

Log des susceptibilités magnétiques et anisotropies de susceptibilité dans le granite de Beauvoir : conséquences pour sa mise en place

Jean-Luc Bouchez¹, Sylvie Bernier², Pierre Rochette³
Bruno Guineberteau⁴

Mots clés : Granite (Granite Beauvoir), Susceptibilité magnétique, Anisotropie, Cisaillement, Modèle, Mise en place, Orogénie hercynienne, Allier (Échassières).

Résumé

La mesure de la susceptibilité magnétique et de l'anisotropie de la susceptibilité de la carotte orientée du granite de Beauvoir a été réalisée sur 54 tronçons répartis entre 99 et 864 m. On montre que la susceptibilité est la somme d'une composante diamagnétique isotrope (quartz, feldspath) et d'une composante paramagnétique anisotrope, due essentiellement à Fe^{2+} et accessoirement à Fe^{3+} et Mn^{2+} , contenus dans le mica lépidolite-zinnwaldite. La fabrique (magnétique) planaire est orientée en moyenne à N 103° SSW 39°, faiblement en zone autour de la linéation (magnétique) orientée en moyenne à N 102° W 03°. On montre que l'anisotropie subit de brusques accroissements au voisinage des limites des faciès B1/B2 [480 m], B2/B3 [746 m] et d'une limite située vers 311 m, appelée B11/B12. Dans ces domaines les plus anisotropes, ainsi que dans la moitié supérieure du faciès B2, l'ensemble représentant un tiers de la section du granite, la linéation est particulièrement bien réglée selon une direction WNW-ESE, subhorizontale, la foliation se rapprochant de l'horizontalité au moins dans la section [480-590 m]. Allié aux arguments d'une étude microstructurale sur l'orientation des micas et des albites, cette géométrie s'interprète comme due à un cisaillement intragranitique à l'état visqueux, subhorizontal et orienté selon WNW-ESE. La déformation cisallante se place préférentiellement aux bordures des « bouffées » magmatiques successives.

Une telle cinématique peut s'intégrer au modèle développé récemment pour le Massif central occidental (Bouchez et Jover, 1986; Jover et Bouchez, 1986), où les séries métamorphiques et les granitoïdes qui s'y mettent en place, sont considérés comme formant une pile cisallante-chevauchante selon SE-NW, pendant au moins 30 Ma [360-330 Ma]. Les granitoïdes les plus tardifs, tel celui de Beauvoir [300-310 Ma], sont le site où le cisaillement peut se concentrer, au sein d'une pile métamorphique déjà rigide.

Abstract

Magnetic susceptibility and anisotropy of susceptibility of the Beauvoir granite (Échassières Coring Program GPF)

Systematic measurement of the magnetic susceptibility, and of the anisotropy of susceptibility, has been undertaken on the in-situ oriented core of the Beauvoir granite (Échassières coring Program GPF). 40 regularly spaced, and 14 additional stations along the core, between 99 m and 864 m, have been re-cored and oriented for the measurements, giving 157 individual sets of data (Raw data in Annex). It is shown that no ferromagnetic component is present in the granite. Conformably to the model of Hrouda (1986) it is shown here that the susceptibility is the addition of an isotropic diamagnetic component, that of quartz and feldspar deduced to be close to $-14 \cdot 10^{-6}$ SI, and of an anisotropic paramagnetic component due mainly to Fe^{2+} , and accessorially to Fe^{3+} and Mn^{2+} , contained in the phyllosilicate phase (lepidolite-zinnwaldite).

The magnetic planar fabric has an average orientation of N103° SSW 39°, weakly disposed in a zone around the magnetic linear fabric, the average orientation of which is N102° W 03°. The anisotropy is observed to rapidly increase (from less than 2 % up to 5 %) toward, and more precisely under, the boundaries limiting the B1/B2 [480 m] and the B2/B3 [746 m] sub-types (fig. 1). Such a character, also clearly marked around 311 m, helps to subdivide the B1 subtype into B11 and B12. Within these anisotropic domains, as well as within the upper half of the B2 subtype, and although the planar anisotropy degree keeps higher than the linear one, the lineation is particularly well oriented toward a direction close to WNW-ESE and subhorizontal, along with a tendency of the foliation to approach horizontality. Such a geometry is interpreted in terms of intragranitic shear. A microstructural study of the shape fabric of the micas and the albite grains confirms that the magnetic fabric is directly

(1) Laboratoire de Pétrophysique et Tectonique, Université Paul Sabatier, 38, rue des Trente-six Ponts, 31400 Toulouse.

(2) Laboratoire de Géologie Structurale, Université de Paris Sud, Bât. 504, 91405 Orsay.

(3) LGIT-Observatoire et IRIGM, Université de Grenoble, BP 68, 38402 Saint-Martin-d'Hyères.

(4) Laboratoire de Tectonophysique, Université de Nantes, 2, rue de la Houssinière, 44072 Nantes.

related to the mica fabric. By reference to the model of Fernandez *et al.* (1983) which considers the shape fabric of anisotropic markers embedded in a viscous matrix deforming in simple shear, our fabrics strongly suggest an origin by shear at the viscous state, strengthening the latter interpretation.

It is therefore proposed that several batches successively injected toward a volume of magma which was preferentially sheared during emplacement along the different batch-boundaries, according to a WNW-ESE horizontal direction (sense unknown). This interpretation can fit with the kinematic model developed for the western french Massif central (Bouchez and Jover, 1986; and Jover and Bouchez, 1986) which considers that a whole metamorphic pile was horizontally sheared toward the West during upper Devonian to Carboniferous times (360-330 Ma and possibly later). It could be concluded that the late magma batches such that of Beauvoir (300-310 Ma ?) were preferential decoupling sites within the solidifying metamorphic pile.

La carotte d'environ 900 m, subverticale et orientée, du sondage GPF-ECH.1 d'Échassières fournit un matériel de choix pour une étude structurale détaillée, destinée à reconstituer la cinématique de mise en place du granite de Beauvoir dans son encaissant de micaschistes de la série de la Sioule. Dans cette note, l'étude structurale, exclusivement relative au granite de Beauvoir (98 m-878 m), est abordée par l'anisotropie de la susceptibilité magnétique (ASM). Les premiers résultats de cette étude ont été présentés par Bernier (1986) et Bernier *et al.* (1987). Avant de traiter l'anisotropie, on présentera l'échantillonnage ainsi que les principaux résultats relatifs à la susceptibilité elle-même (SM).

