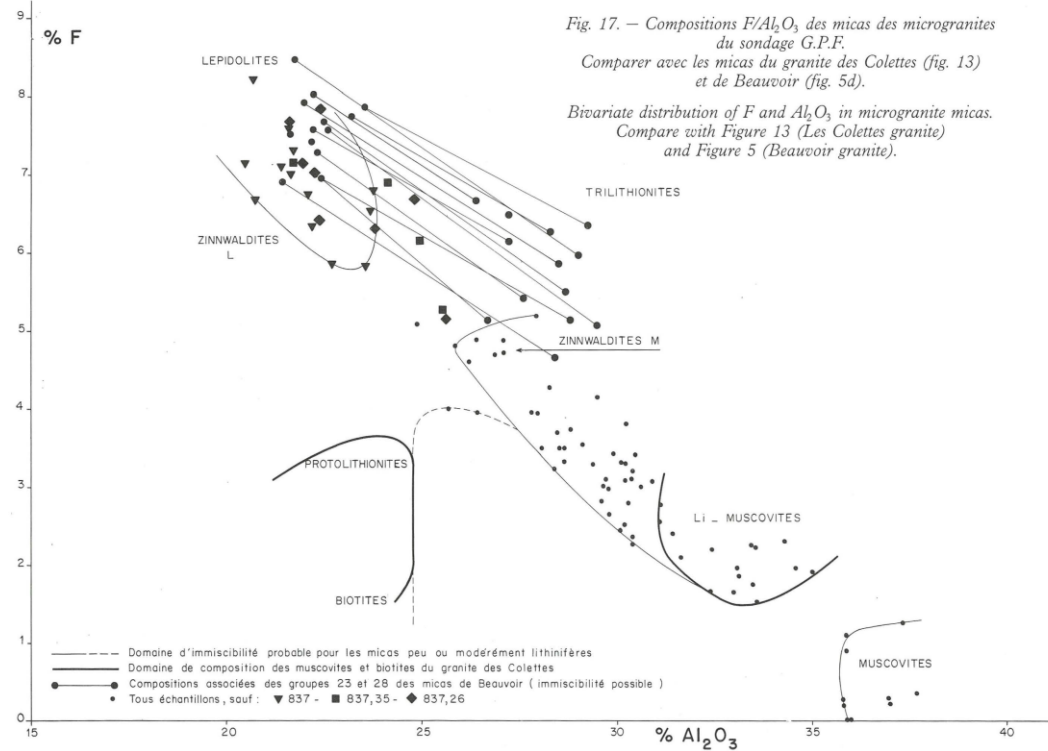
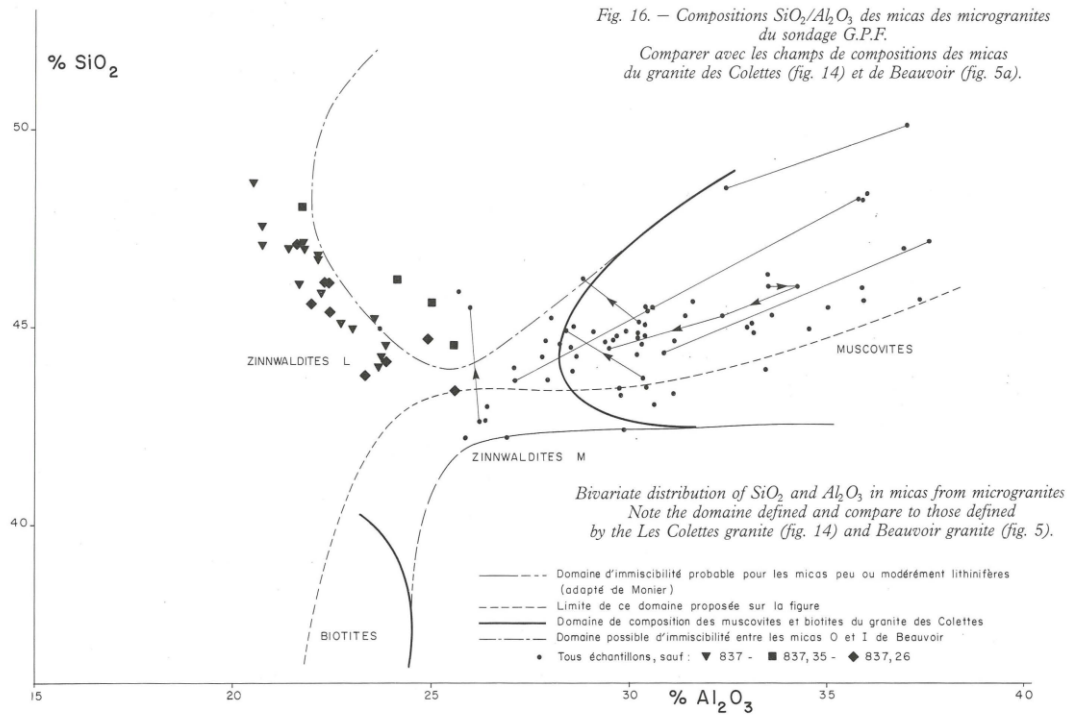
* y compris H_2O calculé

Fig. 15. — Compositions Al_2O_3/FeO^* des micas des microgranites du sondage G.P.F.

Comparer avec la fig. 4: seuls les micas des microgranites à 837,26 et 837,35 m ont des compositions comparables à celles des micas de la partie profonde du sondage de Beauvoir.

Bivariate distribution of Al_2O_3 and FeO^* in microgranites micas. Compare with figure 4: Micas similar to those from the lower part of Beauvoir drilling occur only in the 837 m microgranites samples.





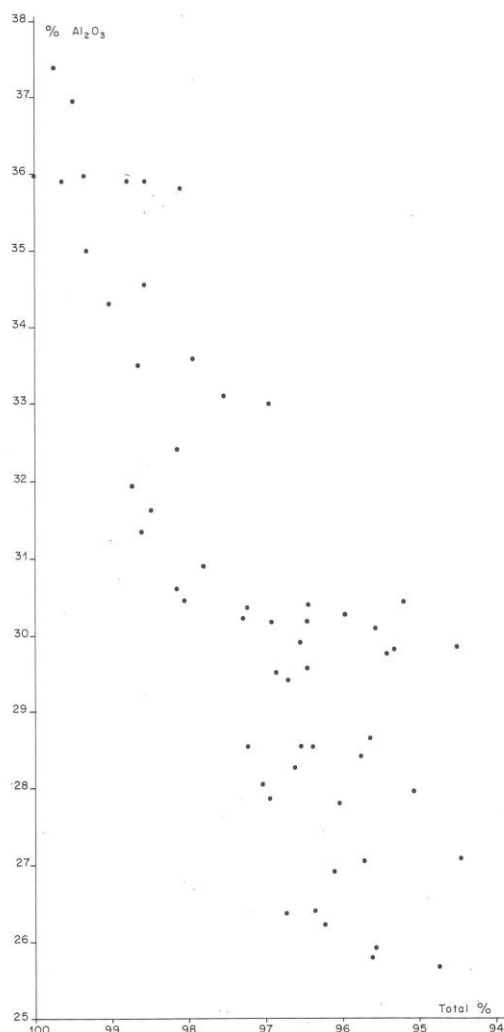


Fig. 18. — Variation de la somme des éléments dosés (à l'exclusion) de Rb_2O , mais H_2O (calculé) compris dans les analyses de micas de microgranites (sauf 837) en fonction de Al_2O_3 .

