

Relations de phase des granites de Beauvoir à 1 et 3 kbar en conditions de saturation en H₂O

Michel Pichavant*, Muriel Boher**,
Jean-François Stenger**, Mohamed Aïssa***
et Bernard Charoy***

Mots-clés : Expérience, Fusion, Cristallisation, Granite (Granite Beauvoir) Diagramme équilibre

Allier

Résumé

Des expériences de fusion et de cristallisation ont été effectuées sur deux échantillons représentatifs des faciès B 1 et B 2 des granites de Beauvoir provenant du sondage GPF Echassières n° 1, entre 500 et 750 °C, de 1 à 3 kbar et en conditions de saturation en H₂O. Les températures solidus (expériences de fusion) sont très basses (faciès B 1 : 575 °C à 1 kbar, 555 °C à 3 kbar ; faciès B 2 : 585 °C à 1 kbar, 575 °C à 3 kbar) et dépendent peu de P_{H₂O}. Ces températures anormalement basses pour des compositions granitiques sont attribuées à la présence de F et Li₂O (respectivement 2.39 et 1.28 % poids, faciès B 1, 1.77 et 0.71 % poids, faciès B 2). La topaze est la phase liquidus dans les deux types d'expériences. Sa cristallisation est proche de 700 °C à 1 kbar pour les deux faciès. Le domaine de stabilité de la lépidolite dépend de sa composition et s'élargit de 1 à 3 kbar. Parmi les phases cardinales, le quartz disparaît en dernier dans les expériences de fusion tandis que, dans les expériences de cristallisation, c'est le plagioclase qui apparaît en premier. Ceci démontre l'existence de problèmes cinétiques dans les deux types d'expériences. Le feldspath potassique est la dernière phase cardinale à cristalliser. Bien que variable, la composition des feldspaths déterminée dans trois expériences de cristallisation est conforme à celle attendue à basse température pour des compositions de liquide faiblement calciques. La composition de ces plagioclases et feldspaths potassiques, proche de l'équilibre à 600 °C, contraste avec celle des feldspaths des granites de départ. Les résultats expérimentaux et les compositions des éléments majeurs suggèrent que les granites de Beauvoir sont les produits de cristallisation de liquides résiduels enrichis en F, Li, P, Rb. Toutefois, leurs caractères pétrographiques et géochimiques ne peuvent s'expliquer uniquement par des processus magmatiques.

Abstract

*Phase relations of the Beauvoir granites
between 1 and 3 kbar under H₂O-saturated conditions*

Melting and crystallization experiments have been carried out between 500 and 750 °C, 1 and 3 kbar (H₂O-saturated conditions), on two representative samples of the B 1 and B 2 Beauvoir granites from the GPF Echassières n°1 drill hole. These granites are characterized by unusual compositions for granitic rocks. Both are felsic, peraluminous and F and Li-rich. Each rock was ground and the powders (grain size ~ 50 μm) used as starting products for the melting experiments. For the crystallization experiments (mostly 1 kbar runs), glasses were synthesized at 800 °C, 1 kbar from each powder. The solidus temperatures (determined from melting experiments) are very low (B 1 : 575 °C, 1 kbar, 555 °C, 3 kbar ; B 2 : 585 °C, 1 kbar, 575 °C, 3 kbar) and do not largely depend on P_{H₂O}. These low solidus temperatures for granitic compositions are attributed to the presence of F and Li₂O (respectively 2.39 and 1.28 wt% in B 1, 1.77 and 0.71 wt% in B 2). Topaz is the liquidus phase in both type of experiments. It crystallizes close to 700 °C at 1 kbar for both samples. The stability of lepidolite depends on its composition, which is Fe-rich in B 2 but nearly totally Fe-free in B 1. At 1 kbar, lepidolite is the last phase in the crystallization sequence. However, the lepidolite stability field widens with pressure from 1 to 3 kbar. Among quartz and feldspar phases, quartz is the last phase to disappear in the melting experiments for both samples. However, it is preceded by plagioclase in the crystallization experiments with B 1. This demonstrates kinetic problems in both types of experiments (slow melting kinetics of quartz in this temperature range, possible disequilibrium melting of feldspar phases and supercooling in the crystallization experiments). However, both types of experiments show K-feldspar to be the last (among these three phases) in the crystallization sequence. The composition of feldspars has been determined in three crystallization experiments at 600 °C. Although somewhat variable, the coexisting plagioclases and K-feldspars (sample B 2) have compositions close to equilibrium at this temperature. Plagioclase compositions (up to 3.5 mole % An) conform with that expected for low temperature, Ca-poor liquids. However, the composition of the experimental feldspars is in contrast with that of the starting products. Experimental results and major element compositions strongly support the contention that the Beauvoir granites represent the products of crystallization of residual granitic liquids enriched in F, Li, P, Rb. However, all their present-day petrographical and geochemical characters cannot be explained by purely magmatic processes.

1 Centre de recherches pétrographiques et géochimiques BP 20, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex,
2 Université de Nancy I, BP 239, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex,
3 École nationale supérieure de géologie, BP 452, 54000 Nancy Cedex.

Introduction

Cet article présente les résultats complets des expériences de fusion ainsi que les résultats *partiels* des expériences de recristallisation réalisées à 1 et 3 kbar sur deux échantillons (B 1 et B 2) des granites de Beauvoir provenant du sondage GPF Echassières n°1. Le but de ces expériences est de répondre aux questions suivantes : (1) Quelle est la gamme de température pendant la cristallisation des magmas de Beauvoir ? (2) Quelle est leur course de cristallisation ? (3) Les différents granites de Beauvoir sont-ils comagmatiques ? (4) Peut-on faire la part des processus postmagmatiques dans leur évolution ?

Les expériences présentées dans cet article ont toutes été conduites en condition de saturation en H₂O. Cet *a priori* se justifie du point de vue expérimental car la détermination des relations de phases saturées en H₂O constitue un préalable indispensable dans les systèmes granitiques (Tuttle et Bowen, 1958). Il existe des données expérimentales sur des compositions granitiques *synthétiques* riches en F et Li (Manning, 1981 ; Martin, 1983). Cependant, on ne dispose actuellement que de très peu de données expérimentales équivalentes sur des compositions granitiques *naturelles* (Kovalenko, 1979 ; Weidner et Martin, 1987) analogues à celles des granites de Beauvoir. En effet, ce type de granite est généralement fortement transformé au cours des stades d'altération postmagmatique ce qui constitue un handicap irrémédiable pour ce genre d'étude expérimentale. De ce point de vue, le sondage GPF Echassières n°1 a fourni des échantillons exploitables et représentatifs des différents stades d'évolution des granites de Beauvoir.