Rappelons que l'on rencontre trois faciès de granite (Cuney *et al.*, 1986) : B1 (97 m-480 m : très clair et riche en albite et lépidolite), B2 (480 m-746 m : à aspect de leucogranite grenu) et B3 (746 m-878 m : plus ferrifère et à feldspath potassique rose). Par ailleurs, entre 789 m et 878 m au sein de B3, s'intercalent 18 panneaux de micaschistes très semblables à ceux du toit (0 m-97 m) et d'épaisseur comprise entre 0,1 m et 20 m.

1. — Échantillonnage et mesures

157 échantillons orientés, en petit diamètre (83 éch. ; $d = 25$ mm ; $h = 20$ mm) ou en gros diamètre (74 éch. ; $d = 46$ mm ; $h = 40$ mm) ont été re-carottés parallèlement à l'axe de la carotte du sondage, répartis sur 54 tronçons entre 99,4 m et 864,1 m. Parmi ces tronçons, 40 sont régulièrement espacés sur la hauteur, et 14 sont concentrés autour de : a) 330,35 m (au cœur du faciès B1) ; b) 490,05 m (sous la limite des faciès B1 et B2) ; c) 568,49 m (au cœur du faciès B2), et d) 749,88 m (à la limite des faciès B2 et B3). Ces concentrations d'échantillons sont destinées, a) à fournir des indications de variabilité et b) à cerner les transitions de faciès B1/B2 et B2/B3.

L'outil utilisé, pour le re-carottage et la coupe, est amagnétique. La susceptibilité magnétique et l'ASM ont été mesurées en même temps sur l'appareillage Kappabridge KLY2 du LGIT/IRIGM, particulièrement bien adapté aux échantillons faiblement susceptibles et faiblement anisotropes. Cet appareil, basé sur le principe d'autocompensation, avec remise à zéro et compensation de la dérive thermique automatique, travaille sous un champ de 300 A/m à 720 Hz, créé par une bobine à axe vertical. Les données brutes relatives aux 157 échantillons sont présentées en Annexe (voir légende pour la signification des 18 variables associées à chaque échantillon) dans le Document BRGM n° 124.

2. — Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique est faible, comprise entre $-10,6 \cdot 10^{-6}$ et $+34,2 \cdot 10^{-6}$ SI, globalement croissante de haut en bas de la carotte (fig. 1a). Dans la partie supérieure du faciès B1, entre 110 et 311 m, la susceptibilité est toujours négative. Au-dessous, on ne trouve qu'un seul échantillon à susceptibilité négative, le site 14 (370,54 m ; $K_{Moy} = -3,5 \cdot 10^{-6}$ SI).

Ces faibles valeurs traduisent la pauvreté en fer du granite de Beauvoir. De fait, le fer est principalement contenu dans des minéraux paramagnétiques, principalement sous la forme de Fe^{2+} ainsi que le montrent les mesures effectuées au magnétomètre cryogénique (Rochette *et al.*, 1983) sous champ fort et température variable. Les minéraux paramagnétiques sont les micas de la série lépidolite-zinnwaldite (Monier et Tegyey, 1985), les seuls minéraux ferrifères de la paragenèse de ce granite. Sur la base de 10 % de micas dans la roche, on calcule que le pourcentage en fer atomique des micas croît de 1 % à 6 % du haut en bas de la carotte, en bon accord avec les résultats préliminaires de Monier et Tegyey (1985, fig. 1).

En l'absence de minéraux ferromagnétiques, la susceptibilité est la somme du paramagnétisme (micas), faiblement positif, et du diamagnétisme (quartz, feldspath) négatif et voisin de $-14 \cdot 10^{-6}$ SI. Dans les échantillons particulièrement pauvres en fer, c'est le diamagnétisme qui domine, avec pour conséquence une susceptibilité négative. Ainsi, la susceptibilité voisine de $-10 \cdot 10^{-6}$ SI de l'échantillon n° 5 à 186 m traduit-elle une quasi-absence du fer.

De façon plus précise, on peut corrélérer la susceptibilité K due à l'ensemble (paramagnétisme + diamagnétisme) avec les teneurs en Fe^{2+} et F^{3+} , ainsi qu'en Mn^{2+} , de la façon suivante :

$$K = -14 + d(At + Br' + Ct''), \text{ en } 10^{-6} \text{ SI (Rochette, sous presse), où } A = 25,2; B = 33,4; C = 33,8; d \text{ est la densité, et } t', t'' \text{ les teneurs en atome \% dans la roche, respectivement pour } Fe^{2+}, Fe^{3+} \text{ et } Mn^{2+}.$$

En supposant que $t' = 0$ ($Fe^{3+} \% = 0$), on peut écrire $K_{para} = d(At + Ct'')$, $k_{para} = K + 14$ étant la susceptibilité d'origine exclusivement paramagnétique. En utilisant les données de Fe at. % et de Mn at. % récemment mesurées par activation neutronique (Azencott et Raimbault, Laboratoire P. Sue de Saclay), on peut construire un graphe de K_{para} en fonction de $(AFe \% + CMn \%)$, pour les échantillons analysés à proximité immédiate ($\leq 2,2$ m) de ceux qui ont été étudiés pour leur susceptibilité (fig. 2 ; données brutes en annexe). On observe une nette corrélation linéaire, la pente de la droite

contrainte à passer par l'origine (avec $r=0,989$) vaut $d=2,65$. Cette valeur de d , effectivement très proche de la densité du granite, appuie l'adéquation du modèle de minéralogie magnétique présenté ci-dessus. On notera cependant qu'il n'a pas été tenu compte du fer 3^+ qui représente, dans les analyses de lépidolites séparées (Monnier et al., ce volume), entre 12,2 et 27,6 % du fer atomique total.

L'introduction de la teneur en fer 3^+ (t' non nul) diminuera faiblement la pente de cette droite, les points étant translatés du côté droit. Les étoiles de la figure 2 correspondent aux positions « corrigées » des stations EC1 [110,2 m] et EC40 [864,2 m] pour lesquels on dispose des analyses de lépidolites à proximité immédiate : à 0,1 m pour EC1 (où $Fe^{3+}=25,5\%$ du fer total), et à 2 m pour EC40 ($Fe^{3+}=12,2\%$ du fer total).

3. – Anisotropie de la susceptibilité (ASM)

L'ASM se représente par un ellipsoïde dont on doit envisager deux aspects : l'aspect quantitatif (forme) et l'aspect directionnel.