Variation of Al_2O_3 as a function of the total of the analyses. The total includes all measured elements (except Rb_2O) and the calculated weight % H_2O .

que le lithium croît régulièrement dans cette série de ~1 % à 3,5 % entre les pôles déjà cités.

Il peut être utile de comparer ce type de zinnwaldite à la composition de la zinnwaldite T terme extrême (le plus riche en fer) de la série trillithionite, zinnwaldite T définie à propos du granite de Beauvoir (échantillon 687) (tabl. 9).

n° analyse profondeur	Granite de Beauvoir	Microgranites	
	13,63 687,50	2,11 705,98	16-32 861,90
SiO_2	44,39	43,62	43,94
Al_2O_3	26,41	27,07	27,05
TiO_2	.26	.51	.46
FeO	6,52	6,94	7,25
MnO	.99	.46	.43
MgO	.08	.73	1,17
Li_2O	(4,50)	(4,70)	(3,50)
K_2O	10,44	10,10	10,34
Na_2O	.35	.25	.42
Rb_2O	1.18	(.80)	.78

Tabl. 9. — Zinnwaldites de la série muscovite-zinnwaldite des microgranites.

Aux teneurs en MgO près, ces analyses sont très proches et cette série muscovite-zinnwaldite se raccorde ainsi à la série zinnwaldite T trillithionite du granite de Beauvoir. Par ailleurs, cette série apparaît comme le prolongement vers les hautes teneurs en F (et Li_2O) de la série de composition qui part des muscovites vraies des micaschistes et passe par les muscovites lithiques et fluorées des granites type Nigon ou Mazet et Croix Lambin. Elle dessine le contour de la lacune de miscibilité mise en évidence par G. Monier (1987).

b) Un groupe de micas se distingue de la série précédente et plus exactement de son pôle zinnwalditique par des teneurs en fer plus élevées (entre 9 et 10 % alors que le maxi-

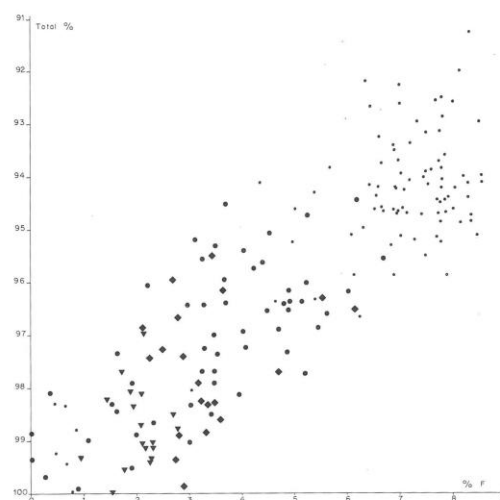


Fig. 19. — Relation entre la teneur en fluor et total de l'analyse (Li_2O et Rb_2O non comptés, mais H_2O compris) dans les micas des granites et microgranites d'Echassières

- ▼ Granite des Colettes : muscovites
- ◆ Granite des Colettes : biotites
- Microgranites (sauf 837)
- Granite de Beauvoir (Toutes les analyses n'ont pas été portées. Celles qui n'ont pas été portées se situant dans le même domaine).

Variation of the sum of all analyzed elements in the analyses as oxide weight % (Rb excluded), H_2O weight % added, as a function of F content. A fraction of the number of Beauvoir granite mica analyses have been plotted, since they all plot in the same compositional field.

maximum dans la série précédente est 7,25 %), pour une teneur en Al_2O_3 à peine plus faible ($\sim 26\%$), SiO_2 nettement plus faible ($\sim 42,5\%$) et des teneurs en fluor très comparables ($\sim 4,8\%$). Le total* des analyses suggère une teneur en Li_2O de l'ordre de 3 %.

Ces micas peuvent, à tous égards, être considérés comme des solutions solides de la zinnwaldite dont ils restent proches et de protolithionites analogues à celles du granite des Colettes, dont les caractéristiques chimiques sont approximativement $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 22,5$ - $\text{SiO}_2 \sim 38\%$ - $\text{FeO} \sim 18-20\%$ - $\text{F} \sim 3\%$. Le total* de ces analyses varie entre 96 et 100 % ce qui correspond à la gamme de teneurs en Li_2O extrêmement vaste pour les micas de ce type de composition mentionnée par Foster (0 à 3,4 % Li_2O). Cependant, les zinnwaldites de cette composition ont des teneurs en fluor de 6 à 7 %, ce qui n'est pas le cas des micas qui nous intéressent dont la teneur maximum est 3,7 %. Dans ces conditions, par comparaison avec les données de Foster, nous pouvons penser que la teneur maximum en Li_2O de ces « biotites » du granite ne dépasse pas 2 %, ce qui justifie que nous les considérons comme protolithionites (les teneurs en fluor étant toujours supérieures à 2,5 % il ne s'agit pas de sidérophyllite). Nous pouvons prendre pour type de ce mica protolithionite la seule analyse de Foster qui présente, semble-t-il, les mêmes caractéristiques (analyse 8 table 7) (tableau 10).

	Foster	2.47	2.49	16.31	16.33	16.34	16.32
	8 (7)	701.71	701.71	861.90	861.90	861.90	861.90
SiO_2	38.00	42.60	43.01	42.65	42.22	42.22	43.94
Al_2O_3	23.63	26.20	26.41	26.37	26.92	25.83	27.05
TiO_2		.09	.06	.90	.96	1.02	.46
FeO	20.37	9.99	9.56	9.92	9.02	9.60	7.25
MnO	.24	.36	.43	.53	.58	.77	.43
MgO		1.71	1.51	1.15	1.07	1.08	1.17
Li_2O	1.29						
K_2O	9.40	10.04	10.05	10.15	10.41	10.16	10.34
Na_2O	1.08	.48	.37	.43	.35	.35	.42
Rb_2O				.60	.76	.82	.78
F	3.80	4.60	3.95	4.88	4.72	4.83	4.87

Tabl. 10. — Micas de la série zinnwaldite-protolithionite dans les microgranites

Ce groupe de micas peut donc être considéré comme une solution solide de 15 % de protolithionite type 8 (7) de Foster dans la zinnwaldite.

