

Dynamique de l'organisation séquentielle du magma de Beauvoir. Apport de la pétrologie structurale.

T. Jacquot *

Mots-clés : Granite, Granite Beauvoir, Pétrofabrique, Mise en place (Caisson)
Allier (Échassières)

Résumé

Le granite de Beauvoir recoupé en sondage a été subdivisé en six unités (de bas en haut, I à VI, Gagny, 1987). Les méthodes de la pétrologie structurale mettent en évidence des perturbations aux passages entre les unités mais également entre séquences pluridécamétriques composant l'unité II plus complexe. Ces perturbations, généralement assez ténues, sont de deux types : changement de structuration magmatique et particularités texturales. Ces dernières sont interprétées comme étant significatives d'un déséquilibre entre liquides magmatiques en contact. La formation du caisson résulte alors d'un emplissement de plusieurs venues magmatiques. Trois épisodes principaux de remplissage sont envisagés et concernent les mises en place successives de l'unité I, de l'unité II puis de l'ensemble des unités III à VI.

Abstract

Contribution of the structural geology of the dynamic sequential organisation of the Beauvoir magma

The Beauvoir granite cut by the Echa I borehole was subdivised in six units (from the bottom to the top I to VI). The structural petrology methods point out disturbances between units but also within the unit II more composite than other. These disturbances concern two aspects : changing of magmatic structurations and textural details interpreted as indicating chemical imbalances between magmatic liquids. The caisson, where the Beauvoir granite is intruded, is obtained by piling up of several magma in comings. Three main episodes of filling concern : the emplacements of the unit I, then the unit II and at last the body constituted by units III to VI.

1. – Introduction

Un modèle d'intrusion du granite de Beauvoir dans un caisson a été proposé sur la base de données obtenues en surface (Jacquot et Gagny, ce volume) : la venue du magma de Beauvoir résulte de l'ouverture des micaschistes, contre-coup de la montée verticale du granite des Colettes. Ce dernier provoque, par ailleurs, le redressement des structures en partie apicale du caisson de Beauvoir.

Les études réalisées sur le sondage Echa I ont pour objectif de préciser le mécanisme de formation du caisson.

Six unités principales (de bas en haut I à VI) ont été distinguées à partir d'une approche géochimique (Gagny, 1987) et sont interprétées sous forme d'intrusions successives. Elles se situent respectivement de -875 à -843 m, de -790 à -510 m, de -510 à -345 m, de -345 à -250 m, de -250 à -195 m et de -195 à -98 m. L'unité I basale est isolée du corps principal par des panneaux de micaschistes, le plus important étant recoupé de -790 à -820 m. L'objet de la pétrologie structurale sera donc, tout en montrant les traits principaux de la structuration magmatique, de mettre en évidence des hétérogénéités entre les unités II à VI ainsi qu'au sein de l'unité II, plus épaisse et plus complexe que les précédentes. L'existence de discontinuités pourra éclairer le mode de mise en place de ces unités.

* Laboratoire de Pétrologie Structurale et Métallogénie, Université de Nancy I, BP. 239, 54506 Vandœuvre-les-Nancy Cedex. UA (CNRS) 728 - Pétrologie des granitoïdes.

2. – Les caractères structuraux majeurs

1. – Organisation des fabriques magmatiques à l'échelle du sondage

Les orientations préférentielles des minéraux sont acquises à l'état magmatique ; si des traces de déformation plastique existent généralement, elles concernent surtout les minéraux d'apparition précoce (essentiellement lépidolite en haut de sondage et quartz en profondeur) et sont peu intenses. Cette déformation signe la forte charge en cristaux qui tendent à constituer un bâti rigide par dépassement du seuil de Arzi en fin de mise en place (la charge en cristaux dépasse 60 à 70 % du volume ; Arzi, 1978).

Le relevé systématique des fabriques magmatiques permet de discerner des différences de structurations entre la base du granite de Beauvoir (unité II) et le complexe supérieur constitué par les unités III à VI (faciès B 1, Cuney *et al.*, 1986) (fig. 1). En profondeur, une fluidalité à N120E 30 à 50° apparaît dominante. Dans le complexe supérieur, les variations de pendage de fabriques planaires d'azimuts fréquemment WNW-ESE caractérisent deux faits principaux :

- au sein des unités III et IV, les fabriques sont principalement subverticales ; leur existence est cohérente avec le redressement de l'agencement magmatique, provoqué par la mise en place synchrone du granite des Colettes (Jacquot et Gagny, 1987).
- trois secteurs se structurent subhorizontalement à – 100 m, de – 550 m à – 480 m et de – 340 à – 300 m. Dans le premier cas, les fabriques planaires faiblement pentées pourraient être engendrées par un effet de toit. Les deux autres correspondent respectivement aux passages entre les unités II et III, puis III et IV.

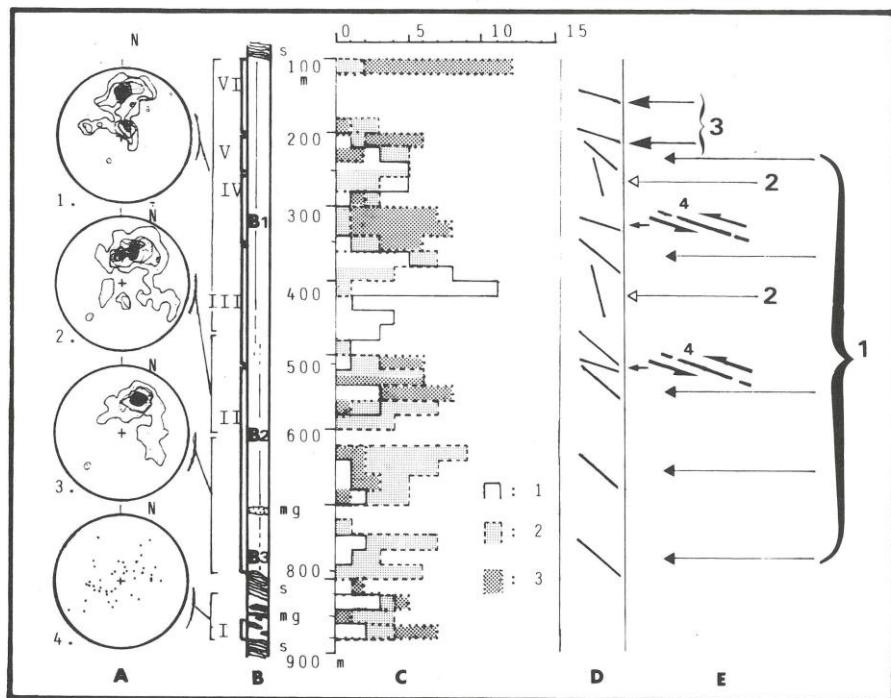


Fig. 1. – Organisation des fabriques planaires magmatiques relevées sur le sondage profond Echa 1 (programme GPF).

A : report sur stéréogrammes de l'ensemble des mesures ; 1, 2, 3 ; Schmidt, hém. inf. ; (1) : 130 mes., 1-3-5-7-10 % ; (2) : 88 mes., 1-3-5-7-10 % ; (3) : 67 mes., 1-5-7-10-15 % ; (4) : Wulff, hém. inf., 31 mes. B : Principales caractéristiques du log de sondage : B 1, B 2, B 3 : dénomination des trois faciès principaux définis par Cuney *et al.*, 1986, I, II, III, IV, V et VI : dénomination des unités définies par Gagny 1987 ; s : schistes, mg : microgranites. C : Histogrammes prenant en compte séparément les variations des pendages des fabriques magmatiques en fonction de la profondeur et selon trois classes : 1 : 55-90°, 2 : 35-55°, 3 : 0-35°. D : Schéma synthétique de l'évolution des pendages de fabriques. E : Interprétation des différentes fabriques : 1 : écoulement du magma ; 2 : redressement du plan d'écoulement ; 3 : effet de toit ; 4 : chevauchement d'unités magmatiques.

Agencement of the magmatic planar fabrics recorded on the (GPF) Echa 1 drill

A : Plot of the measures on stereograms ; 1, 2, 3, schmidt, low. Hem. ; (1) : 130 measures, 1-3-5-7-10 % ; (2) : 88 meas., 1-3-5-7-10 % ; (3) : 67 meas., 1-5-7-10-15 % ; (4) : Wulff, low. hem., 31 meas. B : major features of the drill log ; B 1, B 2, B 3 : designation of three main facies by Cuney and *al.*, 1986 ; s : schist, mg : microgranite. C : Histograms taking into account dip variations of the magmatic fabrics with depth and according with their breakdown in three groups : 1 : 55-90°, 2 : 35-55°, 3 : 0-35°. D : synthetic sketch of the dip evolution of the fabrics. E : interpretation of the different fabrics : 1 : flow of the magma ; 2 : steepening of the flow plane ; 3 : roof effect ; 4 : overthrusting of magmatic units.