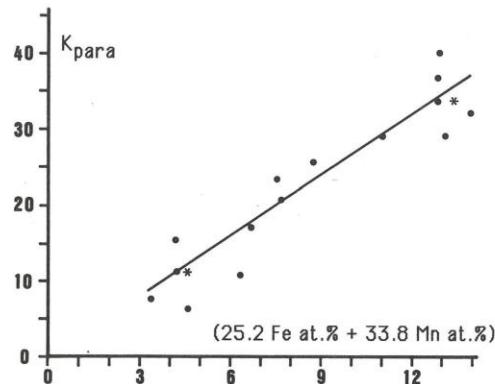


Fig. 2. – (voir texte). Paramagnetic susceptibility $K_{para} = 1/3 (K_{max} + K_{int} + K_{min}) - D$ (our specimens), with $D = -14.10^{-6} Si$, as a function of $(25.2 Fe \text{ at.\%} + 33.8 Mn \text{ at.\%})$ for 15 specimens which were analysed at a distance less than 2 meters from our specimens.

Fe at % and Mn at % come from neutron activation analyses (Pierre Sue Lab, Saclay).

Fe is considered as entirely under the Fe^{2+} form. The best fit line is constrained to cross-cut the origin (slope value = rock-density = 2,65).

Stars : « corrected » positions taking Fe^{3+} % into account, for EC 1 and EC 40 where complete analyses of lepidolites are available.

A. – Taux d'anisotropie paramagnétique et forme des ellipsoïdes

Soient $K_{max} \geq K_{int} \geq K_{min}$ les axes de l'ellipsoïde d'ASM mesurés sur chaque échantillon, et $K_{moy} = 1/3 (K_{max} + K_{int} + K_{min})$, on définit :

- le taux d'anisotropie $P = K_{max}/K_{min}$, et $P\% = (P-1) \cdot 100$,
- le taux d'allongement $L = K_{max}/K_{int}$, et $L\% = (L-1) \cdot 100$, et,
- le taux d'aplatissement $F = K_{int}/K_{min}$, et $F\% = (F-1) \cdot 100$.

Le taux d'anisotropie P (appelé Panis en Annexe) peut atteindre des valeurs très élevées, en particulier lorsque K_{moy} est proche de zéro, dû à la présence de K proches de zéro ou négatifs. C'est le cas lorsque le diamagnétisme domine sur le paramagnétisme. Le graphe de P en fonction de K_{moy} (fig. 3a) montre bien ce phénomène.

En fait, la contribution diamagnétique est isotrope car les minéraux correspondants (quartz, feldspath) ont une anisotropie intrinsèque extrêmement faible. Ainsi, et en l'absence de ferromagnétiques, ce sont les minéraux paramagnétiques qui sont responsables de l'anisotropie. Soit P_p le degré de cette anisotropie. On peut modéliser le comportement de P en fonction de K_{moy} (Hrouda, 1986 ; Rochette, sous presse), c'est la courbe en trait discontinu de la figure 3a, obtenue

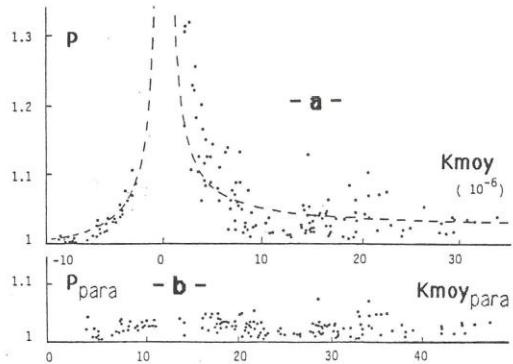


Fig. 3. – (voir texte). Anisotropy versus susceptibility.
a : Degree of anisotropy $P = (K_{max}-D)/(K_{min}-D)$ as a function of the bulk susceptibility $K_{moy} = 1/3 (K_{max} + K_{min} + K_{int})$.

Dashed line : theoretical curve assuming an isotropic diamagnetic component ($D = -14.10^{-6} Si$) and a constant anisotropic paramagnetic component $P_{para} = 1.025$ (2,5%).
b : $P_{para} = (K_{max}-D)/(K_{min}-D)$ as a function of $K_{moy_{para}} = Kmoy - D$, showing the independence of the (paramagnetic) anisotropy with respect to the susceptibility, and strengthening the above stated mineralogical model.

pour $P_p = 1,025$ (2,5%). La similitude de cette courbe théorique avec les points mesurés sur le granite de Beauvoir confirme le modèle de minéralogie magnétique : diamagnétisme isotrope + paramagnétisme anisotrope.

Si l'on recalcule le degré d'anisotropie vrai, en s'affranchissant du terme diamagnétique D , supposé égal à $-14.10^{-6} Si$ (quartz, feldspath), de la façon suivante :

$P_p = (K_{max}-D)/(K_{min}-D)$, on peut construire le graphe de la figure 3b, où P_p est représenté en fonction de $K_{moy_{para}} = (K_{moy}-D)$. On voit que le degré d'anisotropie, souvent très faible, atteint exceptionnellement 1,064 (6,4 %; station 12 : 330,35 m) et 1,063 (6,3 %; station 39 : 848,32 m), mais se situe en moyenne autour de 1,020 à 1,025 (2 à 2,5 %).