4.4. — Solutions solides et immiscibilités dans les micas lithinifères et fluorés Conséquences

Le diagramme (SiO_2 : Al_2O_3) (fig. 5d, 14,16) et le diagramme (F : Al_2O_3) (fig. 13 et 17) permettent de représenter les domaines de composition mis en évidence à Échassières, les lignes de jonction associant des compositions immiscibles. Nous avons ainsi trois séries :

- une série zinnwaldite P-polyolithionite qui est la série prédominante dans le granite de Beauvoir ;
- une série zinnwaldite T-trilithionite dans les zones à biréfringence variable du cœur des micas de Beauvoir, qui se raccorde par une série zinnwaldite T — muscovite développée dans les microgranites du sondage aux muscovites lithinifères des granites type Nigon ou Mazet et Croix-Lambin ;
- une série protolithionite sidérophyllite AM qui est celle des

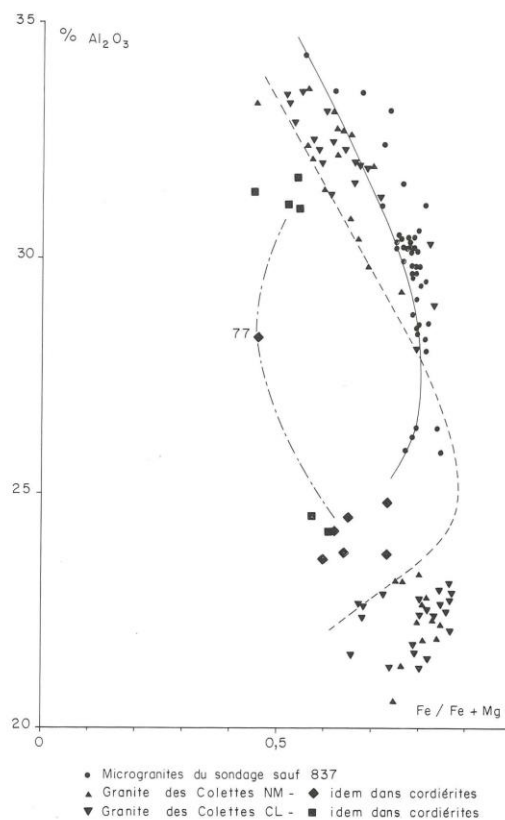


Fig. 20. — Compositions Al_2O_3 : $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ des micas du granite des Colettes et des microgranites.

Les sericites et micas de type II n'ont pas été reportés.

Les lignes continues et tiretées proposent des positions différentes du solvus probable (voir le texte).

Al_2O_3 content of the micas from microgranites and from the Colettes granite as a function of $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$.

Sericite and type II mica analyses have not been reported.

Solid line and dotted line correspond to different solvus outlines (see text).

biotites (s.l.) du granite des Colettes et des schistes encaissants.

Une quatrième série sidérophyllite-cryophyllite n'est pas représentée à Échassières où les micas pauvres en Al_2O_3 ne sont pas stables.

Ce solvus peut être tracé de façon très différente (fig. 13-14) selon que l'on prend ou non en compte les micas développés à l'intérieur des anciennes cordiérites (plus magnésiens que les autres micas des granites des Colettes).

Sur un diagramme Al_2O_3 : $\frac{\text{Fe}}{\text{Fe} + \text{Mg}}$ (fig. 20), les flancs du solvus sont bien définis à condition de ne prendre en compte que les micas développés hors des anciennes cordiérites. Les grands micas développés à l'intérieur des anciennes cordiérites sont représentés par des points à l'intérieur du solvus ainsi défini. Nous pensons que ce solvus n'existe en réalité que pour les associations tamponnées par le quartz. Les micas à

l'intérieur du solvus ont des compositions sans analogues dans la littérature. Les seules analyses comparables sont les analyses 3 et 4 de la table 5 de Foster, intitulée « analyses that do not fit in the aluminous-lithium or ferrous lithium series ».

	Foster		Micas développés dans les cordiérites du granite des Colettes		
	(5)3	(5)4			
SiO ₂	35.6	37.0	36-39	44	44-45
Al ₂ O ₃	20.0	17.5	22-24	28	31-32
FeO*	22.0	17.0	12-17	6	3
MgO	5.2	8.4	3-5	4	1.5-2
Rb ₂ O		1.5	.35-.50	.25	.25-.45
F	.76	3.2	2.5-3.5	2.8	2.5
Li ₂ O	.93	.65			

Ces micas sont pauvres en silice comparés aux zinnwaldites, dont les teneurs en SiO₂ sont de l'ordre de 50 %. Nous pensons qu'ils sont stables dans des conditions déficitaires en silice (ici protégés du contact avec le milieu tamponné par le quartz, par les protolithionites et muscovites lithiques développées en couronnes autour des fantômes de cordiérite).

A titre de comparaison, nous avons porté sur le même diagramme (fig. 20) tous les micas des microgranites. Ils dessinent remarquablement la branche muscovite et le sommet d'un solvus (zinnwaldites T). Ce sommet est plus bas que celui défini par les micas du granite, mais le solvus est élargi du côté des muscovites. Cette différence dans la position et la forme du solvus témoigne de conditions de formations différentes entre microgranites et granite des Colettes, mais la

bonne définition du solvus dans chaque cas peut être considérée comme l'indication que les conditions en question étaient uniformes dans chacun de ces types de roches. Cela peut être le meilleur argument pour la thèse que nous défendons ici, selon laquelle le développement des micas lithiques dans ces roches ne serait pas lié à une métasomatose par les fluides issus du granite de Beauvoir, mais correspondrait à une propriété intrinsèque de ces roches.

4.5. — Teneurs en lithium et fluor, teneurs en titane, magnésium et fer des micas, et typologie

Les micas connus à Échassières s'enrichissent en lithium et fluor (fig. 19) de façon « continue » (aux immiscibilités près) du granite des Colettes aux microgranites et au granite de Beauvoir. Cela suggère qu'il s'agit d'un ensemble de roches d'origine comagmatique, et cela d'autant plus probablement que le magma le moins « évolué » (granite des Colettes type Nigon ou Mazet) est déjà très fluoré et lithinifère.

Les teneurs en titane, magnésium et fer se distribuent au contraire en groupes discrets qui permettent de bien caractériser une série de types de magmas, parmi les granites et microgranites (fig. 21).

A. Granite des Colettes

On note d'abord que les protolithionites du granite des Colettes à deux micas de type Nigon ou Mazet et Croix-Lam-