Méthodes expérimentales

1. — Produits de départ

Un échantillon d'une quinzaine de cm de chaque faciès B 1 (profondeur : 278,20-279,95 m) et B 2 (profondeur : 606,05-606,95 m) a été sélectionné parmi les carottes du sondage disponibles (Cuney *et al.*, 1986). Un premier broyage a été effectué sur chaque échantillon (granulométrie de 40 à 100 μ m). Une fraction du mélange obtenu a été ensuite broyée à la main et éluée. La granulométrie de chaque mélange est ainsi rendue homogène et voisine de 50 μ m. Chaque mélange a été analysé par voie humide (tabl. 1). Les résultats sont en bon accord avec les données des éléments majeurs sur les faciès du sondage (Raimbault et Burnol, 1985). Des différences significatives apparaissent entre les deux faciès : le faciès B 1 est chimiquement plus évolué que le faciès B 2. Les compositions modales des échantillons de départ sont comprises dans les fourchettes données par Monier *et al.* (1985) pour l'ensemble des faciès : quartz (15-25 % vol.), albite (40-70 % vol.), feldspath potassique (5-15 % vol.), lépidolite (10-25 % vol.), topaze (1-5 % vol.), avec une augmentation des proportions modales du quartz, du feldspath potassique et de la topaze et une diminution de celles de l'albite et surtout de la lépidolite avec la profondeur. Les analyses des phases majeures à la microsonde électronique sont en bon accord avec les résultats obtenus par Monier *et al.* (1985). Mis à part la lépidolite, caractérisée dans le

	B1 (278.20- 279.95m)	B2 (606.05- 606.95m)
SiO ₂	69,04	71,62
Al ₂ O ₃	16,72	15,79
Fe ₂ O ₃	0,05	0,04
FeO	0,12	0,47
MnO	0,03	0,10
MgO	0,015	0,007
CaO	0,22	0,19
Na ₂ O	5,11	4,52
K ₂ O	3,17	3,84
TiO ₂	0,03	0,02
P ₂ O ₅	1,50	0,95
Li ₂ O	1,28	0,71
F	2,39	1,77
CO ₂	0,03	0,03
H ₂ O+ } H ₂ O- }	0,40	0,23
Total	100,11	100,29
O = F	1,01	0,74
Total	99,10	99,55

Analyses par voie humide, Laboratoire de Chimie, CRPG.

Tabl. 1. — Composition chimique des échantillons de départ.

faciès B 1 par des teneurs basses en Fe (FeO_t = 0,7 % max, Monier *et al.*, 1985), élevées en F et Si, et dans le faciès B 2 par des teneurs élevées en Fe (FeO_t = 8,7 % max, Monier *et al.*, 1985), plus basses en F et Si, il n'y a pas de variation marquée de la composition des phases majeures entre les deux faciès. Les moyennes des analyses de feldspaths sont reportées tableau 5. L'interférence entre les raies Si et Rb pose un problème analytique pour le feldspath potassique.

Pour les expériences de fusion, on a utilisé directement comme produits de départ les deux mélanges obtenus après la deuxième étape de broyage. Des spectres RX ont été réalisés sur ces deux mélanges ainsi que, pour chaque faciès, sur des assemblages quartz-feldspaths et topazes séparés. Ces spectres ont servi de témoins pour l'interprétation des expériences de fusion.

Pour les expériences de cristallisation, un verre a été synthétisé pour chaque faciès à partir des mélanges utilisés dans les expériences de fusion. Deux fusions, chacune de 4 à 5 jours à 800 °C, 1 kbar ont été effectuées pour chaque échantillon de façon à améliorer l'homogénéité du verre. La première fusion a lieu en présence de 5 % d'H₂O. Après broyage, la deuxième fusion est réalisée sans ajouter d'H₂O. Le verre est ensuite broyé une deuxième fois et la poudre obtenue (granulométrie ~ 50 μ m) utilisée pour les expériences de cristallisation.

2. — Expériences

Les expériences ont été réalisées dans des autoclaves à joint froid en René 41 de type Tuttle, fonctionnant horizontalement sous pression d'Ar. Les températures sont mesurées

par des thermocouples chromel-alumel externes calibrés sur le point de fusion de NaCl (800,5 °C). Chaque assemblage four et bombe a été calibré sous pression à l'aide d'un thermocouple à deux points de mesure. La zone de gradient thermique minimum ainsi que les corrections de température (à apporter à la valeur lue par le thermocouple externe) ont ainsi été déterminées. La précision sur les températures est de ± 10 °C pour une sensibilité de 3 °C. La pression est mesurée par un manomètre Heise (précision ± 20 bar).

Pour les expériences de fusion, les charges comprennent 90 % (poids) de poudre (environ 50 mg) et 10 % d'eau distillée. Pour les expériences de cristallisation, les charges sont constituées de 95 % de verre (environ 47 mg) et 5 % d'eau distillée. Le verre de départ contenant environ 5 % d'eau, la quantité globale d'eau ajoutée est ainsi pratiquement identique dans les deux types d'expériences (10 %). Chaque charge est placée dans une capsule d'or (longueur : 25 mm, diamètre intérieur : 2,5 mm) qui est ensuite soudée à l'arc. Les expériences sont faites en parallèle pour les deux faciès : une capsule de chaque faciès est introduite dans le même autoclave ce qui permet une comparaison directe des résultats par faciès.

Différentes durées d'expérience ont été utilisées (tabl. 2, 3 et 4). La durée moyenne est d'environ une semaine pour les expériences de fusion. Pour les expériences de cristallisation, des durées allant jusqu'à 11 semaines environ se sont avérées nécessaires compte tenu de la lenteur des processus de cristallisation dans cette gamme de température. A la fin de l'expérience, l'autoclave est refroidi à l'air ; la trempe dure environ 2 h. Les capsules subissent un test d'étanchéité par pesée après expérience et sont ensuite ouvertes.

n°	T(°C)	P(kbar)	durée(h)	Q	F	Pl	FK	Tp	Lp	L
18	550	1	120	+	-	+	(+)	+	+	-
17	560	~0.9	120	+	-	+	(+)	+	+	-
16	570	1	120	+	-	+	(+)	+	+	-
15	579	1	240	+	-	+	(+)	+	+	0
14	590	1	240	+	-	+	+	+	+	0
13	598	1	240	+	-	+	+	(+)	(+)	0
12	609	1	168	+	+	(+)	-	-	-	0
11	619	1	168	+	+	+	-	(+)	-	0
10	640	1	168	+	+	+	-	-	-	0
8	651	1	168	+	+	+	-	(-)	-	0
7	659	1	168	+	+	+	-	-	-	0
6	668	1	500	+	+	+	-	-	-	0
5	680	1	500	+	+	+	-	-	-	0
4	690	1	500	+	-	-	-	(+)	-	0
2	705	1	96	+	-	-	-	-	-	0
1	710	1	96	+	-	-	-	0	-	0
3	724	1	96	-	-	-	-	-	-	0
28	510	3	144	+	-	+	+	+	+	-
29	521	3,1	144	+	-	+	+	+	+	-
30	538	2,82	132	+	-	+	+	+	+	(0)?
31	550	2,82	132	+	-	+	+	+	+	-
33	560	3	144	+	-	+	+	+	(+)	0
32	570	3	144	+	-	+	+	+	+	(0)
34	581	3	144	+	+	-	-	-	(+)	0
35	590	3	144	(+)	+	-	-	-	-	0
36	600	3	144	+	+	+	-	-	(+)	0
37	609	3	144	+	+	-	-	-	-	0
39	620	3	144	-	-	-	-	-	-	0
38	629	3	144	-	-	-	-	-	-	0
40	640	3	144	-	-	-	-	-	-	0

Symboles : + = identification aux RX; 0 = identification optique ou à la microsonde;
Abréviations : Q = quartz; F = feldspath indifférencié; Pl = plagioclase; FK = feldspath potassique; Tp = topaze; Lp = lépidolite; L = verre.