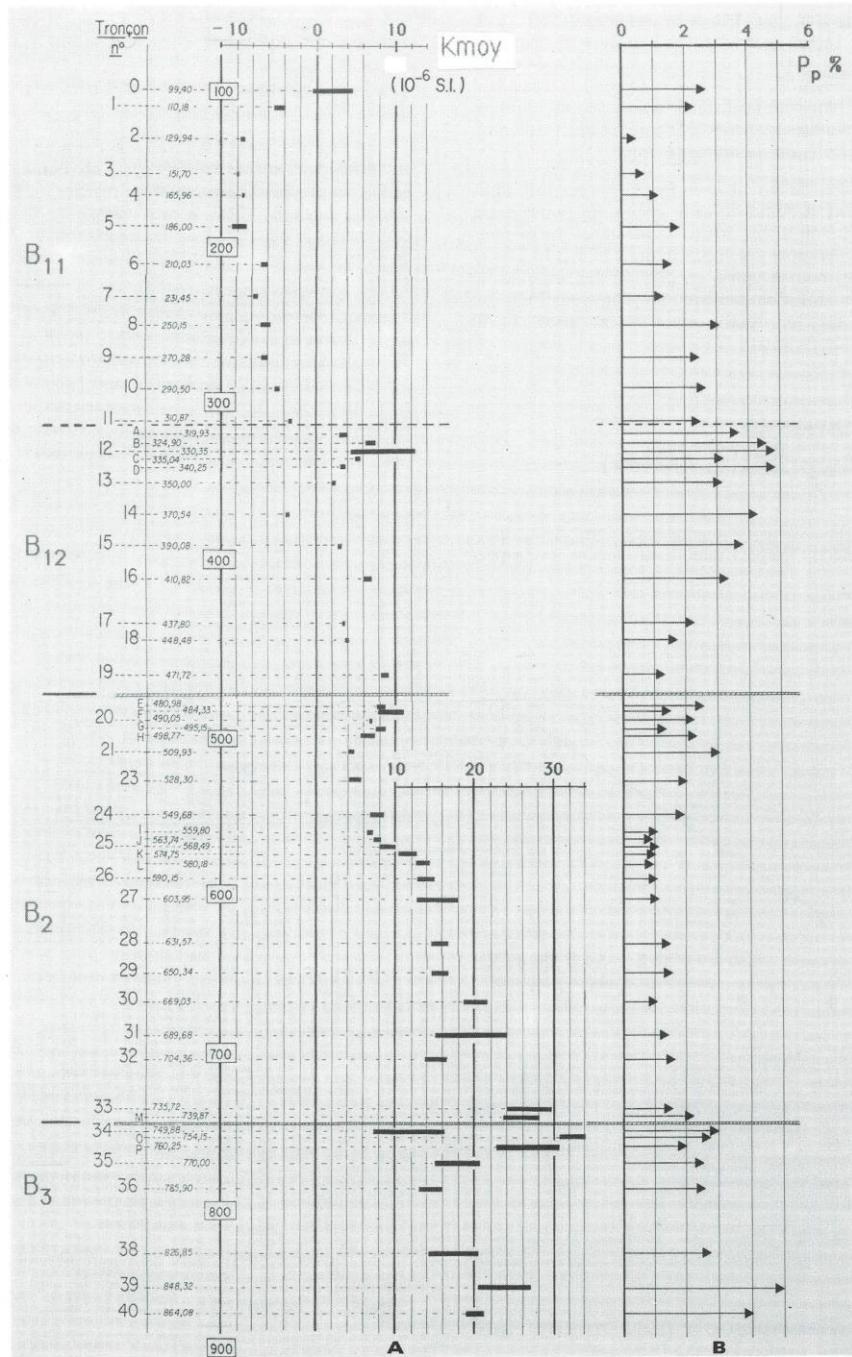
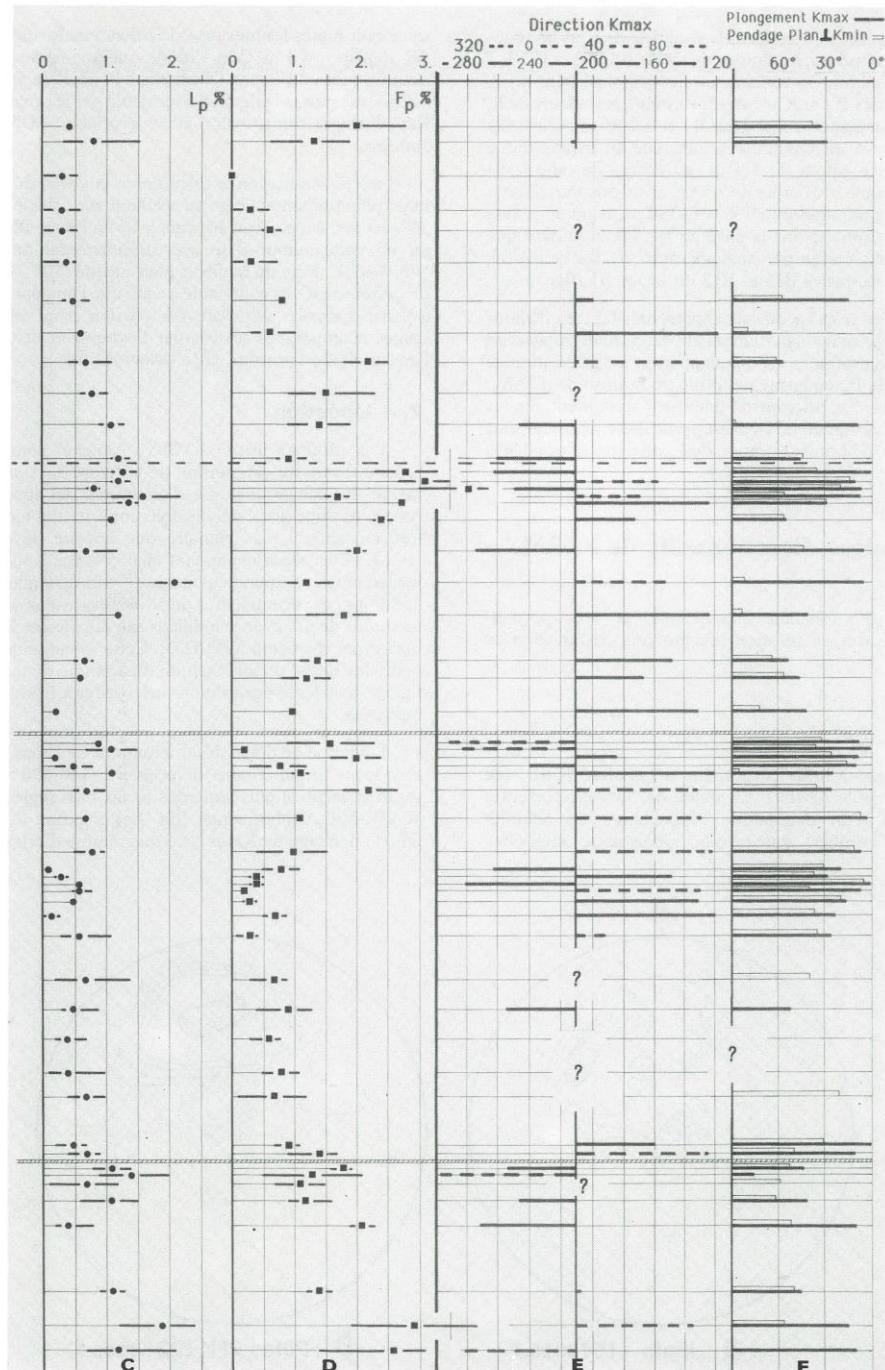


Fig. 1. — Magnetic data as a function of depth for the Beauvoir granite core (GPF ECH 1).
 a : Bulk susceptibility $K_{moy} = 1/3 (K_{max} + K_{int} + K_{min})$ in 10^{-6} SI , negative down to 311 m (dominant diamagnetism).
 b : Anisotropy percentage of the paramagnetic component $P_p \% = [((K_{max}-D)/K_{min}-D)) - 1]/100$.
 The diamagnetic component D is taken as equal to $-14 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$.



c: Linear anisotropy percentage of the paramagnetic component $L_p\% = [(Kmax-D)/(Kint-D)] - 1] 100$.
 d: Planar anisotropy percentage of the paramagnetic component $P_p\% = [(Kint-D)/(Kmin-D)] - 1] 100$.
 e: Direction of $Kmax$, noted clockwise from 0° (north) to 360° . Sector $[110^\circ-290^\circ]$ via the south is in full line; sector $[290^\circ-north-110^\circ]$ in broken line.
 f: Plunge of $Kmax$: heavy segments; dips of the planes perpendicular to $Kmin$: light segments.