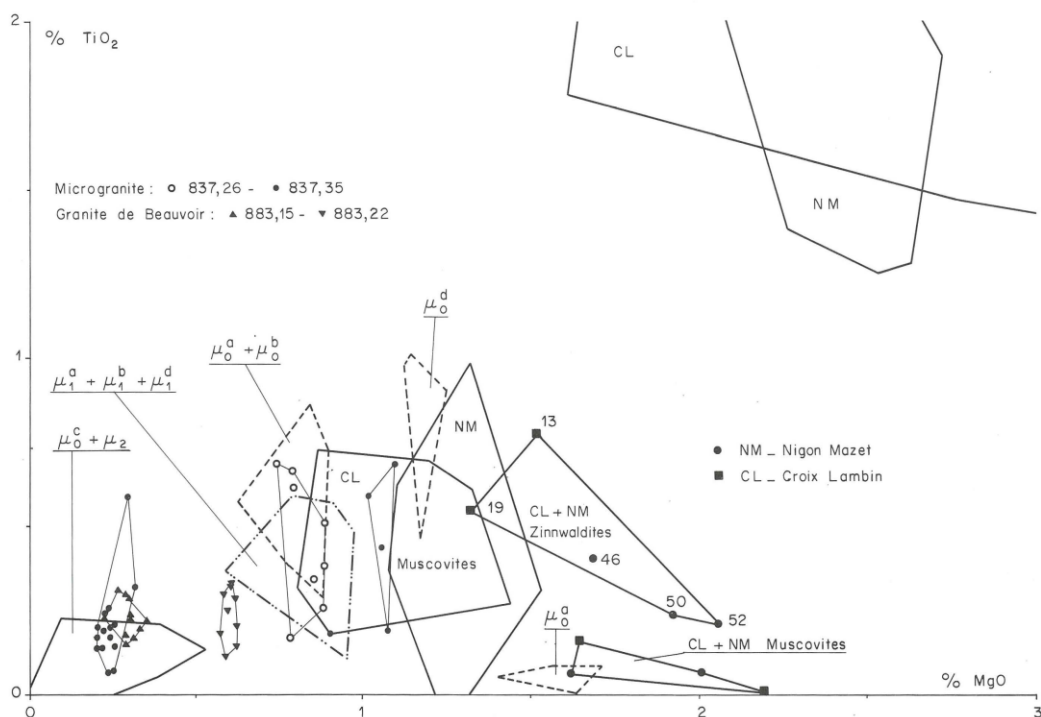


Fig. 21. — Comparaison des teneurs des micas des différents granites et microgranites d'Échassières en TiO₂ et MgO.

Bivariate distribution of TiO₂ and MgO in micas from the various granite and microgranites mentioned in this study.

bin (tableau 8) diffèrent par leurs teneurs en magnésium : 2 à 2,7 % dans le faciès Nigon-Mazet (NM), contre 1,2 à 1,7 % dans le faciès Croix-Lambin (CL) qui apparaît ainsi comme plus évolué. Les teneurs variables en titane (jusqu'à 3 %) suggèrent que certaines de ces protolithionites ont commencé à cristalliser à des stades d'évolution précoce et en profondeur. Certaines montrent une zonation nette dans laquelle le cœur plus magnésien présente des exsolutions de TiO_2 (analyse 16-47) et un bord homogène (16-48). L'évolution se fait dans le sens d'un appauvrissement en MgO du cœur (2,4 %) vers le bord (1,7 %) ce qui tend à justifier le sens d'évolution d'un faciès à l'autre proposé.

Les zinnwaldites du faciès NM (analyses 46, 50 et 52) ont des teneurs en FeO comprises entre 10,5 et 12,3 % et des teneurs en MgO de 1,7 à 2 %. Celles du faciès CL (analyses 13 et 19) ont des teneurs en FeO de 12 à 14 % et, comme les biotites correspondantes, des teneurs en MgO plus faibles 1,3 à 1,5 % que les zinnwaldites du faciès NM.

Pour les muscovites fluorées (et lithinifères), celles de faciès NM ont une gamme de teneurs en fer de 2,70 à 3,80 plus restreinte que celle du faciès CL (2,6 à 6,90 %). Les teneurs en MgO sont dans ce cas encore plus fortes dans NM (1,10 à 1,70) que dans CL (.80 à 1,10 %). Dans tous les cas, les micas de CL sont plus riches en TiO_2 que les micas homologues de NM.

B. Microgranite

Nous ne discuterons pas dans cette section le cas du microgranite de la cote 837 qui sera traité en C avec le granite de Beauvoir, mais seulement celui du microgranite banal.

Les grands micas hétérogènes parfois zonés, visiblement recristallisés ou transformés sont classés comme μ_0 . Les petits micas homogènes tardifs et apparemment en équilibre sont désignés comme μ_1 . Les séricités et autres micas très fins ultra tardifs sont notés μ_2 .

Les micas de 701.71 et 701.90 sont désignés comme μ^a .

Les micas de 705.70 et 705.98 sont désignés comme μ^b .

Les micas de 834.80 sont désignés comme μ^c .

Les micas de 861.50 et 861.90 sont désignés comme μ^d .

Les micas des microgranites sur le diagramme (TiO_2 : MgO) s'organisent en cinq groupes distincts (fig. 21).

L'un de ces groupes, très proches de la muscovite idéale ($\text{MgO} \leq .50$ %, $\text{TiO}_2 \leq .25$ %) comprend deux types de micas : des grands cristaux μ_0 , faiblement zonés et des petits micas μ_2 en éponges, radiés et squelettiques ou en agrégats type sérécite. Leur seul équivalent chimique dans les granites est une sérécite de NM. Les grands micas de cette famille de compositions appartiennent tous au microgranite 834.80 ($= \mu^c$) dans lequel les autres compositions de mica ne sont pas représentées. Ce microgranite est donc tout à fait particulier et unique en son genre. Ces micas présentent parfois une zonation, avec teneurs en TiO_2 plus élevées (.25) au centre qu'au bord ($\sim .10$ %).

Parmi les quatre autres groupes, on peut distinguer les grands micas μ_0 plus ou moins zonés hétérogènes etc. qui représentent des compositions modifiées et les petits micas μ_1 néoformés, apparemment homogènes. Les compositions

des micas μ^a , μ^b et μ^c sont toutes groupées au voisinage des compositions des muscovites du granite type Croix-Lambin, et présentent des teneurs en MgO comprises entre .0 et 0,95 %. Le mica 14-21 considéré comme de greisenisation d'après ses relations texturales, appartient à ce groupe, de même que le mica 16-1, intimement associé à des cristaux de fluorine (et apparemment en équilibre avec ceux-ci).

Les micas μ^d correspondent à la famille des zinnwaldites avec 15 % de protolithionite déjà mentionnée plus haut et sont assez proches des zinnwaldites du granite de Croix-Lambin. Comme celle-ci, ils dérivent probablement d'une transformation de biotites.

Les micas μ^a et μ^b ont des compositions très proches des muscovites des granites. Tous les micas μ^b sont proches des muscovites du granite de Croix-Lambin. Par contre les micas μ^a se répartissent en deux groupes dont l'un coïncide avec le précédent (caractérisé par $\text{MgO} = .60$ à .85 %) et l'autre est proche des muscovites NM, avec $\text{MgO} = 1,40$ à 1,70 %. Nous concluons que les microgranites μ^a contenaient deux populations de muscovites.

C. Granite de Beauvoir et microgranite 837

Le mica du granite de Beauvoir est très pauvre en TiO_2 et en MgO ($\text{TiO}_2 < 0,30$ %, $\text{MgO} \leq 0,20$ % jusqu'à la cote 840). Dans les cinquante derniers mètres apparaissent quelques teneurs un peu plus élevées dans les faciès à grain fin que nous avons interprétés comme précoces ($\text{MgO} = 0,35$ à 883,15 et $\text{MgO} = 0,65$ à 883,22). Le microgranite 837* dont nous avons montré qu'il représentait une variété du magma de Beauvoir présente des teneurs en MgO dans les micas encore plus élevées et comparables à celles des microgranites de type banal (MgO est de l'ordre de 0,80 dans l'échantillon 837,26). L'échantillon 837,35 contient deux variétés de micas présentant des teneurs en MgO très différentes, 0,25 dans le mica banal et 1,10 dans quelques grands cristaux isolés.