Tabl. 2. — Expériences de fusion, faciès B1 (278,20 - 279,95 m).

n°	T(°C)	P(kbar)	durée(h)	Q	F	Pl	FK	Tp	Lp	H	L
18	550	1	120	+	-	+	+	+	+	0	-
17	560	~0.9	120	+	-	+	+	+	+	0	-
16	570	1	120	+	-	+	+	+	+	0	-
15	579	1	240	+	-	+	+	+	+	0	-
14	590	1	240	+	-	+	+	+	+	0	0
13	598	1	240	+	-	+	(+)	(+)	-	0	0
12	609	1	168	+	-	+	+	-	-	0	0
11	619	1	168	+	-	+	(+)	(+)	-	0	0
9	631	1	168	+	-	+	+	(⊗)	-	0	0
10	640	1	168	+	-	+	+	-	(+)	0	0
8	651	1	168	+	+	-	-	-	-	0	0
6	668	1	500	+	-	-	-	-	-	0	0
5	680	1	500	+	-	-	-	-	-	0	0
4	690	1	500	+	-	-	-	-	-	0	0
2	705	1	96	+	-	-	-	0	-	0	0
1	710	1	96	+	-	-	-	0	-	0	0
3	724	1	96	-	-	-	-	-	-	0	0
28	510	3	144	+	-	+	+	+	+	-	-
29	520	3,1	144	+	-	+	+	+	+	-	-
30	538	2,82	132	+	-	+	+	+	+	-	-
31	549	2,82	132	+	-	+	+	+	+	-	-
33	560	3	144	+	-	+	+	+	+	-	-
32	570	3	144	+	-	+	+	+	+	-	-
34	581	3	144	+	-	+	+	+	+	-	0
35	590	3	144	+	-	+	(+)	+	+	0	0
36	600	3	144	+	-	+	(+)	+	+	0	0
37	609	3	144	+	+	-	-	(+)	+	0	0
39	620	3	144	+	-	-	-	-	+	0	0
38	629	3	144	+	-	-	-	-	-	0	0
40	640	3	144	+	-	-	-	-	-	0	0
41	650	3	192	+	-	-	-	-	-	0	0
42	661	3	192	+	-	-	-	-	-	0	0
43	672	3	192	-	-	-	-	-	-	0	0

Symboles : + = identification aux RX; 0 = identification optique ou à la microsonde; ⊗ = identification aux RX et optique/microsonde.
Abréviations : Q = quartz; F = feldspath indifférencié; Pl = plagioclase; FK = feldspath potassique; Tp = topaze; Lp = lépidolite; H = hématite; L = verre.

Tabl. 3. — Expériences de fusion, faciès B2 (606,05 - 606,95 m).

n°	T(°C)	P(kbar)	durée(h)	Q	Pl	FK	Tp	Lp	H	L
B1										
11	560	1	1800	⊗	⊗	+	-	-	-	(0)
1	600	1	1080	-	⊗	-	-	-	-	0
13	640	1	1104	-	-	-	0	-	-	0
9	660	1	1560	-	-	-	0	-	-	0
7	680	1	1560	-	-	-	0	-	-	0
2	700	1	672	-	-	-	⊗	+	?	0
5*	700	1	672	-	-	-	⊗	-	-	0
15	600	3	1104	-	0	-	⊗	-	-	0
B2										
12	560	1	1800	⊗	⊗	+	-	⊗	-	0?
3	600	1	1080	⊗	⊗	0	-	-	-	0
14	640	1	1104	-	-	-	0	-	-	0
10	660	1	1560	-	-	-	0	-	-	0
8	680	1	1560	-	-	-	0	-	-	0
4	700	1	672	-	-	-	-	-	-	0
6*	700	1	672	-	-	-	⊗	-	-	0

Symboles : + = identification aux RX; 0 = identification optique ou à la microsonde; ⊗ = identification RX et optique/microsonde; * = expériences dopées en topaze.
Abréviations : Q = quartz; Pl = plagioclase; FK = feldspath potassique; Tp = topaze; Lp = mica blanc; H = hématite; L = verre.

Tabl. 4. — Expériences de cristallisation, faciès B1 et B2.

3. — Identification des phases et techniques analytiques

Chaque produit d'expérience a été étudié systématiquement aux RX et au microscope pétrographique. La microsonde électronique a été utilisée à la fois comme technique

complémentaire d'identification des phases et pour l'analyse de leur composition chimique. Quartz, plagioclase et topaze ont été identifiés optiquement et aux RX. Pour la topaze, l'utilisation des RX est une technique peu sensible (faible proportion de topaze dans les produits de départ et superposition des raies de forte intensité de la topaze (112) avec des raies de feldspath). Son identification à haute température dans les expériences de fusion a été effectuée à l'aide de la microsonde électronique; dans les expériences de cristallisation, la topaze est surtout détectée optiquement. Feldspath potassique et mica blanc ont été surtout identifiés aux RX (également à la microsonde pour le feldspath potassique et optiquement pour le mica). Lorsque la proportion de feldspath est faible, il y a ambiguïté sur la distinction aux RX entre feldspath potassique et plagioclase (notation « feldspath indifférencié », tabl. 2 et 3). Le verre est identifié uniquement au microscope à l'aide d'une teinte sensible. Un minimum d'environ 5 vol. % de verre peut être détecté de cette manière. On a fréquemment noté la présence d'inclusions fluides piégées dans le verre ce qui suggère que ce dernier est saturé en H_2O .

À côté de ces phases principales, plusieurs phases mineures ont été rencontrées à la fois dans les expériences de fusion et de cristallisation. Un opaque (probablement la magnétite) apparaît dans les expériences du faciès B2. Une phase en plaquettes, de couleur brun-rouge, légèrement pléochroïque, de forme sub-hexagonale, à fort pouvoir réflecteur est systématiquement présente dans les produits d'expériences du faciès B2. Cette phase, identifiée initialement comme un mica noir est en fait de l'hématite titanifère, analysée à la microsonde électronique. Une phase aciculaire de petite taille, fortement biréfringente et à extinction droite s'observe également à haute température dans les deux faciès. Cette phase, formant fréquemment des textures caractéristiques en « oursin », reste encore indéterminée.