En figure 1b, où l'on décrit la variation de P_p % en fonction de la profondeur, les limites de faciès B1/B2 et B2/B3 sont remarquables. On constate un net accroissement de P_p au toit des faciès B2 et B3 ; corrélativement, les valeurs de P_p décroissent au plancher des faciès B1 et B2. Au sein du faciès B1, on observe un phénomène analogue au niveau d'une frontière située autour de 311 m : au-dessus de cette frontière, P_p est faible (de l'ordre de 2,5 %), et au-dessous, P_p croît brutalement pour atteindre 5 % vers 330 m, avant de redescendre à environ 1,5 % à la base de B1. On considère que cette frontière, tracée par analogie avec B1/B2 et B2/B3, sépare les sous-faciès B11 et B12 du faciès B1 (fig. 1).

En figures 1c et 1d, où sont représentés les taux d'allongement (L_p %) et d'aplatissement (F_p %) paramagnétiques en fonction de la profondeur, on peut préciser la signification de la variation de P_p , en terme de forme de l'ellipsoïde d'ASM : les variations d'aplatissement dominent nettement sur les variations d'allongement. Ceci est particulièrement vrai sous la limite B11/B12 où la variation de L_p ne dépasse pas 0,5 %, alors que celle de F_p dépasse 2 %.

B. — Analyse directionnelle de l'ASM.

On appelle foliation (magnétique) le plan perpendiculaire à K_{min} , et linéation (magnétique) la direction de K_{max} .

1. — Foliation

Les résultats bruts concernant la foliation figurent en Annexe (variable KMIN). En figure 4a, ils sont présentés sous forme d'un diagramme d'orientation de Schmidt (Projection Lambert équatoriale, hémisphère inférieur),

tracé avec toutes les mesures (157 mes.) mais contouré pour des densités $\geq 1\%$. Ceci élimine quelques points « isolés » pour lesquels, d'ailleurs, l'écart entre l'« objet de forme ellipsoïde », mesuré et l'ellipsoïde, recalculé par le programme du Kappabridge, est souvent élevé (variable CONF3 ≥ 30 ; Annexe).

La foliation moyenne calculée sur la *totalité* des échantillons (plan perpendiculaire au meilleur axe calculé : 103° SW 39°) est penté d'environ 40° vers le SSW. Elle tend à s'enrouler en zone autour d'un axe subhorizontal de direction WNW-ESE (Pôle du meilleur plan calculé : 102° W 02°). Ce diagramme est très semblable à celui que l'on peut construire à partir des pôles des plans de foliation et/ou de (micro-) litages magmatiques relevés par Feybesse et al. (1985) sur l'ensemble de la carotte (221 mesures : fig. 4b).

2. — Linéation

Les résultats bruts (KMAX ; Annexe) sont présentés sous la forme du diagramme de la figure 5a, portant sur la *totalité* des échantillons. Ce diagramme, qui apparaît beaucoup plus dilué que celui des foliations, traduit bien le caractère en général plus planaire que linéaire de la fabrique ($F > L$). On calcule cependant que 85 % des Kmax fait, avec le plan moyen perpendiculaire aux K_{min} , un angle inférieur à 35°. Pour ces vecteurs, près de 50 % d'entre-eux fait un angle de moins de 35° avec le meilleur axe calculé des Kmax, subhorizontal et orienté à N102°E. Cette orientation préférentielle des Kmax ressort bien du diagramme de densité de la figure 5b où les concentrations inférieures à 1 % n'ont pas été reportées.

L'analyse de détail des orientations de K_{max} révèle que c'est la moitié supérieure du faciès B2 (480-590 m) qui présente de façon la plus nette des Kmax bien réglés autour de WNW-ESE, subhorizontal (fig. 1e : direction de K_{max} , et fig. 1f : pendage de K_{max}). Le diagramme d'orientation des

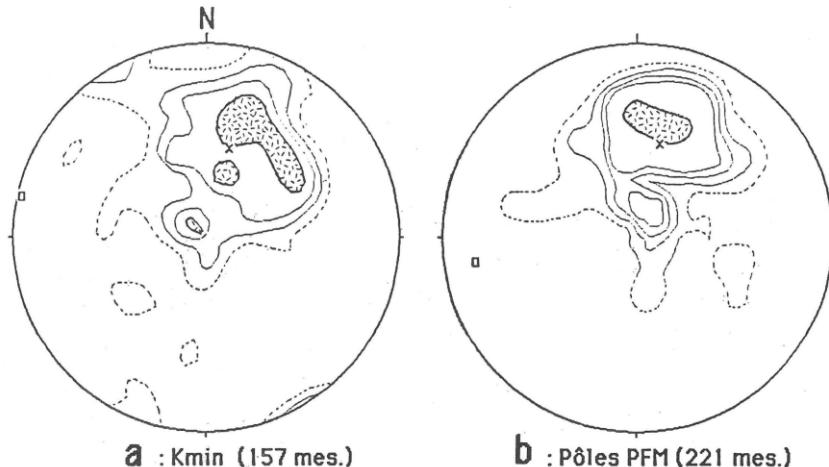


Fig. 4. — (voir texte). Orientation diagrams (Schmidt, lower hemisphere) of a : the K_{min} axes of the AMS (poles to the magnetic foliation) ; contours : $\geq 1, 2, 3, 4$ % and more ; best fit axis BA (cross) : 13° N 51° (plane at 103° SSW 39°) ; pole to the best fit plane : PBP (square) : 102° W 02°, and b : the poles to the magmatic foliation and/or (micro-) layering planes directly measured on the core ; contours : 1, 2, 3, 4, 5 % and more ; BA (cross) : 13° N 49° (plane at 103° SSW 41°) ; PBP (square) : 82° W 17°. Feybesse, 1985