D. En conclusion

Les microgranites de type banal ne correspondent pas à un type unique mais à une famille complexe et variée. Leurs micas sont, à l'exception de μ^c proches des zinnwaldites et muscovites des granites type Croix-Lambin et Nigon-Mazet.

Rien ne plaide en faveur d'une influence prépondérante de leur encaissant type Beauvoir sur leur minéralogie actuelle. Primitivement, ils étaient à deux micas comme les granites eux-mêmes, dont ils représentent une variété ayant subi une évolution tardi ou post-magmatique particulièrement intense (disparition totale (?) de la protolithionite).

Le granite de Beauvoir présente quelques faciès, interprétés comme précoces, à micas un peu plus riches en MgO, qui peuvent être considérés comme jalons dans une évolution magmatique

microgranite \rightarrow granite de Beauvoir

* Le filonnet de 25 cm d'épaisseur de ce microgranite porphyrique très frais, montre des contacts sinueux avec le granite de Beauvoir qui l'entoure.

4.6. — Teneurs en Rb_2O dans les micas des microgranites et des granites Conséquences

L'hypothèse que nous venons de faire sur la relation étroite, du point de vue de leur évolution pétrologique et chimique, des microgranites du type banal avec le granite des Colettes et particulièrement le faciès Croix-Lambin prend plus de force lorsqu'on considère les teneurs en Rb_2O . Les teneurs en Rb_2O des micas des microgranites sont, en effet, comprises dans la gamme 0,40 à 0,80, proches par conséquent des teneurs dans les micas du granite des Colettes (20 à 60), mais très différentes de celles des micas du granite de Beauvoir ($> 1,20\%$).

Plus précisément sur le diagramme ($MgO : Rb_2O$) (fig. 22) on observe pour le granite type Nigon-Mazet une lignée assez nette avec décroissance de la teneur moyenne en Rb_2O de 45 à ~ 30 depuis les biotites (protholithionites) jusqu'aux muscovites. Une lignée comparable, mais décalée vers les faibles valeurs de MgO s'observe dans le granite type Croix-Lambin. Une tendance analogue, mais encore plus

décalée vers les faibles teneurs en MgO (et de façon modérée vers les hautes teneurs en Rb_2O) s'observe des zinnwaldites aux muscovites des microgranites.

Les micas du granite de Beauvoir se situent dans un domaine très différent du diagramme, sans aucune composition intermédiaire. Cela est vrai pour les lépidolites et zinnwaldites du granite ordinaire $MgO < 0,09 Rb_2O \geq 1,40$, mais presque au même degré pour les zinnwaldites plus magnésiennes du filon de granite de Beauvoir du fond du sondage (883,15 et 883,22) et du microgranite 837 et pour les micas de la série plus alumineuse zinnwaldite T-trilithionite ($MgO < 0,08 Rb_2O \leq 1,40$).

Il faut noter que les points représentatifs se groupent par type de roche et par type de mica. Ce groupement suggère une absence de modification secondaire des teneurs en Rb_2O . Comme Rb_2O est un élément que les solutions échangent très facilement dans les micas (Lagache et Sabatier, (1973) ; Volfinger, (1976) ; Iiyama, (1979)), nous concluons que, si les échanges postulés par G. Monier, entre le microgranite et le granite de Beauvoir encaissant existent, ils sont limités très probablement à des zones très étroites le long du contact entre les deux roches. Les micas des microgranites n'ont certes pas atteint leur com-

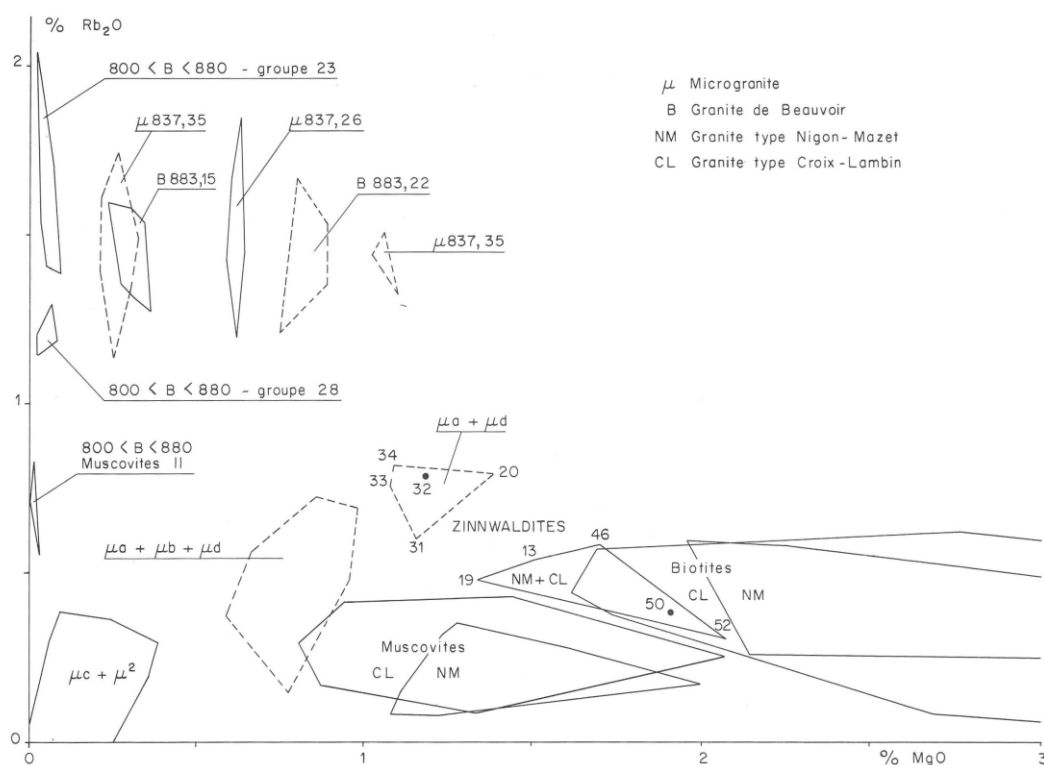


Fig. 22. — Comparaison des teneurs des micas des différents granites et microgranites d'Échassières en Rb_2O/MgO (voir texte pour la symbolique des microgranites).

Bivariate distribution of Rb_2O and MgO in micas from the various granites and microgranites mentioned in this study.

position actuelle au stade magmatique, mais probablement par autométasomatose immédiatement post-magmatique, de même que les zinnwaldites et autres compositions modifiées du granite des Colettes, type Croix-Lambin ou Type Nigon-Mazet.