Les courbes de disparition des phases dans les expériences de fusion ont été tracées à partir des RX à l'exception de la topaze (problème de la faible sensibilité des RX signalé ci-dessus). Les solidus sont encadrés par des expériences ne montrant pas de verre et d'autres où le verre est présent. Dans les expériences de cristallisation, les courbes d'apparition des phases sont tracées à partir des données d'observation au microscope. Ceci se justifie par la faible sensibilité des RX dans ces assemblages avec une proportion importante de verre. La position des liquidus reste incertaine, du fait de la présence de phases indéterminées à haute température (notamment les phases aciculaires biréfringentes, voir ci-dessus). La position des solidus dans ces expériences est estimée (voir ci-dessus).

La composition des plagioclases et des feldspaths potassiques obtenus dans les expériences de cristallisation a été déterminée à la microsonde électronique.

Résultats

1. — Expériences de fusion

Le détail des expériences est présenté dans les tableaux 2 et 3 et les diagrammes de phase obtenus dans les figures 1 et 2. Pour les deux faciès, les données permettent de tracer

solidi et courbes de disparition des phases majeures. Les solidi (faciès B1 : 575 °C à 1 kbar, 555 °C à 3 kbar; faciès B2 : 585 °C à 1 kbar, 575 °C à 3 kbar) sont voisins et varient assez peu avec la pression (fig. 1 et 2). Ils sont très nettement inférieurs au solidus du système granitique synthétique saturé en H_2O (Tuttle et Bowen, 1958; fig. 1 et 2). Ces basses températures solidus sont attribuées à la présence de F et Li en quantités importantes dans les granites de Beauvoir. Ces constituants sont en effet des fondants efficaces dans les systèmes granitiques synthétiques (Manning, 1981; Martin, 1983). Cette étude (et également celle récente de Weidner et Martin, 1987) démontre qu'il en est de même pour les compositions granitiques naturelles. Ceci implique une participation à la fusion des phases minérales porteuses du F et du Li (lépidolite essentiellement, topaze). Le solidus du faciès B2 est légèrement décalé vers les hautes températures par rapport à celui du faciès B1, en accord avec leurs compositions chimiques respectives (notamment teneurs en F et Li, tabl. 1).

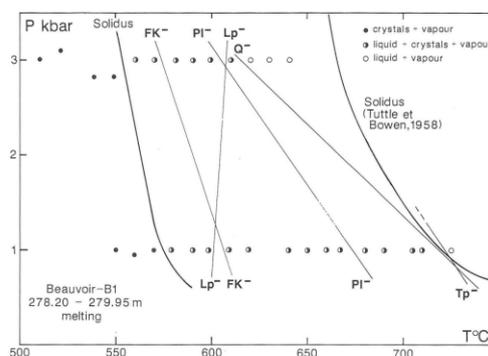


Fig. 1. — Résultats des expériences de fusion en conditions de saturation en H_2O du faciès B1 du granite de Beauvoir et comparaison avec le solidus du système $Qz-Ab-Or-H_2O$ (Tuttle et Bowen 1958). Q-, Fk-, Pl-, Lp- et Tp- sont les courbes de fusion du quartz, du feldspath potassique, du plagioclase, de la lépidolite et de la topaze. Le solidus est indiqué en trait gras. Results of the H_2O -saturated melting experiments, B1 facies, Beauvoir granite, and comparison with the solidus of the system $Qz-Ab-Or-H_2O$ (Tuttle and Bowen 1958). Q-, Fk-, Pl-, and Tp- are the melting curves for quartz, K-feldspar, plagioclase, lepidolite and topaz respectively. The heavy line is the solidus curve.

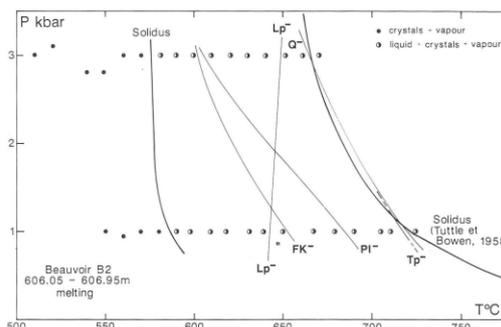


Fig. 2. — Résultats des expériences de fusion en conditions de saturation en H_2O du faciès B2 du granite de Beauvoir. Mêmes symboles et abréviations que figure 1. Results of the H_2O -saturated melting experiments, B2 facies, Beauvoir granite. Same symbols and abbreviations as in figure 1.

Pour les deux faciès, on observe un rétrécissement du domaine de fusion d'environ 130 à 80 °C de 1 à 3 kbar. Les courbes de fusion des phases Fk, Pl, Tp et Q sont à pente négative (pente positive pour la lépidolite) et l'ordre de disparition des phases est identique pour les deux faciès : Lp, Fk, Pl, suivi par Tp et Q à 1 kbar, Fk, Pl, Lp, Q à 3 kbar. La position de la courbe Tp- n'a pas pu être précisée à 3 kbar. Du faciès B 1 au faciès B 2, on note un déplacement d'ensemble de la courbe Lp- vers les hautes températures, déplacement qui reflète la différence de composition chimique du mica (voir ci-dessus).

2. — Expériences de recristallisation

Le détail des expériences est donné tableau 4 et les diagrammes de phase obtenus figures 3 et 4. Bien qu'incomplètes (expériences réalisées surtout à 1 kbar), plusieurs résultats importants apparaissent.

Pour les deux faciès, l'intervalle de cristallisation se situe à des températures très basses, elles-mêmes inférieures au solidus du système granitique synthétique à 1 kbar (Tuttle et Bowen, 1958; fig. 3 et 4). L'apparition des phases principales intervient en dessous de 650 °C, à l'exception de la topaze dont les courbes d'apparition sont localisées à proximité de 700 °C.

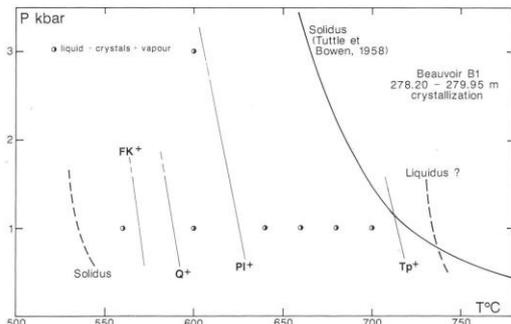


Fig. 3. — Résultats des expériences de cristallisation en conditions de saturation en H_2O du faciès B 1 du granite de Beauvoir. Q^+ , FK^+ , Pl^+ et Tp^+ sont les courbes d'apparition du quartz, du feldspath potassique, du plagioclase et de la topaze. Le mica blanc n'a pas été rencontré. Pour la position du solidus et du liquidus (courbes en tirets), voir le texte.