2. — Passage entre les unités II et III

a) Organisation des fabriques

Le domaine structuré subhorizontalement englobe largement le passage entre les unités II et III. Il semble s'accompagner de l'inféchissement des pendages des fabriques subverticales à sa proximité (fig. 1) ; ceci permettrait d'envisager la présence d'un cisaillement, tendant à déplacer l'unité III vers le Nord. L'épisode de cisaillement qui serait ainsi enregistré, ne provoque pas d'intensification des textures de déformation qui auraient permis de le situer à un stade tardif-magmatique. Il représente la marque de la compétition subsynchrone de mouvements horizontaux, dont il est un des derniers épisodes, avec le processus de redressement des structures.

b) Existence d'un litage plurimétrique

En coïncidence avec le domaine de séparation entre les unités II et III, un litage plurimétrique caractérisé essentiellement par les variations opposées des abondances en albite et feldspath K (fig. 2) matérialise l'interface entre ces deux unités. Cet interface représente une subdivision majeure qui correspond au passage entre les ensembles B1 et B2 envisagé par Cuney *et al.*, 1986. Deux séquences plurimétriques sont

discernables (fig. 2a) et les passages nets entre faciès sont dénués de perturbations des fluidalités subhorizontales (fig. 2b). Les fabriques faiblement pentées présentent un caractère linéaire avec mise en zone des marqueurs à N90E. Ce type de litage bien individualisé, également recoupé en sondage à -743 m (contact entre les sous-unités IIa et IIb, cf. infra et fig. n° 10, exemple III), semble significatif d'une mise en contact d'unités chimiquement contrastées. Dans les deux exemples connus, le contexte et la polarité de l'organisation des séquences sont les mêmes : une juxtaposition s'opère entre deux granites dont l'un est fortement différencié, enrichi en alumine et en volatiles (unité III pour le litage qui nous intéresse, haut de l'unité IIa pour le litage semblable à -743 m). Dans les séquences, l'albite est fortement concentrée en direction de l'unité la moins différenciée. On peut donc supposer que la diffusion des volatils (Li et F) vers cette dernière, provoque une diminution locale de la solubilité de l'albite et sa cristallisation alors importante en base de séquence (fig. 2a). En arrière, le magma localement appauvri en Na_2O et s'enrichissant de nouveau en lithium et fluor favorise la cristallisation de feldspath K. Le phénomène périodique s'établit, par suite d'une compétition entre la cristallisation accélérée de l'albite vers l'unité la moins différenciée et l'appauvrissement local en Na_2O . Ce litage plurimétrique indique ainsi un déséquilibre chimique entre les ensembles magmatiques mis en contact.

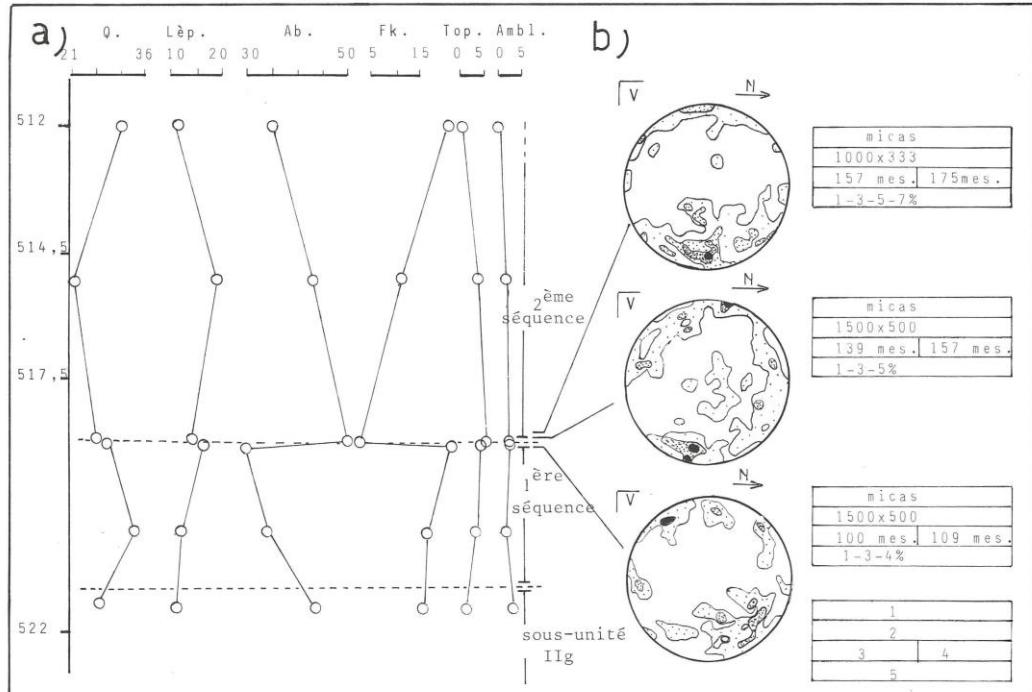


Fig. 2. — Caractéristiques du litage plurimétrique à l'interface entre les unités II et III.

a) : variations modales volumiques des principales phases ; b) : analyses de pétrofabrique réalisées à proximité d'un passage entre séquences (plans de projection verticaux). Correction de l'effet de coupe d'après Courrioux et Jacquot, 1985 ; légende des cartouches : 1 - nature des marqueurs considérés ; 2 - longueur/largeur moyen des marqueurs ; 3 - nombre de mesures réalisées ; 4 - nombre de mesures après correction de l'effet de coupe ; 5 - pourcentages de coupe.

Characteristics of a plurimetric layering at the interface between units II and III.

a) modal variations of the main minerals ; b) : petrofabric analysis realized on a contact between two sequences (vertical projection plane). Cut effect corrected after Courrioux and Jacquot, 1985 ; legends of the notice board : 1 - nature of the considered markers ; 2 - average length/width of the markers ; 3 - number of realized measures ; 4 - number of measures corrected from the cut effect ; 5 - cut percentages.

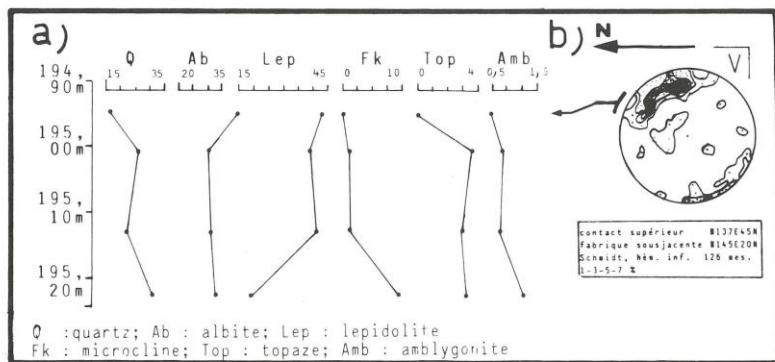


Fig. 3. — Caractéristiques d'une passée albítique d'apparence granoclassée en partie supérieure du sondage Echa I.

a) variations modales volumiques dans cette unité ; b) : orientation des albites au voisinage du contact supérieur de la séquence (le stéréogramme est projeté sur le plan vertical).

Characteristics of an albitic object appearing texturally graded and cut at the top of the Echa I drill;

3. — Passage entre les unités III et IV

A l'instar du contact entre les unités II et III, l'organisation des fabriques suggère un chevauchement vers le Nord de l'unité IV sur l'unité III (fig. 1).

4. — Les faciès albítiques marqueurs du passage entre les unités V et VI

a) Morphologie des passages albítiques

Des passées enrichies en albite d'aspects variés sont recoupées fréquemment entre -190 m et -225 m. Deux types de morphologies principales ont été repérés :

— des niveaux d'épaisseur au plus demi-métrique ayant l'aspect de séquences granoclassées et limités par un contact supérieur net avec le granite (fig. 3).

— des objets de faible épaisseur mais apparemment très allongés (au moins métriques), soit homogènes et présentant un contact net avec le granite environnant (fig. 4.A2), soit hétérogènes (fig. 4.A1) ; dans ce dernier cas, le passage au granite est flou alors que les limites internes entre différents faciès sont bien marquées.

b) Structuration

La pétrofabrique permet d'attribuer une signification de zone de cisaillement magmatique à ces différents objets albítiques :

• Mise en évidence de jeux en cisaillement

Des marqueurs tabulaires soumis à un cisaillement simple dans les conditions générales de l'écoulement magmatique, c'est-à-dire à de faibles taux de cisaillement, sont obliques par rapport à la direction de cisaillement (Blanchard et al., 1979, Fernandez, 1985). L'attitude des marqueurs par rapport au plan de cisaillement est indicatrice du sens de ce cisaillement (fig. 5).

Dans cette optique, une analyse de pétrofabrique permet de comparer l'orientation des marqueurs (albite ou lépidolite) à celle des contacts limitant les faciès albítiques. Des cisaillements principalement à composante verticale sont ainsi mis en évidence, à jeu normal (fig. 3 et 4.A2) ou inverse dans le cas de zone de cisaillement particulièrement complexe (fig. 4.A1).