L'évolution magmatique dans la série granitique, du granite des Colettes type Nigon-Mazet au type Beauvoir (NM \rightarrow CL \rightarrow μ \rightarrow B), se traduit par une croissance régulière de la teneur en Rb_2O dans les micas, bien que Rb_2O ne puisse évidemment plus être considéré comme hygromagmaphile à ce stade, et que le phénomène soit en partie autométasomatique (mais en système fermé) plutôt que magmatique. La corrélation inverse entre Rb_2O et MgO est caractéristique d'une évolution magmatique.

S'il y avait influence métasomatique du milieu encaissant (granite de Beauvoir), on s'attendrait, compte tenu des différences des niveaux de teneurs en Rb_2O (ou des valeurs du rapport Rb/K), à observer une variation importante de Rb_2O entre les micas des divers échantillons pris dans une même masse de microgranite, selon leur proximité par rapport au granite encaissant ou aux veines hypothétiques le long desquelles auraient circulé les solutions et aussi surtout à l'intérieur même des cristaux. Rien de tel n'est observé. Les teneurs sont strictement caractéristiques du type de roche et du mica et ne présentent en aucune manière le type de dispersion spatialement organisé que l'on attend dans un système métasomatique.

D'autres phénomènes que l'évolution magmatique normale ne sont à considérer que dans le cas des analyses qui s'éloignent de la lignée générale NM \rightarrow CL \rightarrow μ \rightarrow B. C'est le cas des muscovites II du granite de Beauvoir dans lesquelles $\text{MgO} \leq 0,03$, mais Rb_2O reste relativement élevé (0,50 à 0,85 %), ce qui peut s'interpréter par l'intervention d'eaux d'origine extérieure au système, mais influencées par le rubidium abondant disponible dans le granite de Beauvoir. Si tel est bien le cas, ce phénomène confirmerait notre hypothèse précédente sur la facilité de remise en mouvement de Rb_2O et, par voie de conséquence, l'indépendance des teneurs en Rb_2O des microgranites de toute influence métasomatique du granite de Beauvoir.

Remarques

1. — La situation des microgranites intermédiaires de type banal entre le granite des Colettes et celui de Beauvoir se manifeste également, semble-t-il, dans les teneurs en Rb_2O des Kfeldspaths bien que le nombre d'analyses soit insuffisant pour le moment.

		Rb_2O
Granite type Croix-Lambin		0, .09
microgranites	701.70 (μa)	.23
	705.98 (μb)	.24
	861.50 (μd)	.36
microgranite	837.85	.36, .50, .51
granite de Beauvoir (partie profonde)	650	.50 à .60

2. — Les compositions des plagioclases (qui présentent souvent dans les microgranites comme dans le granite de Beauvoir une zonation idiomorphe d'origine magmatique, avec CaO décroissant du cœur vers la périphérie) sont en accord avec l'hypothèse précédente. Les domaines de composition sont les suivants (fig. 23).

Granite de Croix-Lambin	CaO 1.05 – 1.20	K_2O 2.6 – .31	Remarques
Microgranite	1.20 .50 (cœurs) – .03	2.3 .90 – .09	— un grand cristal idiomorphe dans 837,35. — cas général
Granite de Beauvoir	.28 – .01	.26 – .06	

On remarque que les compositions des plagioclases du granite de Beauvoir sont très proches de celles des plagioclases de microgranites de type banal, légèrement décalées vers les faibles teneurs en CaO , comme on pouvait s'y attendre.

L'existence dans le microgranite 837,35 d'un phénocrystal relativement calcique, d'une composition pratiquement identique à celle des plagioclases, du granite de type CL est un fait important, à rapprocher de ce qui a été noté plus haut (IV.6.) sur l'existence de deux micas dont l'un relativement magnésien dans cet échantillon. Ces faits, compte tenu du caractère par ailleurs très proche du granite de Beauvoir de ce

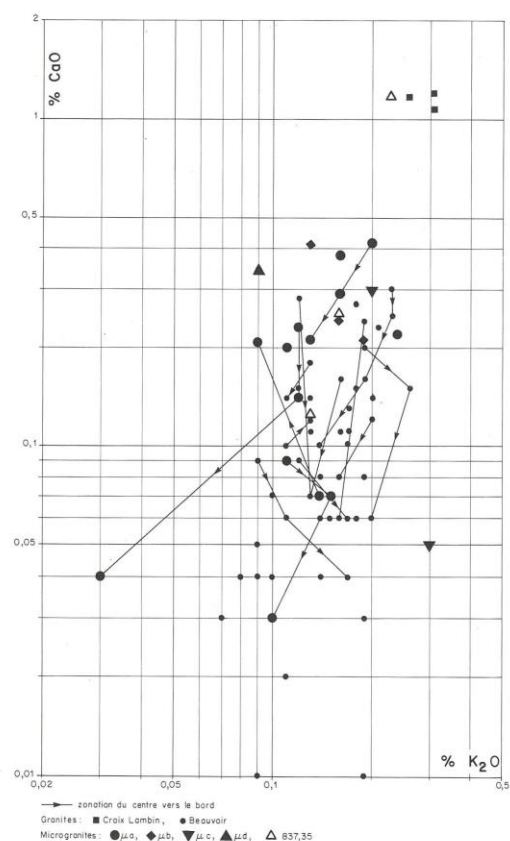
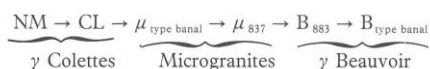


Fig. 23. — Composition des plagioclases des granites et microgranites d'Échassières.

Plagioclase compositions from the Échassières granites and microgranites in terms of CaO vs K_2O contents.

microgranite, suggèrent soit que le magma de Beauvoir dérive du magma des Colettes, soit qu'il y a eu des phénomènes de mélange entre ces deux types de magmas.

Dans ces conditions, il paraît justifié de compléter le schéma de l'évolution magmatique d'ensemble des granites d'Échassières de la façon suivante :



5. — Conclusions : les variations de composition des micas du granite d'Échassières et leur signification.

1. — Les micas de Beauvoir sont des lépidolites-zinnwaldites contenant entre 10 et 20 % de muscovite dans leur formule structurale, ce qui correspond probablement à une saturation du système par la topaze dès le stade magmatique.

Certains des micas, à tous les niveaux, de l'intrusion, montrent une zonation reconnaissable au microscope par la présence d'un cœur non ponctué, d'une zone interne idiomorphe finement ponctué de granules opaques, d'une zone mince à variation rapide de biréfringence et d'indice de réfraction et d'une large bordure non idiomorphe homogène à l'observation microscopique. Cette zonation est caractérisée par l'évolution du titane qui passe par un maximum dans la zone ponctué (avec exsolution de granules TiO_2) et celle de l'alumine qui passe par un maximum dans la zone plus externe à variations rapides de biréfringence. Ces variations correspondent à la cristallisation alternante à partir du magma d'un lépidolite moyen et de trilithionite. Une immiscibilité existait probablement entre ces deux types de composition au stade magmatique. Des micas proches de la trilithionite avec des teneurs en fer s'élevant jusqu'à 6,5 % (compositions jamais observées jusqu'à ce jour) ont été rencontrés dans ces circonstances.