Results of the H_2O -saturated crystallization experiments, B 1 facies, Beauvoir granite. Q^+ , FK^+ , Pl^+ and Tp^+ are curves for the appearance of quartz, K-feldspar, plagioclase and topaz respectively. White mica has not been encountered. About the location of the solidus and liquidus (dashed curves), see text.

Les phases majeures sont généralement de nature identique à celles présentes dans le granite de départ. Cependant, le mica blanc n'a pas été rencontré dans les expériences pour le faciès B 1. L'ordre d'apparition des phases est comparable pour les deux faciès (mica blanc excepté). La topaze est la première phase majeure à apparaître dans les deux faciès. Elle apparaît légèrement plus tôt dans le faciès B 1 que dans le B 2 (fig. 3 et 4). Pour le faciès B 1, l'ordre est ensuite : plagioclase, quartz puis feldspath potassique (ordre relatif d'apparition entre Q et Fk obtenu d'après les proportions des phases présentes, expérience n° 11, tabl. 4). La courbe Pl^+ est à pente légèrement négative (fig. 3), le plagioclase étant moins

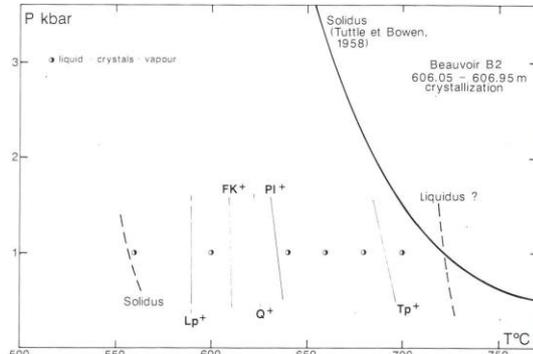


Fig. 4. — Résultats des expériences de cristallisation en conditions de saturation en H_2O du faciès B 2 du granite de Beauvoir. Mêmes symboles et abréviations que dans la figure 3 et Lp^+ : courbe d'apparition du mica blanc. Results of the H_2O -saturated crystallization experiments, B 2 facies, Beauvoir granite. Same symbols and abbreviations as in figure 3 and Lp^+ : curve of appearance of white mica.

abondant à 3 qu'à 1 kbar. Pour le faciès B 2, la position relative des courbes d'apparition du plagioclase et du quartz n'est pas encore déterminée et la figure 4 représente une configuration possible. L'apparition du feldspath potassique suit celle des autres phases cardinales (ordre obtenu d'après les proportions de phases présentes dans l'expérience n° 3, tabl. 4). Le mica blanc est la dernière phase majeure à apparaître (fig. 4). Les températures solidus sont inférieures à celles déterminées en fusion (fig. 3 et 4); d'après les proportions de verre présent dans les expériences n° 11 et 12 (tabl. 4), le solidus du B 2 est proche de 560 °C tandis que celui du B 1 se trouve à plus basse température.

3. — Composition des feldspaths dans les expériences de cristallisation

Les feldspaths ont été analysés dans les produits de trois expériences de cristallisation et les résultats représentatifs sont reportés tableau 5. L'ensemble des données est représenté sur la figure 5. Pour les expériences n° 1 et 15 (tabl. 4, faciès B 1), les feldspaths analysés sont des plagioclases de composition homogène. Ils sont faiblement calciques et assez riches en composant Or. Pour le faciès B 2 (n° 3, tabl. 4), deux feldspaths (plagioclase et feldspath potassique) coexistent avec le liquide. Les plagioclases sont plus calciques que dans le faciès B 1 (jusqu'à 3,5 mole % An) et les feldspaths potassiques fortement riches en composant Ab. Pour chaque population, on observe une dispersion assez importante des compositions (fig. 5). Les compositions des deux feldspaths dans l'expérience n° 3 sont pratiquement celles attendues à 600 °C d'après les limites de phases dans le système An-Ab-Or (fig. 5). Toutefois, les variations de composition observées ainsi que certaines compositions à l'intérieur des limites de phase (fig. 5) indiquent que l'équilibre n'est pas complètement atteint. Remarquons que les données pour le faciès B 1 ne sont pas directement comparables avec ces limites de phases, le feldspath potassique étant absent. Cependant, elles sont proches de celles attendues à basse température pour un liquide faiblement calcique. En outre, on notera que les compositions des feldspaths expérimentaux contrastent nettement avec celles des produits de départ (tabl. 5; fig. 5).

	1	2	3	4	5	6
Na ₂ O	10.30	9.19	4.9	10.27	11.34	1.16
K ₂ O	1.24	2.25	9.04	1.23	0.13	14.29
CaO	0.18	0.69	0.01	0.15	0.09	0.00
SiO ₂	67.87	66.5	65.29	67.41	68.04	63.50
Al ₂ O ₃	30.31	20.48	19.48	20.13	19.88	18.54
total	99.9	99.11	98.72	99.13	99.48	97.49*
Na	1.75	1.58	0.87	1.76	1.93	0.21
K	0.14	0.26	1.05	0.14	0.01	1.72
Ca	0.02	0.07	0.00	0.01	0.01	0.00
Si	5.95	5.9	5.95	5.95	5.97	5.98
Al	2.10	2.14	2.09	2.09	2.06	2.06
Ab	91.8	83.2	45.2	92.0	98.8	11.0
Or	7.3	13.4	54.8	7.3	0.8	89.0
An	0.9	3.5	0.00	0.7	0.4	0.00

1 - plagioclase, faciès B1, 600°C, 1 kbar (n°1, tableau 4); 2 - plagioclase, faciès B2, 600°C, 1 kbar (n°3, tableau 4); 3 - feldspath potassique, faciès B2, 600°C, 1 kbar (n°3, tableau 4); 4 - plagioclase, faciès B1, 600°C, 3 kbar (n°15, tableau 4). Les n°5 et 6 sont les moyennes des analyses effectuées sur les 2 faciès B1 et B2. * - n.b. les feldspaths potassiques des produits de départ contiennent du Rb. Composition des pôles purs en mole %.

Tabl. 5. — Composition des feldspaths des expériences de cristallisation (1 - 4) et des produits de départ (5,6).

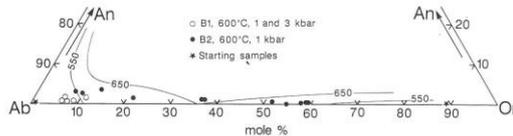


Fig. 5. — Diagramme An-Ab-Or montrant la composition des feldspaths dans les expériences de cristallisation (voir tableau 5). Limites de phase tirées de Brown et Parsons (1981) avec températures en °C. La composition des feldspaths des produits de départ (*) est une moyenne sur les deux faciès d'analyses à la microsonde électronique.

An-Ab-Or diagram showing the composition of feldspars in the crystallization experiments (see table 5). Ternary phase boundaries from Brown and Parsons (1981) with temperatures labelled in °C. The composition of feldspars in the starting products (*) is an average of electron microprobe analyses.