• Orientation des zones de cisaillement

Les différents objets albítiques relevés en sondage ne semblent pas orientés de façon quelconque (fig. 6). Ils matérialisent des cisaillements E-W à NW-SE à pendage moyen ou fort vers le Nord et sécants sur la structuration subhorizontale du granite environnant. Par leur orientation, ils sont conformes à l'attitude de la bordure Sud du granite des Colettes WNW-ESE légèrement extravasée vers le Sud (Aubert, 1969, Gagny et Jacquot, 1987). De plus, enregistrant des jeux verticaux, ils pourraient représenter un diastrophisme consécutif à la mise en place du granite des Colettes. Cependant, cette dernière impliquerait des jeux en cisaillement inverses qui ne sont pas systématiquement observés. Il serait alors possible d'envisager une compétition entre ce diastrophisme et des affaissements du magma occasionnés par la subsidence de l'encaissant sous-jacent, elle-même à l'origine de la venue du magma de Beauvoir (Jacquot et Gagny, 1987). L'enregistrement d'un jeu donné par une zone de cisaillement dépendrait de l'importance momentanée de l'un des deux phénomènes. Le redressement des structures au sommet de l'apex de Beauvoir (Jacquot et Gagny, 1987) et les zones de cisaillement magmatiques représentent deux impacts différents de la montée du granite des Colettes.

c) Genèse des faciès albítiques

Aux environs de -200 m, les phases minérales tardives sont le quartz, le feldspath K, la topaze et l'amblygonite. Les faciès albítiques sont appauvris en ces minéraux (fig. 3 et 4.B) ; par conséquent, ces faciès ne représentent pas un magma résiduel du granite environnant. Une hypothèse probable serait donc celle d'un accroissement de la cristallisation précoce de l'albite (et lépidolite ?) par suite d'une nucléation

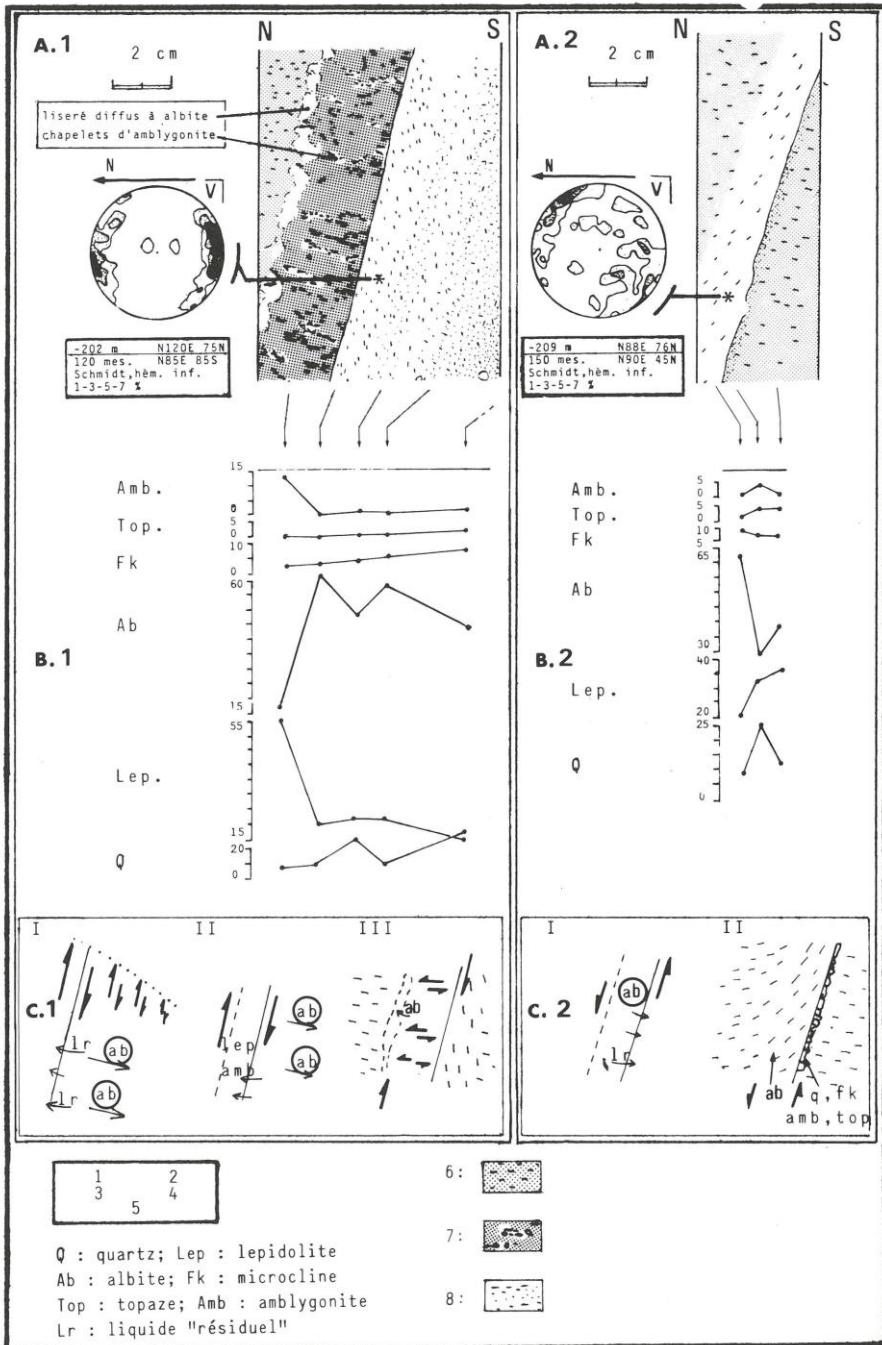


Fig. 4. — Caractéristiques des zones de cisaillement magmatiques en partie supérieure du sondage

A : morphologies des objets étudiés (sections sciées verticales de carottes) et fabriques de l'albite au sein des zones de cisaillement (les stéréogrammes sont projetés sur un plan vertical) ; B : variations modales volumiques au travers de ces zones de cisaillement ; C : schémas interprétatifs de la genèse de ces hétérogénéités magmatiques, —C.1 : I : cristallisation de l'albite et migration mécanique du fait d'un gradient de cisaillement, II : concentration du liquide « résiduel » le long du plan de cisaillement, III : structuration antithétique au cisaillement principal ; —C.2 : I : cristallisation de l'albite au centre de la zone de cisaillement, II : cristallisation des « minéraux résiduels » à l'interface avec le granite. Légende des cartouches : 1 : profondeur de l'objet sur le sondage ; 2 : orientation de la zone de cisaillement ; 3, 4 et 5 : pétrofabrique des lépidolites —3 : nombre de mesures —4 : orientation principale des minéraux —5 : pourcentages de coupures. 6 : granite

« normal » ; 7 : faciès à lépidolite et chapelets d'amblygonite ; 8 : faciès albítique.

Characteristics of magmatic shear zones cut at the top of the drill
A : morphologies of the studied bodies (vertical sawn sections of cores) and albite fabric within shear zones (vertical projection plane) ; B : modal variations through these shear zones ; C : interpretative sketches of the genesis of these magmatic heterogeneities ; —C.1 : I : albite crystallization and its mechanical migration induced by a shear gradient, II : concentration of the « residual » liquid along the shear plane, III : antithetic structuration of the main shear ; —C.2 : I : albite crystallization in the core of the shear zone ; II : crystallization of « residual » minerals at the interface with the granite. Notice boards : 1 : depth of the body in the drill ; 2 : orientation of the shear zone ; 3, 4 and 5 : petrofabric of the lepidolites —3 : number of measures —4 : main orientation of the minerals —5 : cut percentages. 6 : common granite ; 7 : lepidolite facies including strings of amblygonite ; 8 : albític facies.

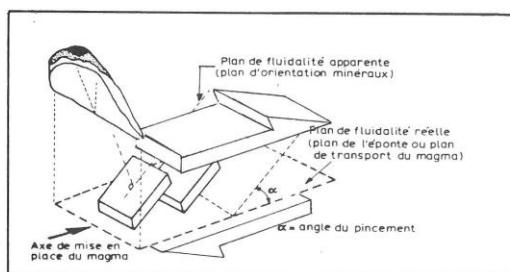


Fig. 5. — Schéma indicatif de l'orientation de marqueurs tabulaires dans un magma soumis à un cisaillement simple. D'après Blanchard et al., 1979, légèrement modifié.