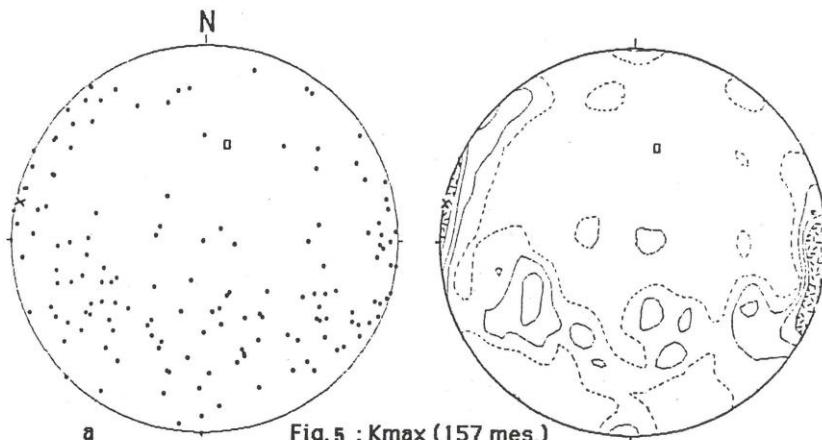


Fig. 5 : Kmax (157 mes.)

Fig. 5. — (voir texte). Orientation diagrams of a: the raw data for the Kmax axes of the AMS (magnetic lineations), and b: the corresponding contoured diagram ($\geq 1, 2, 3, 4$ % and more) BA (cross): $102^\circ W 03^\circ$, and PBP (square): $12^\circ N 50^\circ$ (plane at $102^\circ SSW 40^\circ$).

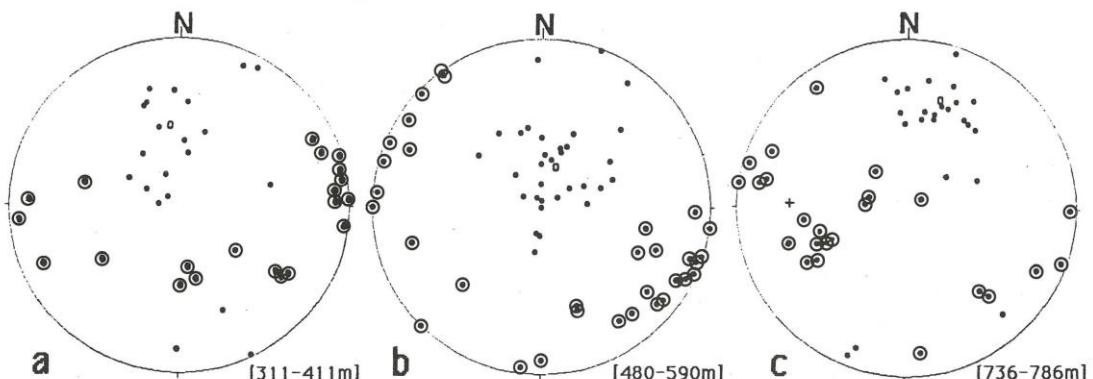


Fig. 6. — (voir texte). Orientation diagrams of Kmax (magnetic lineations: circle dots) and Kmin (poles to the magnetic foliations: dots) for:
 a: stations 11, A, B, 12, C, D, 13, 14, 15 and 16 [311-411 m]; 21 measurements; best axis (BA) for Kmax: $86^\circ E 06^\circ$;
 BA for Kmin (open ellipse): $353^\circ N 50^\circ$ (plane at $83^\circ S 40^\circ$);
 b: stations E, F, 20, G, H, 21, 23, 24, I, J, K, L and 26 [480-590 m]; 32 meas.; BA for Kmax: $118^\circ E 08^\circ$;
 BA for Kmin: $18^\circ N 70^\circ$ (plane at $108^\circ S 20^\circ$);
 c: stations 33, M, O, P, 34, 35 and 36 [736-786 m]; 25 meas.; BA for Kmax: $92^\circ W 32^\circ$; BA for Kmin: $17^\circ N 34^\circ$ (plane at $107^\circ S 56^\circ$).

Kmax (et des Kmin) sur ce tronçon [480-590 m] de la carotte est présenté en figure 6b.

Des orientations semblables de Kmax, en WNW-ESE subhorizontal, se retrouvent essentiellement :

- sous la limite B11/B12 (311-411 m : fig. 1e et 1f). Les orientations correspondantes des Kmax (et Kmin) sont présentées en figure 6a;
- sous la limite B1/B2 (480 m et en-dessous : fig. 1e et 1f). Les orientations correspondantes ont été intégrées au diagramme de la figure 6b;
- au voisinage de la limite B2/B3 (736-786 m : fig. 1e et 1f). Les orientations correspondantes des Kmax (et Kmin) sont présentées en figure 6c;

— à la base du faciès B3 : site 39 à 848,32 m, et site 40 à 864,08 m (voir fig. 1e et 1f).

On note que, pour les sections citées ci-dessus, le pendage des plans de foliation (barres creuses de la figure 1f) a tendance à être plus faiblement pendé qu'ailleurs. Ceci est remarquable pour la section [480-590 m] (fig. 6b).

Le diagramme de densité d'orientation, correspondant à la somme des diagrammes de la figure 6 (78 mesures sur 157), et intéressant donc 260 m soit 33 % de la carotte [311-411 m ; 480-590 m ; 736-786 m], est présenté en figure 7. Le meilleur axe calculé des linéations magnétiques est orienté à $N104^\circ E 03^\circ$, et le meilleur plan de foliation calculé correspondant est orienté à $N102^\circ SSW 37^\circ$.

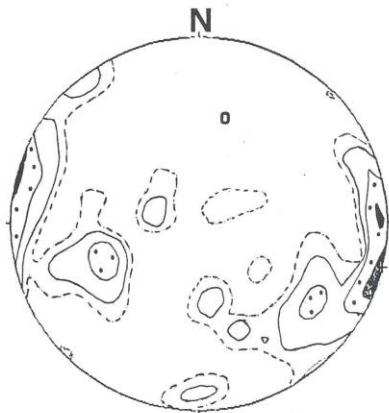


Fig. 7. — (voir texte). Orientation diagram of K_{max} corresponding to the addition of diagrams in figures 6a, b and c (1/3 of the granite section : [311-411 m + 480-590 m + 736-786 m]) where K_{max} is mostly directed toward WNW-ESE and close to horizontal, along with (in general) the observed highest values of the anisotropy (see fig. 1b, c and d).
 Contours : 2, 4, 8 % and more.
 BA (cross) : 104° E 0.3° ; PBP (circle) : 14° N 41° (plane at 104° SW 49°).