Discussion des expériences

1. — Comparaison entre expériences de fusion et de cristallisation

Les différences évidentes entre les expériences de fusion et de cristallisation (fig. 1 et 2 d'une part, 3 et 4 d'autre part) démontrent l'existence de problèmes cinétiques dans les deux types d'essais. Notons en effet, que dans un cas idéal, on devrait obtenir un accord parfait entre les deux types d'expériences. En pratique, on sait que les systèmes granitiques posent des problèmes cinétiques importants. Ce problème se pose avec une acuité particulière dans nos essais (et, ce malgré des durées expérimentales importantes, jusqu'à 11 semaines, tabl. 4) en raison des températures d'essais très basses. Les températures solidus sont dans les deux cas voisines. Cependant, celles déterminées dans les expériences de cristallisation sont légèrement plus basses. Ceci est la conséquence d'une surfusion, le liquide silicaté cristallisant très difficilement à ces températures (voir Bénard et al., 1985). Nous considérons donc comme plus proches de l'équilibre les températures obtenues en fusion et ce sont celles qui seront retenues (voir également Weidner et Martin 1987).

Les températures d'apparition des phases majeures sont généralement plus basses que les températures de fusion correspondantes (fig. 1 à 4). Ceci est classique dans les systèmes granitiques; c'est le résultat combiné de cinétiques de fusion lentes et de phénomènes de surfusion (Johannes 1978, 1980). En revanche, on note un bon accord entre les températures de fusion et d'apparition de la topaze (fig. 1 à 4). Ceci laisserait penser qu'il n'y a pas de problème cinétique important dans nos expériences pour la topaze. Cependant, l'identification de la topaze en traces dans les expériences est délicate et elle reste de plus limitée aux expériences à 1 kbar. L'absence du mica blanc dans les expériences de cristallisation avec le faciès B1 devrait se résoudre par une expérience plus proche du solidus (fig. 3). Il faut souligner qu'à part l'exception discutée ci-dessus, cet écart de température entre fusions et cristallisations ne remet généralement pas en cause l'ordre d'apparition ou de disparition des phases.

Toutefois, on observe une inversion de l'ordre relatif de cristallisation du plagioclase et du quartz entre les deux types d'essais (fig. 1 à 4). D'après les expériences de fusion, le quartz disparaît après le plagioclase. Au contraire, les expériences de cristallisation (pour le faciès B1 et peut-être pour le B2, voir ci-dessus) montrent l'apparition du plagioclase avant le quartz. Parmi ces deux cas possibles, nous sommes conduits à privilégier le second sur la base d'arguments expérimentaux. En effet, les cinétiques dans nos expériences de fusion sont lentes. Le quartz est une phase particulièrement réfractaire dans ce type d'expériences (Piwinski et Martin, 1970). De plus, les feldspaths de départ, n'étant en équilibre ni entre eux ni avec un liquide à des températures magmatiques, peuvent fondre en déséquilibre (Johannes 1978, 1980). Le rétrécissement important des intervalles de fusion entre 1 et 3 kbar peut s'expliquer par une amélioration des cinétiques de fusion avec la pression. En outre, dans les expériences de cristallisation, le phénomène de surfusion devrait plus décaler vers les basses températures la courbe d'apparition du plagioclase que celle du quartz (la nucléation des feldspaths étant plus difficile que celle du quartz, Naney et Swanson, 1980). Nous tenons donc comme préférable l'ordre relatif plagioclase puis quartz obtenu dans les expériences de cristallisation.

2. — Validité des expériences

Il est rappelé que toutes les expériences ont été conduites dans des conditions de saturation en H₂O pour les deux pressions étudiées (P_{H₂O} = P_{totale}). De même, les conditions de fO₂ dans nos expériences sont assez oxydantes (présence de magnétite et d'hématite). La valeur de ces paramètres expérimentaux ne correspond peut-être pas totalement aux conditions de cristallisation. De plus, la phase fluide magmatique était vraisemblablement de composition complexe (notamment riche en chlorures, Aïssa 1987) alors que dans cette étude, la composition de la phase fluide de départ a été délibérément choisie la plus simple possible (H₂O pure). On notera toutefois que les résultats expérimentaux ne présentent aucune contradiction flagrante avec la réalité géologique, ce qui pourrait intervenir par exemple si l'un des paramètres ci-dessus avait été choisi de façon irréaliste. Au contraire, les expériences reproduisent plusieurs caractères originaux des granites de Beauvoir tels que minéralogie, température et course de cristallisation. Elles sont donc considérées représentatives des conditions de cristallisation.

Implications pétrogéniques pour les granites de Beauvoir

1. — Température et cristallisation des granites de Beauvoir

Les deux types d'expériences démontrent que la cristallisation des granites de Beauvoir s'est effectuée à des températures extrêmement basses pour des magmas granitiques. De ce point de vue, les granites de Beauvoir sont exceptionnels. On ne connaît que quelques exemples de compositions granitiques naturelles ayant des températures solidus aussi basses : les rhyolites à topaze (Webster et al., 1987), les obsidiennes de Macusani (London et al., 1986 ; Boher et al., 1987) et les pegmatites sodolithiques (Burnham et Nekvasil 1986). Ces compositions se caractérisent par des concentrations importantes en F, Li, accessoirement en P (comme les granites de Beauvoir). Le B peut être également un constituant important (Pichavant et Manning 1984 ; Bénard et al., 1985 ; Pichavant et al., 1987) mais les granites de Beauvoir en sont remarquablement dépourvus (Raimbault et Burnol 1985).

L'intervalle de cristallisation obtenu (d'après les deux types d'expériences) est étroit. Les températures *liquidus* peuvent être inférieures au *solidus* du système Qz-Ab-Or. Ceci implique que les magmas de Beauvoir ont la possibilité de rester largement liquides à des températures basses (< 700 °C) comme celles de l'enveloppe métamorphique du massif des Colettes. De tels magmas possèdent des viscosités basses (Dingwell et al., 1985) ce qui a des conséquences sur le plan de la mise en place. Ces caractéristiques (faible viscosité, basses températures de cristallisation) sont compatibles avec l'absence d'enclaves de la zone source et la présence d'enclaves de l'encaissant micaschisteux non assimilées. Ces conditions permettent également la poursuite du fractionnement chimique dans la mesure où les liquides résiduels peuvent se séparer facilement des cumulats.

2. — Ordre de cristallisation des magmas de Beauvoir

L'ordre de cristallisation des phases majeures est identique pour les deux faciès. La topaze est la première phase à cristalliser. Sa cristallisation débute à peu près aux mêmes températures dans les deux faciès (fig. 1 à 4). Ceci contraste avec les observations pétrographiques qui situeraient l'apparition de la topaze primaire plus tardivement dans le faciès B1 que dans le faciès B2 (Monier et al., 1985).