Sketch showing the orientation of tabular markers in a magma under a simple shear. After Blanchard and al., 1979, slightly modified.

intensifiée. Celle-ci serait activée à la faveur des jeux en cisaillement ou d'une plus grande surfusion du magma provoquée par des décompressions locales (Autran et Burnol, 1985). L'agencement de certaines zones de cisaillement n'est que partiellement expliqué : les plus complexes associent zone albitique et bande enrichie en lépidolite et amblygonite, séparées par un interface net (fig. 4.A1). Leur genèse combinerait forte nucléation et migration mécanique de l'albite induite par un gradient de cisaillement, avec le drainage des liquides résiduels du côté opposé, alors enrichis en composants lépidolite et amblygonite. Au sein de ces zones à fortes concentrations en lépidolite et d'après l'exemple de la figure 4.C3, une structuration subhorizontale, antithétique par rapport au jeu inverse majeur, déforme les micas et guide l'accumulation de quartz en amas longiformes subhorizontaux. Par ailleurs, la disposition en chapelet de l'amblygonite semble indiquer une croissance à partir de l'interface avec la zone albitique.

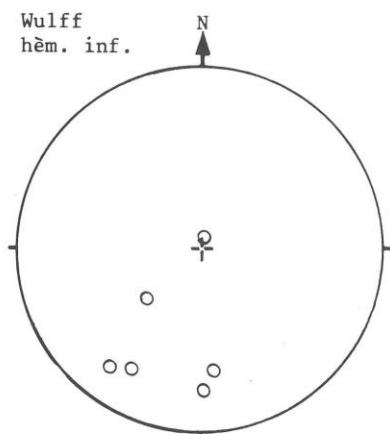


Fig. 6. — Orientation des corps albitiques bien individualisés recoupés par le sondage Echa I en partie supérieure de l'apex de Beauvoir.
Orientation of the well individualized albitic bodies cut by the Echa I drill in the top of the Beauvoir granite. Observe they northward dipping, opposite to that of the granite foliation plane.

d) Signification pétrologique de ces faciès albitiques

Ces faciès albitiques présentent quelques analogies avec les stockscheider (Nesen et Dupuis, 1982) à feldspaths potassiques. Ils exprimeraient la surconcentration d'un alcalin, Na_2O , dans un magma qui, dans le cas des unités V et VI est très évolutif, et sa précipitation brutale sous forme d'albite à l'occasion d'un diastrophisme. Les textures fines différentes de la morphologie en mégacristaux des feldspaths potassiques constitutifs d'un stockscheider. Ceci s'explique bien, en tenant compte du fait que la cristallisation de l'albite et du feldspath potassique sont contrôlées à leur début par des processus distincts, à savoir, respectivement un fort taux de nucléation et une grande vitesse de croissance (Swanson 1977, fig. 7). Les faciès albitiques recoupés en sondage constituent ainsi une ponction en Na_2O à partir du granite environnant. Leur existence contribuerait à la diminution du rapport $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, à la charnière entre les unités V et VI.

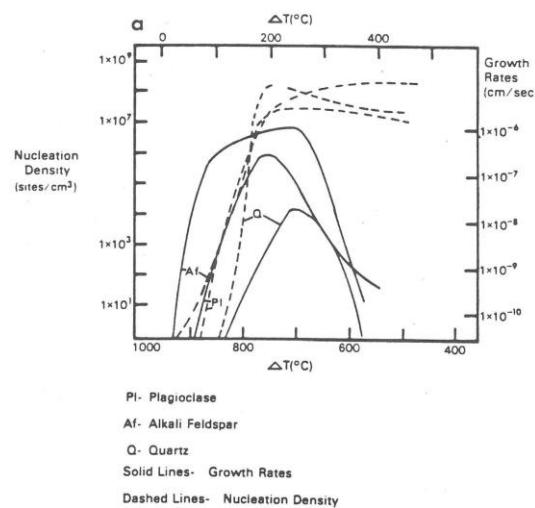


Fig. 7. — Caractéristiques de la cristallisation de la fraction quartzo-feldspathique d'un granite contenant 3,5 % d' H_2O . D'après Swanson, 1977.
Modalities of the crystallization of the quartzo-feldspathic portion of a granite containing 3.5 % H_2O . After Swanson, 1977.

3. — Modalités de mise en place de l'unité II (-790 m à -510 m)

Cette unité est subdivisée en séquences pluridécamétriques sur la base de variations périodiques des teneurs en alumine (Gagny, 1987 ; sous-unités IIa à IIg, fig. 8). Nous nous attacherons à dégager les caractères généraux de sa structuration avant de mettre en évidence des perturbations fines de son organisation. Un phénomène d'enclavage caractérise l'unité II ; il en reflète ainsi une certaine complexité.

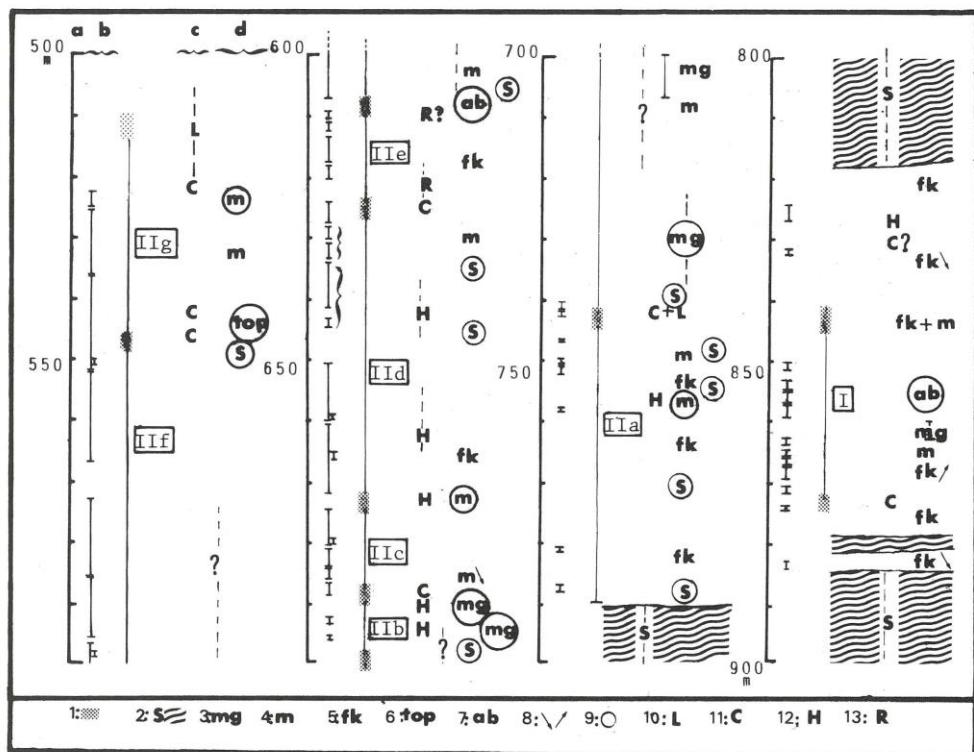


Fig. 8. — Caractéristiques pétrographiques macroscopiques du granite de Beauvoir relevées entre -500 et -900 m sur le sondage Echa I
 a : profondeur ; b : positions des échantillons prélevés ; c : principales zones et nature des hétérogénéités magmatiques ; d : autres faits divers. Symboles utilisés : 1 : zone de transition entre unités géochimiques déduites d'une approche géochimique (Gagny, 1987) ; 2 : principaux panneaux de schistes ; 3 : passes en microgranite ; 4 : faciès enrichi en mica ; 5 : faciès enrichi en feldspath K ; 6 : faciès enrichi en topaze ; 7 : faciès enrichi en albite ; 8 : diminution ou augmentation des abondances apparentes d'un certain minéral relativement aux passées supérieures ; 9 : enclavage, schlieren ou « paquet » d'un minéral donné ; 10 : zone de litage plurimétrique à décimétrique ; 11 : contact entre deux faciès ; 12 : passages hétérogènes « quelconques » ; 13 : récurrences de faciès.

Macroscopic petrographic features of the Beauvoir granite summarized between 500 and 900 m on the Echa I drill.

a : depth ; b : positions of the analysed samples ; c : main magmatic heterogeneities zones and their nature ; d : other events. Used symbols : 1 : transition zones between units defined by geochemical studies ; 2 : main schists fragments ; 3 : microgranite passages ; 4 : mica enriched facies ; 5 : microcline enriched facies ; 6 : topaze enriched facies ; 7 : albite enriched facies ; 8 : observed decrease or increase of the amount of one mineral relatively to passages of higher positions ; 9 : enclave, schlieren, or monomineralic pockets ; 10 : decimetric to plurimetric layering ; 11 : contact between two facies ; 12 : disorganized heterogeneous zones ; 13 : facies recurrence.