3. — Comparaison avec les structures de l'encaissant

Il s'agit des micaschistes du toit (0-97 m) et de ceux qui sont « interlités » à la base du faciès B3 (789-878 m) incluant ceux du plancher. Les mesures structurales ont été relevées directement sur la carotte par Feybesse et al. (1985).

En ce qui concerne les *plans de la foliation métamorphique* des micaschistes, ils sont subhorizontaux au toit

(fig. 8a), assez franchement discordants, d'environ 40°, sur la foliation du granite. On remarque cependant que l'ensemble foliation des micaschistes-foliation du granite s'enroule autour d'une direction E-W subhorizontale. A la base du granite, la foliation des micaschistes est *globalement* concordante (fig. 8b) avec celle du granite, bien que dans le détail, on relève que les contacts granite-micaschiste au niveau des nombreux septa de granite interlité, soient discordants à la fois sur la foliation des micaschistes et sur celle du granite (Autran, com. orale). Ici encore, on note que les pôles des plans de foliation des micaschistes s'enroulent autour d'un axe subhorizontal et de direction WNW-ESE (N117° W 05°), très proche de l'axe de zone des foliations du granite (N102° W 02°).

Quant aux *linéations minérales* des micaschistes, elles sont, comme dans toute la région métamorphique de la Sioule (Grolier, 1971), constamment orientées selon WNW-ESE subhorizontal (fig. 9a : micaschistes « supérieurs » et fig. 9b : micaschistes « inférieurs »).

4. — Discussion et proposition de modèle structural

A. — Susceptibilités

L'étude de la susceptibilité elle-même permet d'accéder à la minéralogie magnétique, nouvel outil de pétrographie du granite, en particulier pour les phases ferrifères. Le rôle du manganèse dans le paramagnétisme de la « matrice » est ici clairement démontré. La croissance, globalement linéaire de $Fe^{2+}\%$, avec cependant des ruptures au niveau des limites B11/B12, B1/B2 et B2/B3, constitue le principal résultat.

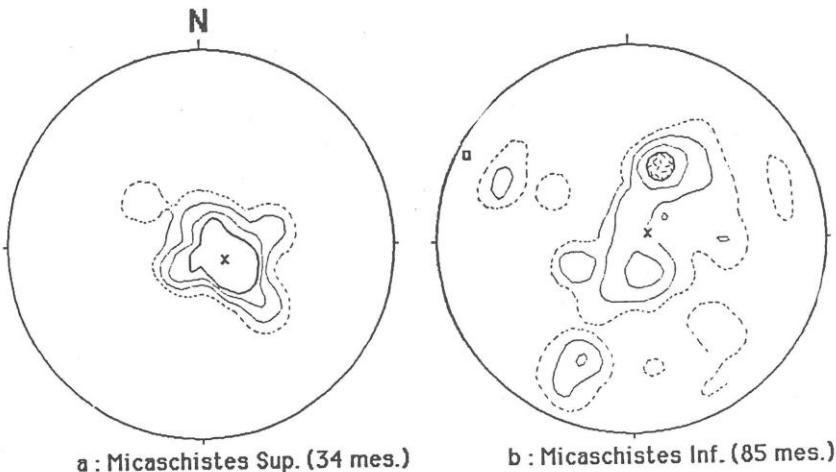


Fig. 8. — (voir texte). Orientation diagrams of the foliation planes in the micaschists (conventional measurements by J.L. Feybesse et al., 1985), a : at the top of the granite [0-97 m] ; 34 measurements ; contours : 1, 3, 6, 9 % and more ; BA (cross) : 117° SE 78° (plane at 27° W 12°), and b : at the base of, and interlayered with the B3 subtype of the granite [789-878 m] ; 85 measurements ; contours : 1, 3, 6 and 9 % ; BA (cross) : 75° E 83° (plane at 165° W 07°) ; PBP (square) : 117° W 05°.

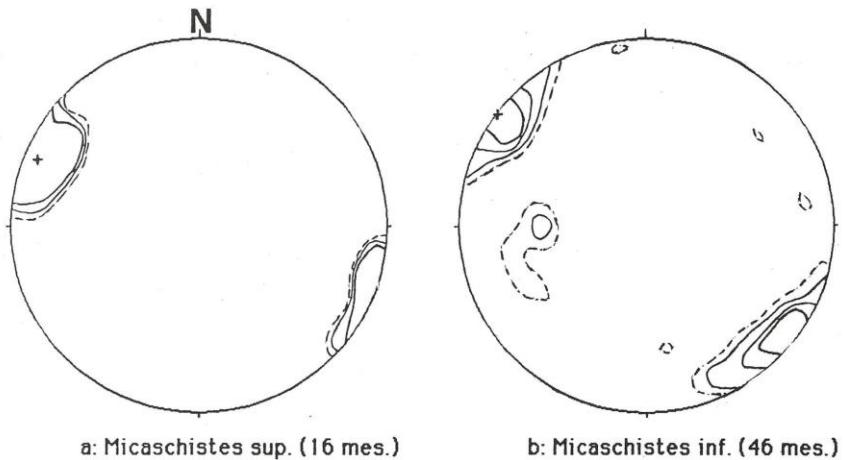


Fig. 9. — (voir texte). Orientation diagram of the mineral lineation in the micaschists (same origin as in figure 8), a: at the top of the granite; 16 measurements; contours: 2, 4, 8 % and more; BA (cross): $113^\circ W 07^\circ$, and b: at the base; 46 measurements; contours: 2, 4, 8, 12 % and more; BA (cross): $128^\circ W 01^\circ$.

B. — Anisotropie de la susceptibilité

L'apport principal de cette étude réside dans les résultats inattendus relatifs à l'anisotropie. Au niveau quantitatif de l'ASM (forme de l'ellipsoïde), les limites B11/B12, B1/B2 et B2/B3 sont remarquables : des changements brutaux d'an-

sotropie y prennent place. Les augmentations d'anisotropie planaire sont les plus nettes : elles reflètent l'anisotropie intrinsèque, purement planaire, des micas, porteurs quasi-exclusifs de l'anisotropie de la roche.

C'est l'aspect directionnel de cette étude qui constitue la nouveauté essentielle, obtenue grâce à l'orientation de la carotte dans le repère géographique. Ceci a permis de mettre en évidence que les niveaux où apparaissent des pics d'anisotropie sont aussi les niveaux où la linéation s'oriente franchement autour de WNW-ESE subhorizontal, et où la foliation a localement tendance à devenir plus plate. On considère que cette géométrie est typique de cisaillements intragranitiques à l'état visqueux.