Parmi les phases cardinales, l'ordre de cristallisation est plagioclase, puis quartz (voir ci-dessus), puis feldspath potassique. Les positions relatives des feldspaths dans l'ordre de cristallisation sont en accord avec les observations pétrographiques (cristallisation précoce du plagioclase et interstitielle du feldspath potassique, Monier et al., 1985). La présence d'inclusions dans le quartz et dans certaines topazes indique une cristallisation précoce du plagioclase, en accord avec les données expérimentales.

La lépidolite apparaît après le feldspath potassique à 1 kbar (fig. 1, 2 et 4). D'après les expériences de fusion, son domaine de stabilité est plus étendu à 3 kbar. Elle présente

donc un caractère plus précoce à cette pression, en accord avec les observations pétrographiques. Ceci pourrait suggérer des pressions de cristallisation plus proches de 3 kbar que de 1 kbar pour les granites de Beauvoir. Si des arguments d'ordre géologique (profondeur de mise en place, métamorphisme, *ce volume*) font apparaître cette gamme de pression comme trop élevée, une autre possibilité à considérer au vu de ces résultats est que la composition du mica (et donc son domaine de stabilité) ne serait pas strictement représentative des conditions de cristallisation magmatique (cf. la composition des feldspaths). Notons enfin que l'écart important des températures de cristallisation de la topaze et du quartz peut rendre compte des différences constatées (en particulier dans le faciès B1) dans la nature des fluides piégés dans les inclusions (Aïssa, 1987).

3. — Les granites de Beauvoir : des liquides résiduels

Les compositions normatives CIPW des faciès B1 et B2 sont reportées dans le diagramme Qz-Ab-Or (fig. 6). Par rapport aux minima du système Qz-Ab-Or-H₂O pour les basses P_{H₂O} (fig. 6), elles sont décalées vers le pôle Ab. La position des points représentatifs des faciès B1 et B2 n'est toutefois pas directement comparable avec les limites de phases tracées dans le système fluoré (fig. 6). En effet, pour des compositions peralumineuses, le calcul des normes CIPW accroît artificiellement la proportion de Q normatif. En outre, le

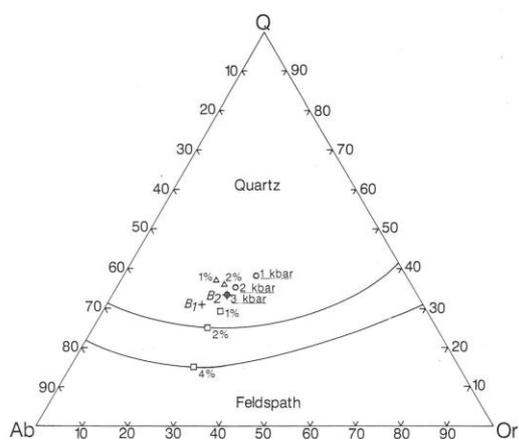


Fig. 6. — Diagramme Qz-Ab-Or montrant les compositions normatives CIPW des échantillons de départ (+), les compositions des minima thermiques du système Qz-Ab-Or pour P_{H₂O} = 1, 2, 3 kbar (O, Tuttle et Bowen 1958, pressions notées en kbar), pour P_{H₂O} = 1 kbar en présence de fluor (□, Manning 1981, notés en % poids F dans le liquide) et pour P_{H₂O} = 1 kbar en présence de lithium (Δ, Martin 1983, notés en % poids Li₂O dans le liquide). Les courbes tracées sont des limites de phases dans le système fluoré.

Qz-Ab-Or diagram showing the normative compositions of the starting samples (+), the compositions of the thermal minima of the Qz-Ab-Or system for P_{H₂O} = 1, 2, 3 kbar (O, Tuttle and Bowen 1958, labelled with pressure in kbar), for P_{H₂O} = 1 kbar with added fluorine (□, Manning 1981, labelled with wt % F in the melt), for P_{H₂O} = 1 kbar with added lithium (Δ, Martin 1983, labelled with wt % Li₂O in the melt). The curves drawn are phase boundaries in the fluorine-bearing system.

constituant CaO est ignoré dans la représentation Q-Ab-Or (cf. la composition des plagioclases). De plus, les compositions de Beauvoir sont fortement enrichies en constituants tels que F, mais également en Li, P et Al_2O_3 (entre 4 et 5 % de corindon normatif), constituants qui affectent les relations de phases dans le système Q-Ab-Or. Les points représentatifs des faciès B 1 et B 2 ne suivent d'ailleurs pas exactement la ligne d'évolution des minima à teneurs en F croissantes à 1 kbar (fig. 6). Bien que l'effet individuel de certains de ces constituants (P, Al_2O_3) soit encore mal connu, on peut cependant conclure (Pichavant et al., 1987) que le décalage des compositions de Beauvoir vers le pôle Ab correspond à l'effet conjugué des constituants F, Li, P, Al_2O_3 sur la composition des liquides granitiques résiduels.

Les intervalles étroits de cristallisation et les compositions normatives montrent que B 1 et B 2 sont des produits de congélation de *liquides* (par opposition à des magmas riches en cristaux). Les granites de Beauvoir peuvent donc être considérés comme des témoins de liquides résiduels. Leur composition (majeurs et traces) est proche des obsidiennes de Macusani (Pichavant et al., 1987), exemples type de compositions de liquides résiduels dans les séries peralumineuses et felsiques. La composition des magmas parents (à partir desquels les magmas résiduels de Beauvoir sont produits) n'est pas connue.

4. — Quelle relation entre les granites B 1 et B 2 ?

On peut formuler deux hypothèses principales quant à la relation entre B 1 et B 2 : (1) B 1 et B 2 sont comagmatiques, B 1 dérivant de B 2 par différenciation magmatique ; (2) B 1 et B 2 ne sont pas comagmatiques et ont évolué, à partir de magmas parents différents, de la même façon bien que séparément. L'étude expérimentale souligne plusieurs caractères communs entre les granites B 1 et B 2 : températures solidus, températures et ordre de cristallisation. Dans le détail, certaines différences apparaissent. La température solidus du faciès B 2 est légèrement supérieure (10-20 °C) à celle du faciès B 1. Ceci s'accorde avec le chimisme moins différencié du B 2 par rapport au B 1. De même, la courbe de fusion de la lépidolite se situe à plus haute température dans le faciès B 2. La composition des plagioclases expérimentaux est également différente pour les deux faciès. Cependant, nos expériences n'interdisent ni ne favorisent aucune des deux hypothèses précédentes.