1. — Existence d'un phénomène d'enclavage

a) Les enclaves de schistes

Outre les nombreuses occurrences de micaschistes au sein et au toit de l'unité I, des fragments de micaschistes centimétriques à décimétriques, sont observés entre -500 et -790 m (fig. 8). Étant donné leur petite taille, leur présence est assez difficilement interprétable dans l'hypothèse d'une venue en masse de l'ensemble du granite de Beauvoir, accompagnée d'une chute d'enclaves depuis le toit, recoupé à -98 m. En effet, un déplacement de plusieurs centaines de mètres serait improbable, moins à cause de l'augmentation de la viscosité apparente que de l'acquisition par le magma d'une cohésion interne dès le début de la cristallisation : cette cohésion représente une contrainte que devra vaincre une enclave

pour migrer. Ainsi, par comparaison avec les propriétés physiques des magmas basiques moins visqueux (Sparks *et al.*, 1977), des enclaves pluridécimétriques pourraient parfaitement être flottées par le magma granitique de Beauvoir pour des taux de cristallisation de 20 à 30 %.

b) Les enclaves de microgranite

Des passées de microgranite porphyrique sont également recoupées à partir de -690 m (unités I et II, fig. 8). Elles sont de taille inégale, plurimétriques à pluricentimétriques. La nature des relations entre granite et microgranite permet d'envisager une mise en place synchrone des deux magmas. Il existe en effet des figures de mélanges magmatiques soit par désagrégation du microgranite par le granite (vers -690 m), soit par démantèlement du granite en contact avec

le microgranite : l'observation détaillée des bordures d'une passée microgranitique (entre -860,15 m et -861,95 m) montre l'infiltration de filets microgranitiques millimétriques au sein du granite. L'accentuation du phénomène conduit à l'enclavage et au démantèlement de ce dernier. Les figures de mélanges mécaniques s'accompagnent de perturbation des conditions de cristallisation ; aux contacts, le granite présente une frange pluricentimétrique enrichie en quartz à proximité de la bordure puis en feldspath K. Ces relations soulignent le caractère contemporain des processus de cristallisation et l'image de contacts nous entre magmas fait appel au concept « d'éponges mobiles » (Bertaux et Gagny, 1978). D'autre part, l'observation à l'œil ne permet pas de dénoter des variations significatives des abondances en phénocristaux dans le microgranite : il n'y a donc pas migration mécanique des minéraux. Ceci indique l'absence d'un gradient de vitesse d'écoulement au sein des passées de microgranite qu'aurait impliqué l'autonomie de l'intrusion microgranitique vis-à-vis

du granite. Les deux matériaux sont ainsi entraînés dans un même écoulement. Les différences de textures se rapportent aux contrastes géochimiques entre les deux corps, d'où résultent un contraste dans les températures de cristallisation (Pichavant et al., 1987 - ce volume).

On peut se poser le problème de la provenance de ce microgranite. Ses paragenèses sont transformées par la surimposition de l'activité hydrothermale du granite environnant (Monier et Tegyey, 1985) mais les éléments présentés ci-dessus montrent qu'il a coexisté à l'état magmatique avec le magma de Beauvoir. Le microgranite pourrait correspondre aux faciès peu évolués du granite de Beauvoir ainsi que le suggèrent des analyses roche totale et les teneurs en rubidium (fig. 2 in Gagny, 1987). Le magma « microgranitique » serait émis par un stock précurseur de la venue de l'ensemble du magma « granitique » de Beauvoir plus différencié et aurait été démantelé par la mise en place de ce dernier.

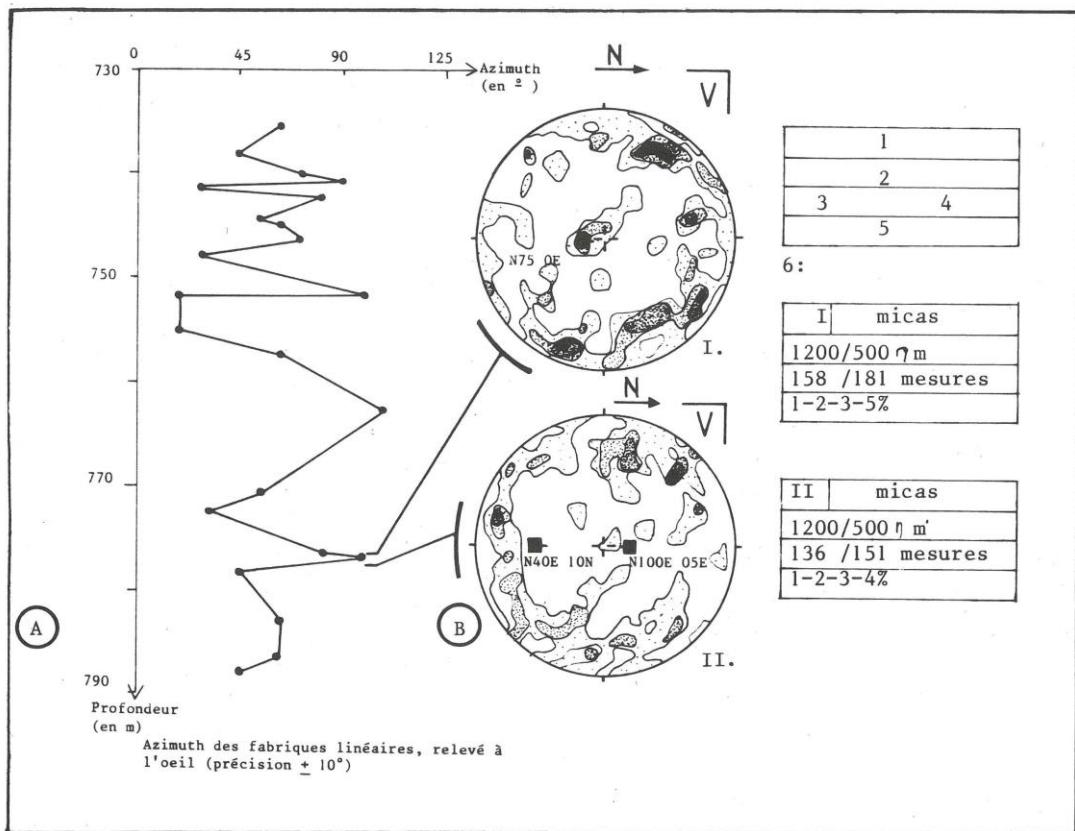


Fig. 9. — Variations d'altitude des fabriques linéaires de -730 à -790 m. A : relevé à l'œil des azimuths des fabriques linéaires sur des carottes de sondage ; B : analyse de pétrofabrique marquant la variation à l'échelle décimétrique du style de la structuration. Deux axes de mise en zone peuvent être mis en évidence ; 6 : axe de mise en zone. Schmidt, hém, inf, plan de projection vertical.

Altitude variations of linear fabrics between 730 and 790 m.

A : reading of azimuths of linear fabrics on drill cores ; B : petrofabric analysis showing variations of structuration style on a decimetric scale. Two axis of girdle can be shown ; 1 to 5 : cut effect correction (see figure 2) ; 6 : axis of girdle. Schmidt net, low-hem., vertical projection plane.