Des modifications partielles de cette zonation interne sont constatées sur presque tous les micas étudiés conduisant à un effacement apparent des zones au microscope. Leur effet sur la composition déterminée à la microsonde reste modéré, limité à Si, Al, F.

Le passage des zones internes idiomorphes aux zones externes est caractérisé par une brutale chute de la teneur en TiO_2 (de 0,15 % à < 0,05 %) et surtout de Al_2O_3 , avec probablement apparition d'un phénomène d'immiscibilité, ce qui pourrait s'expliquer par une forte chute de pression fluide lors de la mise en place du granite au niveau d'intrusion actuel. Aucune modification n'est observée dans les zones externes. La teneur en alumine décroît de 22 à 20 %, ce qui correspond à un enrichissement en pôle polyolithionite (et en lithium). Une génération tardive de lépidolite en petits cristaux isolés, en gerbes, etc., présente des teneurs en alumine s'abaissant jusqu'à 17 % et correspond à des micas très proches du pôle polyolithionite. L'évolution des compositions des cœurs des micas, avec enrichissement en aluminium et appauvrissement relatif en lithium au stade magmatique, peut être mise en parallèle avec l'organisation fréquente des topazes I, dans les roches où ces minéraux sont abondants, en

« couronnes » autour des cristaux d'amblygonite. On peut penser que l'amblygonite est un peu plus précoce encore que la topaze. Au stade où les zones externes du mica se développent en s'enrichissant en polyolithionite, on peut penser que la topaze cesse de cristalliser. Elle ne réapparaît (topaze II) que dans un stade tardif de corrosion des micas (et autres minéraux alumineux) par des fluides encore riches en fluor mais pauvres en lithium ; à ce stade les micas sont corrodés. Les fluides s'appauvrissant en fluor, on passe en discontinuité complète au stade final de développement des muscovites faiblement lithinifères en surcroissance sur les lépidolites.

2. — Du haut vers le bas du sondage, on observe dans les micas une augmentation des teneurs en fer, manganèse et magnésium. Les teneurs en fer, presque nulles dans les 350 premiers mètres (micas de la série polyolithionite-trilithionite) atteignent 9 % FeO à la base du sondage (zinnwaldites typiques correspondant à la composition moyenne des zinnwaldites réelles indiquée par Hey (in Foster, 1960).

La teneur en Rb_2O des micas décroît du haut en bas du sondage et dans ce cas il s'agit d'une *variation parfaitement régulière à travers tout le granite*. Cette régularité dans les variations de composition des micas suggère qu'il y a eu au moins une période finale où l'ensemble du granite était simultanément encore à l'état magmatique. D'une manière générale d'ailleurs, toutes les variations de compositions des micas apparaissent comme continues sur l'ensemble de la masse granitique. Cependant les teneurs en fer, manganèse, magnésium et titane présentent des oscillations de teneur de faible longueur d'onde (environ 100 m), pour lesquelles les maxima et les minima se rencontrent aux mêmes profondeurs, sauf en ce qui concerne le fer dont les oscillations paraissent plus indépendantes.

La principale différence entre la partie supérieure du sondage (faciès B1) et les parties profondes (B2 et B3), mises à part les variations de compositions des micas, est la taille des cœurs idiomorphes de cristallisation précoce. Ces cœurs sont très petits dans la partie haute du sondage, ce qui suggère que la fraction cristallisée de cette partie du granite au moment de la mise en place était très faible, alors qu'elle pourrait être relativement importante dans les parties plus profondes (B2 et B3).

D'une manière générale, l'existence de roches apparaissant comme des litages magmatiques et formées essentiellement de lépidolite-zinnwaldites, ou de K-feldspath, ou d'albite, mais dans lesquelles malgré tout, l'ensemble des minéraux du granite est présent, avec dans le détail toutes les relations texturales « magmatiques » habituelles, est considéré comme l'indication d'un caractère très fluide de ce magma de Beauvoir lors de sa mise en place. Ce magma n'était pas dans son ensemble à un stade très proche d'un « eutectique ». Ce stade final est représenté par de rares passées à caractère pegmatitique, avec textures particulières (graphiques) et minéraux un peu exceptionnels tels que le Beryl, comme on en rencontre sporadiquement dans le sondage.

3. — Le granite à cordiérite et deux micas des Colettes, contigu au granite de Beauvoir, est lui aussi relativement riche en lithium et fluor. C'est un granite à deux micas conte-

nant *protolithionite* et *muscovite lithinifère*. Exceptionnellement de la zinnwaldite apparaît à l'extrême bord de certains cristaux de protolithionite.

Les *microgranites* de type banal que l'on rencontre comme enclaves ou associés aux septa de micaschistes vers la base du granite de Beauvoir, contiennent des micas plus riches en lithium que les micas ordinaires du granite des Colettes. Ces microgranites ne sont pas des équivalents de semi-profondeur du granite des Colettes transformés secondairement par des phénomènes métasomatiques associés au granite de Beauvoir. Ils ont en effet des micas de compositions définies qui leur sont propres et qui ne montrent pas de variations régulièrement organisées en zones en s'éloignant du granite de Beauvoir. Ces micas appartiennent à une série transitionnelle entre muscovites riches en lithium et zinnwaldites très alumineuses.

Les teneurs en MgO , TiO_2 et Rb_2O des micas dans le granite des Colettes, dans les microgranites de type banal et dans le granite de Beauvoir ont des domaines de variations restreints dans chaque type de roche et sont très particulières. On peut en conclure que ces trois types de « granites » dérivent de magmas dont l'origine en profondeur était liée à un même environnement, plus ou moins simultanés et peut-être même co-génétiques. Nous pouvons donc les considérer comme appartenant à une même série magmatique.

4. — L'étude extensive des compositions des micas lithinifères dans ces divers granites suggère l'existence de trois *solvus* à l'intérieur de leur domaine de compositions théoriquement possibles :

— dans les micas riches en lithium de composition lépidolite-zinnwaldite, une immiscibilité probable à basse pression de fluide, entre des compositions relativement riches en polyolithionite et relativement riches en trilithionite ;

— un domaine d'immiscibilité entre des compositions du type protolithionite et du type zinnwaldite pauvre en alumine ;

— dans les micas pauvres en lithium, une lacune de miscibilité analogue à celle proposée par Monier (1987) ; les microgranites en particulier présentent des micas dont les compositions dessinent remarquablement le sommet de ce solvus.

Ce dernier type d'immiscibilité est défini en présence de quartz. A l'intérieur des anciens cristaux de cordiérite, et séparés du quartz par une couronne assez large de muscovite lithinifère et de protolithionite, apparaissent des micas de compositions inhabituelles, pauvres en silice et qui constituent une série sans lacune de miscibilité ou avec une lacune très restreinte.