5. — Importance des processus postmagmatiques

Bien que la signature magmatique soit dominante dans la pétrogénèse des granites de Beauvoir, nos expériences permettent de mettre en évidence de façon indiscutable la participation de processus postmagmatiques. L'argument principal est fourni par la composition des feldspaths expérimentaux. Celle-ci est, en effet, très différente de celle des feldspaths de départ. Comme la composition des feldspaths expérimentaux analysés est compatible avec une composition magmatique (de basse température et pour des liquides faiblement calciques), on conclut que les feldspaths dans les granites de départ ont subi un rééquilibrage postmagmati-

que. Notons que cette interprétation diffère de celle proposée par Weidner et Martin (1987) qui considèrent la composition des plagioclases du granite de Slip (pratiquement identique à celle des granites de Beauvoir) comme magmatique, le Ca du magma étant préférentiellement partagé en faveur de la fluorine (également considérée comme magmatique). Cette interprétation ne peut s'appliquer à Beauvoir vu l'absence de fluorine primaire et la faible abondance d'apatite magmatique (Monier et al., 1985). Il est envisageable que le processus de rééquilibrage postmagmatique ait affecté d'autres phases (les micas, voir ci-dessus), toutefois nos expériences ne permettent pas de conclure sur ce point.

Conclusions

Les données expérimentales présentées dans cette étude apportent des informations sur la cristallisation des granites de Beauvoir. Toutefois, des expériences complémentaires (à 3 kbar en particulier) seraient nécessaires pour confirmer certains points de l'ordre de cristallisation et pour mieux évaluer les problèmes cinétiques, particulièrement importants à ces basses températures.

1. Les granites de Beauvoir sont les produits de cristallisation de magmas résiduels enrichis en F, Li, P et éléments lithophiles. Les températures de cristallisation sont exceptionnellement basses (moins de 600 °C à 1 kbar) pour des corps granitiques. C'est là un résultat remarquable.

2. La topaze et la lépidolite présentent chacune un domaine de stabilité dans les conditions magmatiques. Elles peuvent donc avoir cristallisé au stade magmatique dans les granites de Beauvoir.

3. Malgré certains résultats contradictoires, l'ordre de cristallisation est le suivant à 1 kbar : topaze, plagioclase, quartz, feldspath potassique et lépidolite. A 3 kbar, la cristallisation de la lépidolite est plus précoce.

4. Bien que l'empreinte magmatique soit prédominante, il est possible de mettre en évidence la participation de processus postmagmatiques, notamment à partir des compositions des plagioclases expérimentaux.

Remerciements

Michel Cuney et David Manning ont fourni des critiques constructives sur une première version du manuscrit. Le travail récent de Weidner et Martin nous a été signalé par David Manning. Gilles Monier a participé aux choix des échantillons de départ. Etude financée en partie par le BRGM, Programme Géologie Profonde de la France, Contrat GPF3-8A7. CRPG Contribution n° 725

Références bibliographiques

AÏSSA M. (1987). — Reconstitution d'un système de paleocirculations hydrothermales et ses conséquences métallogéniques : le district d'Echassières (Massif central français). Thèse INPL, Nancy, 258 p.

- BENARD F., MOUTON P., PICHAVANT M. (1985). — Phase relations of tourmaline leucogranites and the significance of tourmaline in silicic magmas. *J. Geol.*, **93**, pp. 271-291.
- BOHER M., STENGER J.F., PICHAVANT M. (1987). — Low-temperature, Li-, F-rich granitic/magmas. *Terra Cognita*, **7**, p. 356.
- BROWN W.L., PARSONS I. (1981). — Towards a practical, two-feldspar thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **76**, pp. 369-377.
- BURNHAM C.W., NEKVASIL H. (1986). — Equilibrium properties of granite pegmatite magmas. *Amer. Mineral.*, **71**, pp. 239-263.
- CUNEY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON P., FEYBESSE J.L., GAGNY C., JACQUOT T., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G., TEGYEY M. (1986). — Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur le coupole de granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir (Massif central, France). *C. R. Acad. Sci. Fr.*, **303**, pp. 569-574.
- DINGWELL D.B., SCARFE C.M., CRONIN D.J. (1985). — The effect of fluorine on viscosities in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$: implications for phonolites, trachytes and rhyolites. *Amer. Mineral.*, **70**, pp. 80-87.
- JOHANNES W. (1978). — Melting of plagioclase in the system Ab-An- H_2O and Qz-Ab-An- H_2O at $P_{\text{H}_2\text{O}} = 5$ kbar, an equilibrium problem. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**, pp. 295-303.
- JOHANNES W. (1980). — Metastable melting in the granite system Qz-Ab-An- H_2O . *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, pp. 73-80.
- KOVALENKO N.I. (1979). — Experimental studies on the conditions of formation of rare-metal-, Li-, F-rich granites. *Nauka, Moscow*, 150 p.
- LONDON D., WEAVER B.L., HERVIG R.L. (1986). — Liquidus relations of Macusani rhyolite, an analogue for rare-element granite-pegmatite systems. *Geol. Soc. Am. Abstr. with Progr.*, **18**, p. 675.
- MANNING D.A.C. (1981). — The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess H_2O at 1 kbar. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **76**, pp. 206-215.
- MARTIN J.S. (1983). — An experimental study of the effects of lithium on the granite system. *Proc. Ussher Soc.*, **5**, pp. 417-420.
- MONIER G., TEGYEY M., KOSAKEVITCH A. (1985). — La pétrologie des différents faciès. Programme Géologie Profonde de la France, Documents du BRGM n° 100, chapitre 2, pp. 39-102.
- NANEY M.T., SWANSON S.E. (1980). — The effect of Fe and Mg on crystallization in granitic systems. *Amer. Mineral.*, **65**, pp. 639-653.
- PICHAVANT M., MANNING D.A. (1984). — Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites; the contribution of experimental data. *Phys. Earth Planet. Int.*, **35**, pp. 31-50.
- PICHAVANT M., VALENCIA HERRERA J., BOULMIER S., BRIQUEU L., JORON J.L., JUTEAU M., MARIN L., MICHARD A., SHEPPARD S.M.F., TREUIL M., VERNET M. (1987). — The Macusani glasses, Se Peru: evidence of chemical fractionation in peraluminous magmas. In: B.O. Mysen, ed., *Magmatic Processes: Physicochemical Principles*, The Geochemical Society Special Publication n° 1, pp. 359-373.
- PIWINSKII A.J., MARTIN R.F. (1970). — An experimental study of equilibrium with granitic rocks at 10 kbar. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **29**, pp. 1-10.
- RAIMBAULT L., BURNOL L. (1985). — La géochimie des différents faciès. Programme Géologie Profonde de la France, Documents du BRGM n° 100, chapitre 4, pp. 123-136.
- TUTTLE O.F., BOWEN N.L. (1958). — Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8-\text{KAlSi}_3\text{O}_8-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Mem. Geol. Soc. Am.*, **74**, 153 p.
- WEBSTER J.D., HOLLOWAY J.R., HERVIG R.L. (1987). — Phase equilibria of a Be, U and F-enriched vitrophyre from Spor Mountain, Utah. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, pp. 389-402.
- WEIDNER, MARTIN R.-F. (1987). — Phase equilibria of a fluorine-rich leucogranite from the St. Austell pluton, Cornwall. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, pp. 1591-1597.