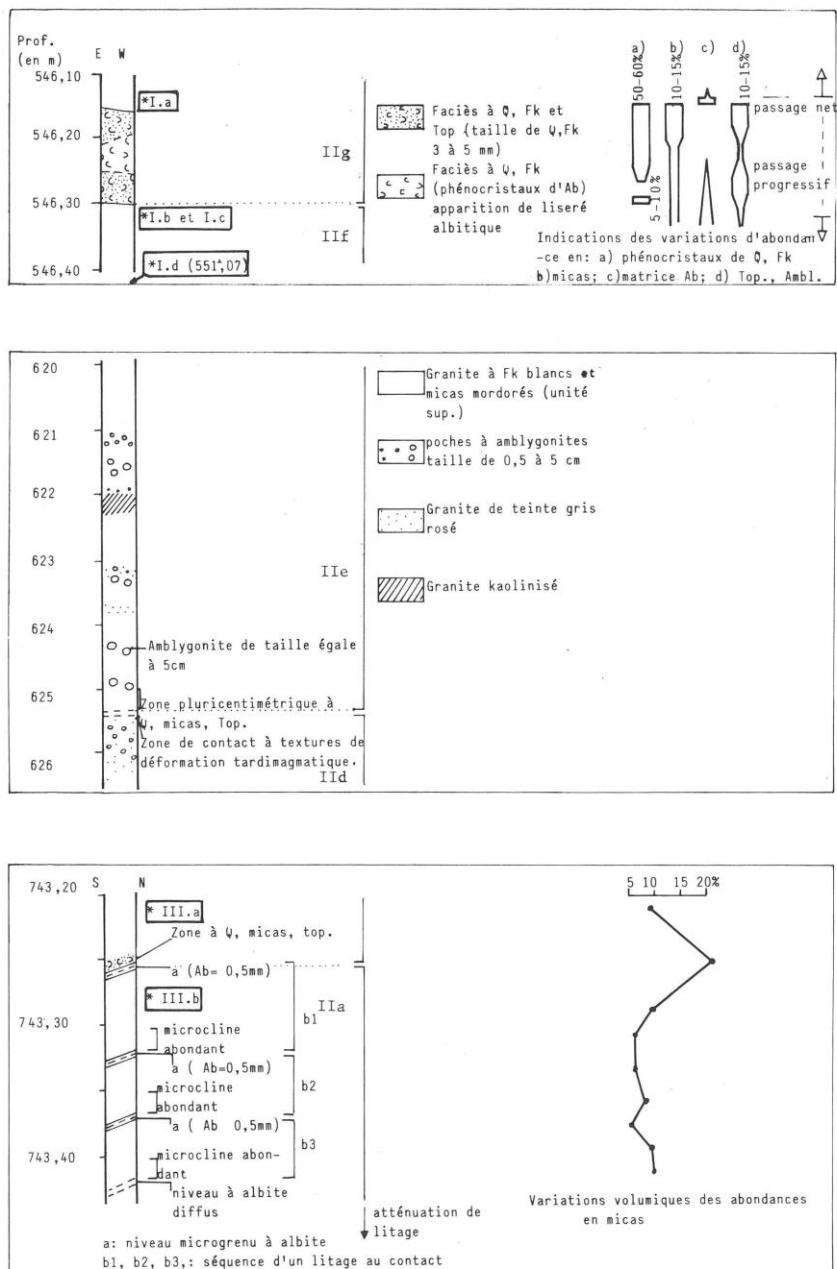


Fig. 10. — Hétérogénéités des zones de contact entre sous-unités constitutives de l'unité II. Illustration de leur diversité.

(schémas d'après sections sciées de carottes de sondage) ; Q : quartz ; Fk : feldspath potassique ; Ab : albite ; Top. : topaze ; Ambl. : amblygonite. Les astérisques sont indicateurs d'analyses de pétrofabrique et se rapportent aux stéréogrammes de la fig. 12.

Heterogeneities of the contact zones between constituent sub-units of the unit II. Display of their diversity (sketches from sawn sections of drill cores);

Q : quartz ; Fk : potassic felspar ; Ab : albite ; Top. : topaze ; amb. : amblygonite.

* position of the stereonets of fig. 12

2. — Organisation générale des fabriques magmatiques

Les fluidalités planaires sont d'orientation assez constante, N120E pentées de 30 à 50° vers le Sud. Des fluidalités linéaires leur sont associées et correspondent à la mise en zone des marques planaires. Leur présence en partie inférieure du caisson est liée aux caractères texturaux du granite : l'existence de phénocristaux (quartz et microcline) d'apparition précoce, sur lesquels se moulent les minéraux à habitus planaire (albite et micas). Afin d'apprécier l'évolution de ces structures, un relevé a été effectué entre -730 et -790 m, passage où elles sont relativement repérables à l'œil. Les directions de fabriques linéaires fluctuent fréquemment, d'orientations subméridiennes à N120E (fig. 9A) ; de plus, leurs variations peuvent s'opérer sur de courtes distances aboutissant à un changement de style (caractère plus ou moins linéaire ou planaire) et même à l'acquisition de deux axes de mise en zone (fig. 9B ; Gagny et Jacquot, 1985). Les fluctuations de structuration indiqueraient des modifications du régime d'écoulement avec existence de gradients de vitesse à petite échelle. Ceci traduirait un déplacement lit par lit de faible épaisseur. Au sein de chacun de ces feuillets magmatiques, et tels que l'ont expérimenté Gilbert et Merle en 1987 pour des situations analogues (nappes en cours d'étalement), les fabriques linéaires se distribueraient selon des

orientations très diverses, parallèles à perpendiculaires à une direction générale d'écoulement, en fonction de leur position structurale dans la lame déformée pendant le déplacement. En conséquence, les changements observés marqueraient un écoulement hétérogène se manifestant à échelle plurimétrique.

3. — Mise en évidence de discontinuités structurales entre sous-unités

La plupart des hétérogénéités magmatiques se regroupent dans les zones de passage entre sous-unités (fig. 8). Elles sont d'aspects variés (fig. 10) et d'extensions souvent plurimétriques. Toutefois, un type de passée à quartz et minéraux alumineux, commun à toutes les hétérogénéités, permet de définir ponctuellement les interfaces entre sous-unités (excepté dans quelques zones par défaut d'observations du fait d'un hydrothermalisme surimposé ou d'une mauvaise qualité des carottes).

a) Aspects texturaux des interfaces entre sous-unités

En sommet de la sous-unité IIa et aux passages entre les sous-unités IIc et IID, IId et IIe ainsi que IIf et IIg, un interface

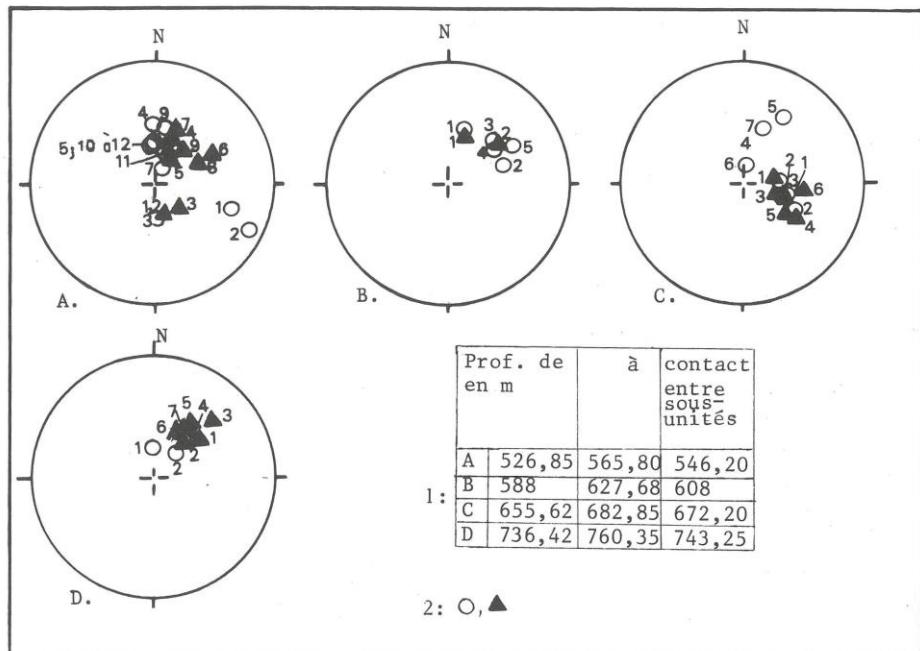


Fig. 11. — Report sur canevas de Wulff des pôles de mesures de fabriques planaires relevées à proximité d'interfaces entre sous-unités constitutives de l'unité II ; Wulff, hém. inf.

Wulff net producing poles of magmatic fabrics measures recorded near interfaces of constituent sub-units of the unit II ; Wulff, low. hem.

1 : notice board indicating inquired zones and heights of contacts between sub-units ; 2 : measures from respectively portions above and below interfaces. The carried numbers increased with the distance from the contact.

1 : notice board indicating inquired zones and heights of contacts between sub-units ; 2 : measures from respectively portions above and below interfaces. The carried numbers increased with the distance from the contact.