5. — Au cours de cet examen systématique des compositions des micas trouvés dans les granites et microgranites d'Échassières nous avons mis en évidence des séries de solutions solides étendues, mais aussi des zones vacantes dans l'espace des compositions qui nous suggèrent l'existence de lacunes de miscibilité. Certains de ces domaines étaient déjà connus et leur position a été précisée, d'autres ne l'étaient pas. L'étude des variations de composition de ces micas, et singulièrement les variations des teneurs en éléments mineurs, nous a permis par leur régularité de mettre en doute une interprétation métasomatique des évolutions. Nous avons préféré l'interprétation selon laquelle les compositions observées ont une origine essentiellement magmatique. Le

type le plus courant de microgranite représente un magma différent de celui qui est à l'origine du granite de Beauvoir - moins évolué si les teneurs en lithium (élevées) et en magnésium (basses) sont considérées comme des paramètres capables de suivre l'évolution d'une série granitique de ce type. Le magma microgranitique pourrait représenter un jalon dans une évolution encore hypothétique qui conduirait du granite des Colettes au granite de Beauvoir.

Remerciements

Je remercie M. A. Autran et M^{me} D. Velde pour leur aide et leurs suggestions concernant ce travail.

Références bibliographiques

AUBERT G. (1969). — Les coupoles granitiques de Montebraz et d'Échassières (Massif central français) et la genèse de leurs minéralisations en étain, tungstène, lithium et béryllium. Mém. BRGM n° 46, 345 p.

AUTRAN A., BURNOL L. (1985). — Présentation synthétique des résultats du log lithologique du forage. In Programme GPF, thème 8, Forages Échassières n° 1, résultats préliminaires. Documents BRGM n° 100, pp. 22-38.

BURNOL L. (1974). — Géochimie du béryllium et types de concentration dans les leucogranites du Massif central français. Mém. BRGM n° 85, 169 p.

BURNOL L. (1985). — Premières données analytiques obtenues sur le forage GPF Échassières n° 1. Documents BRGM n° 100, pp. 128-136.

CANTAGREL J.M. (1963). — La mine de wolframite des Montmins et son cadre géologique. Thèse 3^e cycle, Clermont-Ferrand.

DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMANN J. (1962). — Rock forming minerals.

DELLIAUX A. (1986). — Pétrographie du granite de Beauvoir (Échassières, Allier). D.E.A. Paris.

EUGSTER H.P. (1985). — Granitic and hydrothermal ore deposits : a geochemical framework. *Min. Mag.*, **49**, pp. 7-23.

FOSTER M. (1960). — Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *Geol. Survey Prof. Paper*, 354-B.

FOSTER M. (1960). — Interpretations of the compositions of lithium micas. *Geol. Survey, Prof. Paper*, 354-E.

IYAMA J.T. (1979). — Trace elements distribution in rock-forming silicates. The alkali and alkaline earths. In : Origin and distribution of the element, L.H. Ahrens Ed., pp. 161-174.

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.

KOSAKEVITCH A. (1985). — Mise au point sur l'état des connaissances de la minéralisation en Li, Sn, Ta, Nb et U du granite de Beauvoir. Document BRGM n° 100, pp. 94-102.

LAGACHE M., SABATIER G. (1973). — La distribution des éléments Na, K, Rb et Cs à l'état de trace entre feldspaths alcalins et solutions hydrothermales à 650 °C, 1 kbar : données expérimentales et interprétation thermodynamique. *Géochim. Cosmochim. Acta*, **37**, 2617.

- LAMEYRE J. (1966). — Leucogranites et muscovitisation dans le Massif central français. Thèse Clermont-Ferrand.
- MONIER G. (1987). — Cristallochimie des micas des leucogranites. Nouvelles données expérimentales et applications pétrologiques. Mémoire CREGU n° 14.
- MONIER G., TEGYEV M. (1985). — Étude pétrographique préliminaire. In programme GPF, thème 8, Forage Échassières n° 1, résultats préliminaires. Documents BRGM n° 100, pp. 41-93.
- MUNOZ J.L. (1968). — Physical properties of synthetic lepidolites. *Am. Min.*, **53**, pp. 1490-1512.
- MUNOZ J.L. (1971). — Hydrothermal stability relations of synthetic lepidolite. *Am. Min.*, **56**, pp. 2069-2087.
- NEMECJ. von D. (1983). — Zinnwaldit in moldanubischen Lithium-Pegmatiten. *Chem. Erde*, **42**, pp. 197-204.
- PAGEL M. (1982). — The mineralogy and geochemistry of uranium, thorium and rare elements in two radioactive granites of the Vosges, France. *Min. Mag.*, **46**, pp. 149-161.
- PUYAU V. (1987). — Pétrographie et Géochimie des aplopegmatites hercyniennes de Vila Real (Nord Portugal) et de leurs micas. D.E.A. Paris.
- RAGUIN E. (1945). — Le massif des Montmins et ses filons métallifères. *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, **45**, pp. 127-134.
- RAIMBAULT L. (1985). — Étude préliminaire des terres rares dans le granite de Beauvoir. Document BRGM n° 100, pp. 125-131.
- RIEDER M. (1968). — Zinnwaldite: octahedral ordering in lithium-iron micas. *Science*, **160**, pp. 1338-1340.
- RIEDER M. (1970). — Chemical composition and physical properties of lithium-iron micas from Krusné Hory M^{ts} (Erzgebirge). Part A. Chemical composition. *Contr. Mineral. Petrol.*, **27**, pp. 131-158.
- RIEDER M. (1971). — Stability and physical properties of synthetic lithium-iron micas. *Am. Min.*, **56**, pp. 256-280.
- ROSEN A. de (1965). — Contribution à l'étude géologique du massif granitique des Colettes, de ses minéralisations et de ses altérations. Thèse 3^e cycle, Paris.
- VOLFINGER M. (1974). — Effet de la composition des micas trioc-taédriques sur les distributions de Rb et Cs à l'état de traces. *Earth Plan. Sci. Let.*, **24**, 299 p.
- VOLFINGER M. (1975 a). — Contribution à l'étude expérimentale des distributions d'éléments alcalins en traces entre un feldspath potassique, des micas, et une solution hydrothermale. Thèse d'État, Paris VI.
- VOLFINGER M. (1975 b). — Effet de la composition des micas dioc-taédriques sur les distributions des éléments alcalins en traces. *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr.*, **98**, pp. 49-52.
- VOLFINGER M. (1976). — Effet de la température sur la distribution de Na, Rb et Cs entre la sanidine, la muscovite, la phlogopite et une solution hydrothermale sous une pression de 1 Kbar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**, pp. 267-282.
- VOLFINGER M., ROBERT J.L. (1980). — Structural control of the distribution of trace elements between silicates and hydrothermal solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **44**, pp. 1455-1461.
- VOLFINGER M., ROBERT J.L., VIELZEUF D., NEIVA A.M.R. (1985). — Structural control of the chlorine content of OH — bearing silicates (micas and amphiboles). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, pp. 37-48.
- WAGNER C., VELDE D., MOKHTARI A. (1987). — Sector zoned phlogopites in igneous rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **96**, pp. 186-191.