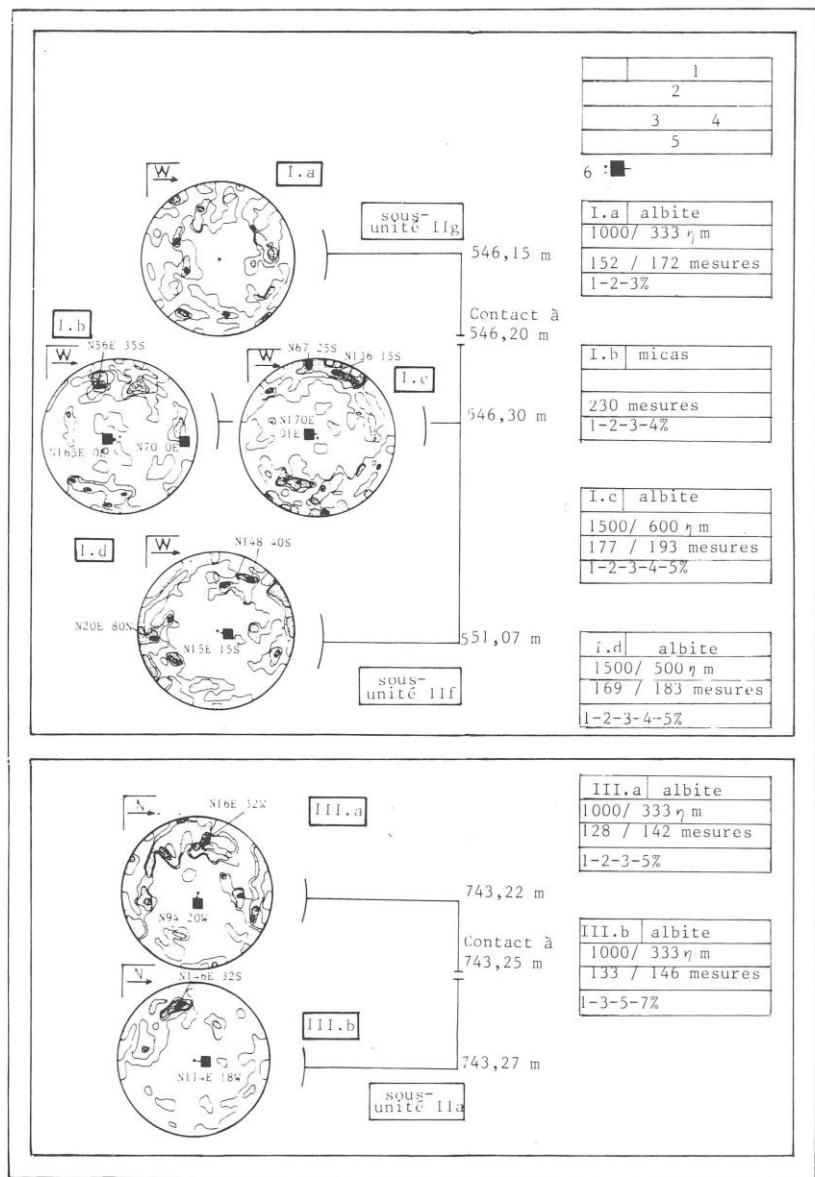


Fig. 12. — Structuration magmatique de part et d'autre d'interfaces entre sous-unités constitutives de l'unité II du granite de Beauvoir (exemples I et III de la fig. 10).

Diagrammes d'isodensité des orientations des pôles de plans de macle (001) de l'albite ou de clivages des micas. Schmidt, hèm. inf., plans de projection verticaux. Les positions des diagrammes sont indiquées sur la fig. 10. Légende des cartouches, voir fig. 2.

Magmatic structuration on both sides of constituent sub-units of the unit II (examples I and III from the figure 5).

Preferred orientations of the poles of twin (001) plane of albite or micas cleavage. Schmidt, low. hem., vertical projection planes. The sites corresponding to the nets are indicated in the figure 10 (see figure 2 for the notice board legends).

se définit par un contact entre deux faciès d'aspects contrastés, suturé par une frange centimétrique à décimétrique à quartz et minéraux alumineux abondants (micas, topaze). Nous insisterons sur certaines caractéristiques de ces franges, significatives d'un type d'interaction entre sous-unités contiguës. La forte cristallisation de phases telles que les micas et la topaze seraient conditionnées par deux facteurs. La diffusion d'éléments se couplerait avec les changements de processus de cristallisation susceptibles d'exister de part et d'autre d'un interface à la faveur d'un contraste chimique. En effet, les liquides magmatiques apparaissent notamment plus enrichis en Al_2O_3 , en sommet qu'en base de sous-unités. Ainsi, la diffusion de Al_2O_3 de bas en haut à travers un interface renforcerait la cristallisation de micas (enrichissement en Al_2O_3 dans un milieu moins dépourvu en K_2O) et de topaze (enrichissement en Al_2O_3 dans un milieu plus riche en SiO_2 , favorisant une apparition plus précoce de cette phase). Ce phénomène singulier de cristallisation témoigne d'un déséquilibre entre deux liquides magmatiques et résulterait de la mise en contact de passées magmatiques, à l'origine éloignées l'une de l'autre.

b) Les perturbations structurales aux bordures entre sous-unités

• Organisation des fabriques planaires à proximité des bordures

La comparaison sur stéréogrammes des fabriques planaires (quand elles ont pu être mesurées), présentes sur des secteurs décamétriques de part et d'autre d'interfaces entre

sous-unités, montre que la structuration des interfaces peut prendre des aspects variés :

- les fluidalités peuvent être légèrement différentes d'une unité à l'autre et même à proximité de l'interface (fig. 11, A et C). L'écoulement en base de l'une peut se conformer à l'unité sous-jacente (fig. 11, C).
- la structuration peut être semblable dans les deux unités (fig. 11, B et D), seulement perturbée à proximité de l'interface (fig. 11, D).

• Perturbations des fabriques au niveau des interfaces

L'analyse de la pétrofabrique détermine de part et d'autre d'un contact, des variations d'intensité de structuration (désorganisation de la fabrique ; fig. 12, exemple Ia) ou changement de style de structuration (caractères plus ou moins planaires ou linéaires ; fig. 12, exemple III). Notons que pour les deux exemples présentés, des changements d'attitude des fabriques avaient déjà été décelés à échelle décimétrique. Ils montrent par ailleurs le caractère non spécifique de l'attitude des fabriques linéaires, tout aussi bien submeridien (fig. 12, exemple I) ou à N90-N100E (fig. 12, exemple III), à proximité de zones de contact.

Les changements ou les perturbations des fluidalités à proximité des interfaces pourraient être indicateurs d'écoulement relativement distinct de chacune des unités en contact.

Un tableau permet de résumer les différents faits, en général assez ténus, représentatifs de perturbations des zones de contact entre sous-unités (tabl. 1).

interfaces entre sous-unités	cote des interfaces	nature de l'interface	autres faits près des interfaces	fabriques	
				variations des fabriques planaires (échelle décimétrique)	perturbation de part et d'autre de l'interface (échelle millimétrique)
IIf et IIg	546,20	contact avec frange à Q et minéraux alumineux	poche représentant un liquide résiduel enrichi en top. et Al	oui	oui
IIe et IIf	608-610	changement de faciès : contact non définissable	récurrence de faciès ; emplacement supposé du contact kaolinisé	apparemment non	?
IId et IIe	625,50	contact avec frange à Q et minéraux alumineux	récurrence de faciès (interprété par un remaniement)	?	?
IIc et IId	672,20	contact avec frange à Q et minéraux alumineux	faciès fins	oui	?
IIb et IIc	695	zone non relevée avec précision (carottes fracturées)	nombreuses hétérogénéités, «enclaves» de microgranite	?	?
IIa (bordure supérieure)	743,25	contact : frange à Q et minéraux alumineux	litage bien exprimé en sommet de séquence inférieure	oui	oui

Tabl. 1. — Tableau récapitulatif des zones de contact entre sous-unités (IIa à IIg).
Tabulation recapitulating of contact zones between sub-units (IIa to IIg).

4. – Discussion

Les différents traits structuraux précédemment exposés amènent à préciser deux aspects essentiels de la dynamique de mise en place du magma de Beauvoir qui sont :

- la définition de l'axe d'injection du magma dans son caisson
- l'hypothèse de la mise en place sous forme de plusieurs injections de magmas.

1. – Recherche de l'axe d'injection du magma de Beauvoir

Nous avons vu que les fabriques linéaires changent fréquemment d'attitude et que par conséquent, elles ne peuvent servir de marqueur fiable d'un vecteur général de mise en place. Aussi, seules les données de la géologie de surface apportent des éléments de réponse : le magma de Beauvoir s'intruderait dans un caisson allongé à N20°E. En effet, différents éléments, fracturation, réseaux filoniers qui délimiteraient ce caisson (Jacquot et Gagny, 1987), fortes anomalies géochimiques en Li et F (Aubert 1969, Burnol et Viallefond, 1984) traceurs d'une activité magmatique de type Beauvoir, anomalies gravimétriques (Gable 1977 in : Vigneresse, 1985) appuient l'importance de cette direction. Il est donc concevable d'envisager un axe d'écoulement conforme à l'allongement du caisson avec montée du magma du Sud vers le Nord. Les fabriques planaires s'intègrent bien dans ce modèle puisque leur azimuth est, en général, perpendiculaire à l'axe du caisson et leur pendage sud à sud-ouest. Les fabriques linéaires seraient, selon les cas, acquises perpendiculairement à l'axe d'écoulement, ou tendraient à se paralléliser au vecteur d'écoulement à cause de l'intensification du flux magmatique. Cette direction N20°E n'est pas rapportée uniquement aux phénomènes de surface puisqu'elle peut s'exprimer sous forme de fabriques en profondeur (voir fig. 9, fig. 11 A, fig. 12, diagramme 1a entre -540 et -550 m).

2. – Discussion sur un mécanisme d'empilement d'unités magmatiques successives

a) Les hétérogénéités de l'écoulement

Certains faits montrent l'existence d'un écoulement hétérogène. Celui-ci est perceptible à petite échelle dans l'unité II et s'exprime à grande échelle dans des glissements entre unités : les domaines structurés subhorizontalement à -300 m et -500 m sont interprétés comme étant le résultat d'épisodes de chevauchement vers le Nord de l'unité III sur l'unité II et de l'unité IV sur l'unité III. Ces mouvements, dernières pulsions de la mise en place depuis le Sud, seraient en compétition avec le redressement de la structuration sans être incompatibles avec ce dernier phénomène ; les ultimes étapes de subsidence de l'encaissant libèrent l'espace nécessaire à l'empilement du magma, et d'autre part des cisaillements verticaux mis en évidence en partie apicale peuvent compenser les mouvements horizontaux de l'écoulement du Sud vers le Nord.

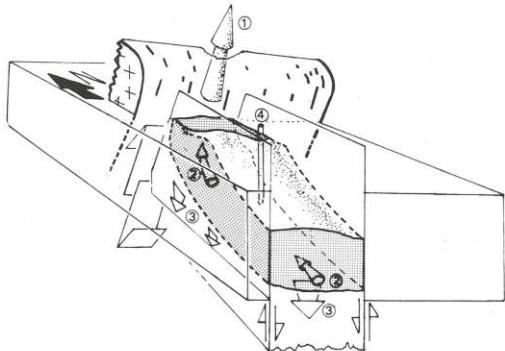


Fig. 13. – Schéma de mise en place du granite de Beauvoir vers le Nord avec ouverture d'un caisson.

1 : axe de mise en place du granite des Colettes ; 2 : écoulement du granite de Beauvoir ; 3 : effondrement des schistes, conséquence de l'intrusion du granite des Colettes ; 4 : emplacement du sondage Echa I.

Sketch of the Beauvoir granite emplacement with opening of a coffer towards the North.

1 : emplacement axis of the Colettes granite ; 2 : flow vector of the Beauvoir granite ; 3 : caving in of the schists as a consequence of Colettes granite intrusion ; 4 : situation of the Echa I drill.

La structuration des unités supérieures est plus redressée qu'en base du caisson. Ceci s'explique par la géométrie du corps : le parcours des différentes unités est incurvé par la mise en place du granite des Colettes (fig. 13). Les unités III à VI se situent en position interne vis-à-vis de cette zone infléchie et leur structuration est contrôlée par un rayon de courbure plus faible qu'en partie basse du caisson, conduisant alors à des pendages en moyenne plus élevés des fabriques en haut du sondage.

b) Mise en place de venues magmatiques successives

D'autres faits seraient en faveur de l'empilement de plusieurs venues magmatiques dans le caisson. Une première ouverture a provoqué l'intrusion de l'unité I ; celle-ci a fortement bréchifié son encaissant. Étant isolée du corps principal, elle a pu évoluer pour son propre compte (Gagny, 1987). Au sein de l'unité II (entre sous-unités) et entre celle-ci et l'unité III, des particularités texturales et des litages sont interprétés comme étant la marque de réactions entre liquides magmatiques en déséquilibre. Les différents stocks en contact ont dû être suffisamment éloignés les uns des autres à un moment donné pour évoluer de façon relativement indépendante, avant d'être superposés.

La mise en place de l'unité II apparaît complexe. La présence d'enclaves disséminées est un argument supplémentaire en faveur de l'autonomie originelle des sous-unités pluri-décamétriques. Étant délivrées successivement, elles auraient raboté leur encaissant, entraînant des enclaves de schistes, et démantelé progressivement un stock de micro-granite. Cependant, même si des changements ténus sont relevés à proximité des interfaces, les fluidalités magmatiques n'enregistrent, en général, pas de déconnexions importantes entre les écoulements des sous-unités en contact. L'ensemble de l'unité II est organisé selon une fabrique plane homogène à grande échelle, moyennement pentée vers le Sud. Il serait alors possible d'envisager l'empilement des sous-unités simultanément à un mouvement général de mise

en place de l'unité II en cours de constitution. Cette unité composite serait entièrement formée lors de son arrivée dans le caisson.

La venue des unités III à VI (ensemble B I) correspondrait à un troisième épisode majeur d'accrétion du caisson. L'importance du litage à la bordure inférieure témoignerait de la position originellement distante de l'unité III vis-à-vis de l'unité II. Par comparaison, et étant donné l'absence de fortes discontinuités géochimiques et hétérogénéités magmatiques, le chevauchement de l'unité IV sur l'unité III serait d'ampleur moindre.

5. — Conclusion

La formation du caisson correspond à un mécanisme intermédiaire entre deux situations extrêmes qui sont :

- un écoulement laminaire hétérogène caractérisant une intrusion en masse du magma de Beauvoir, et dont les conséquences sont perceptibles à différentes échelles, plurimétriques à hectométriques,
- une accrétion de la pile magmatique à la faveur de venues distinctes et successives du magma.

Les faits structuraux sont en faveur de trois épisodes principaux d'ouverture du caisson qui donnent lieu à :

- la venue de l'unité I
- la délivrance de l'unité II composite, dont la dynamique procède d'un mécanisme en deux temps : accrétion de cette unité puis empilement dans le caisson
- la venue des unités III à VI dont les structures sont incurvées à la verticale mais perturbées quasi-simultanément par les dernières pulsions de l'injection du magma vers le Nord.

Références bibliographiques

- AUBERT G. (1969). — Les coupoles granitiques de Montebras et d'Échassières (Massif central français) et la genèse de leur minéralisation en Étain, Lithium, Tungstène et Beryllium. Mémoire du BRGM, n° 46, 1T, 349 p.
- AUTRAN A., BURNOL L. (1985). — Documents du BRGM n° 100 p. 5-41
- ARZIA A.-A. (1978). — Critical phenomena in the rheology of partially melted rocks. *Tectonophysics*, **44**, pp. 173-184.
- BERTAUX J., GAGNY Cl. (1978). — Apport de la pétrologie structurale à l'étude de filons de microgranite intrusifs dans les tufs anthracifères (Viséen de la région de Roanne, Loire). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7) **20**, n° 6, pp. 883-887.
- BLANCHARD J. Ph., BOYER P., GAGNY Cl. (1979). — Un nouveau critère de sens de mise en place dans une caisse filonienne : le « pincement » des minéraux aux épontes. *Tectonophysics*, **53**, pp. 1-25.
- BURNOL L., VIALLEFOND L. (1984). — Géochimie complémentaire en sols à Échassières (Allier). Résultats préliminaires. Programme Géologie Profonde de la France, Documents du BRGM n° 81-8, pp. 57-85.
- COURRIOUX G., JACQUOT Th. (1984). — Etude de l'effet de coupe dans l'interprétation des diagrammes de pétrofabrique : application au granite de Beauvoir (Échassières, Massif central français). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **299**, (2), pp. 549-554.
- CUNEA M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON Ph., FEYBESSE J.-L., GAGNY Cl., JACQUOT Th., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G. et TEGYEV M. (1986) — Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur la coupole de granite albítique à topaze-lépidolite de Beauvoir (Massif central, France). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **303**, (2), n° 7, pp. 569-574.
- FERNANDEZ A. (1985). — Etude théorique et expérimentale du développement de la fabrique dans les roches magmatiques. Application à l'étude structurale des granitoïdes. Thèse d'état, Université de Clermont-Ferrand, 238 p.
- GAGNY Cl. (1987). — Organisation séquentielle évolutive des intrusions successives du granite de Beauvoir dans son caisson : Arguments géochimiques. (Ce volume).
- GAGNY Cl., JACQUOT Th. (1985). — Présentation de quelques problèmes mis en évidence par la pétrologie structurale. Forage profond Échassières n° 1 sur le granite de Beauvoir. Programme Géologie Profonde de la France, Documents du BRGM n° 100, p. 137-164.
- GAGNY Cl., JACQUOT Th. (1987). — Contribution de la pétrologie structurale à la connaissance des conditions de mise en place et de structuration complexe du granite des Colettes (Massif d'Échassières, Massif central français). (ce volume).
- GILBERT E., MERLE O. (1987). — Extrusion and radial spreading beyond a closing channel. *J. Struct. Geol.*, 9, n° 4, pp. 481-490.
- JACQUOT Th., GAGNY Cl. (1987). — Pétrologie structurale du granite de Beauvoir (massif d'Échassières) : données et interprétation à son niveau apical. (ce volume).
- MONIER G., TEGYEV M. (1985). — Etude pétrographique préliminaire. Programme Géologie Profonde de la France, Documents du BRGM n° 100, pp. 41-93.
- NESEN G., DUPUIS Ch. (1982). — Position structurale des « stockscheider » et leur rapport avec la minéralisation Sn. W. Mo. 106^e Congrès National des Sociétés Savantes, Perpignan. Fasc. III, pp. 197-208.
- SPARKS R.-S.-J., PINKERTON H., MACDONALD R. (1977). — The transport of xenoliths in magmas. *Earth and Planet. Sci. Letters*, **35**, pp. 234-238.
- SWANSON E. (1977). — Relation of nucleation and crystal growth rate to the development of granitic textures. *Amer. Miner.*, **62**, pp. 966-978.
- VIGNERESSE J.-L., MENICHETTI V., CANNAT M. (1985). — Interprétation gravimétrique du massif granitique d'Échassières. Programme Géologie Profonde de la France, Documents du BRGM n° 95-8, pp. 81-91.