C. — Microstructure du cisaillement : fabrique des micas et de l'albite

Pour mieux comprendre le cisaillement à l'échelle du grain, on présente ici un diagramme de l'orientation préférentielle de forme des micas (fig. 10a) et des albites dans l'échantillon n° 12h (330,36 m, close to the B11/B12 boundary; $K_{\text{para}} = 4,4 \cdot 10^{-6}$ and $P_{\text{para}} \% = 2,9$). About 100 measurements per diagram.

«XZ magnetic» sections: parallel to K_{max} and K_{min} . Direction of K_{max} is $N72^\circ E 02^\circ$ (polarity unknown).

Note that the mean orientation of the micas (M) is parallel to K_{max} , strengthening the significance of the AMS. The angular obliquity between the preferred orientations of the micas vs. the albites (lower «wings») is interpreted in terms of differently elongated grains rotating in a viscous fluid deforming by simple shear, as simulated numerically and experimentally by Fernandez et al. (1983). PC: Inferred shear plane.

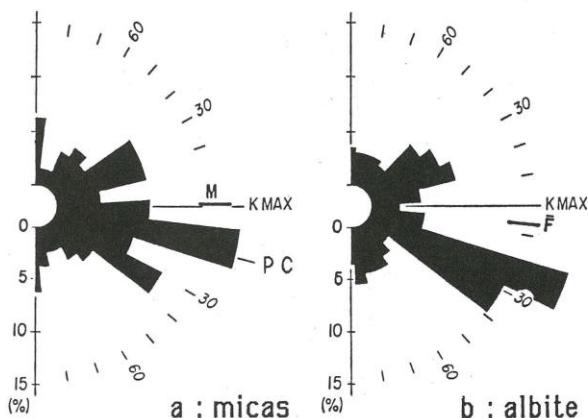


Fig. 10. — (voir texte). Orientation of the micas (a: cleavage trace) and of the albite grains (b: elongation and/or trace of the (010) twin) in the granite (station 12H: 330,36 m, close to the B11/B12 boundary; $K_{\text{para}} = 4,4 \cdot 10^{-6}$ and $P_{\text{para}} \% = 2,9$). About 100 measurements per diagram.

On constate que la trace de K_{max} est parallèle à celle de l'orientation moyenne des micas. Ceci confirme l'interprétation sur l'origine de l'ASM (en l'absence de ferromagnétiques) par la distribution des faces (001) des micas, eux-mêmes anisotropes (anisotropie magnétocristalline : K_{min} perpendiculaire au clivage). On constate aussi que K_{max} est peu différent de la trace de l'allongement moyen des albites. On en déduit que ces minéraux sont orientés, en moyenne à plat dans le plan de foliation magnétique, et en moyenne en zone (mica, albite) et alignés (albite) parallèlement à la linéation magnétique.

L'aspect le plus intéressant de la figure 10 réside dans l'obliquité de l'« aile » prédominante de la fabrique des micas par rapport à celle des albites. Cet angle, d'une quinzaine de degrés, se retrouve dans les simulations numériques et analogiques établies par Fernandez *et al.* (1983) considérant des cristaux d'allongements différents emballés dans une matrice visqueuse en cisaillement simple. Ceci constitue à nos yeux un argument très fort pour considérer que la fabrique de ce granite est obtenue par cisaillement approximativement parallèle à Kmax, et selon un plan proche de PC (fig. 10).

Nota : En figure 10, le Kmax est orienté à N72°E 02°, mais l'orientation ENE ou WSW a été perdue. Ceci empêche d'établir si le cisaillement s'est effectué vers l'Est ou vers l'Ouest.

D. — Modèle structural pour le granite de Beauvoir

La fabrique planaire, examinée seule, peut s'interpréter comme un litage magmatique dû à la gravité (settling). Cependant, l'axe de zone de cette fabrique, la nette fabrique linéaire du granite, systématiquement orientée vers WNW-ESE subhorizontal au niveau des domaines à forte anisotropie, ainsi que les arguments microstructuraux développés ci-dessus, s'interprètent plutôt en terme de cisaillement à l'état visqueux. En ce sens, nous rejoignons les conclusions de Gagny et Jacquot (1985).

On conclut que la fabrique du granite de Beauvoir est la conséquence, au moins pour le tiers de sa section, d'un cisaillement selon une direction WNW-ESE (sens inconnu) et selon un plan faiblement penté vers le SSW en moyenne, avec une tendance à la disposition en zone autour de cette direction. On peut penser que plusieurs « bouffées » magmatiques se sont superposées successivement. La chronologie de ces superpositions pourrait être B3, B2, B12, B11 si l'on considère que les faciès les moins ferrifères sont aussi les plus tardifs. Ces bouffées ont été « tartinées » par cisaillement selon WNW-ESE, subhorizontal. Si l'on admet la position des limites B11/B12, B1/B2 et B2'/B3 indiquées en figure 1, les limites B1/B2 et B2/B3 étant fournies par Cuney *et al.* (1986) c'est le toit de ces bouffées qui est déformé par cisaillement (raison inconnue).

La structure du granite de Beauvoir peut s'intégrer dans le modèle de Bouchez et Jover (1986) et Jover et Bouchez (1986) concernant le Massif central occidental. Ce modèle propose que la pile tectonométamorphique du Massif central, d'épaisseur décakilométrique, fonctionne de 360 à 330 Ma au moins, comme une zone cisailante-chevauchante à mouvement ESE-WNW. Le granite de Beauvoir, en forme de lame ou de sill épais de 700 m environ, se mettrait en place au sein de cette pile, au même titre que certains leucogranites tardifs, mais encore structurés, tel que celui de Saint-Goussaud-en-Limousin. L'âge du granite de Beauvoir (300-310 Ma ? ; Duthou et Pin, ce volume) indiquerait que ce mouvement s'est effectué tardivement, sous forme d'écaillage, le découplage se faisant au niveau du granite, la pile métamorphique structurée antérieurement étant alors simplement translatée passivement.

Remerciements

Cette étude a bénéficié d'un financement de la part de l'action GPF3, Thème 8 du BRGM, ainsi que des UA CNRS n° 732 et 733. J.L. Bouchez remercie Messieurs J.P. Bouillin (UA CNRS n° 145) et J.P. Fortuné (UA CNRS n° 67) qui lui ont fourni les moyens de travailler à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Mrs J.P. Pozzi, A. Autran, M. Cuney et P. Vialon ont fourni des critiques constructives.

Références bibliographiques

- BERNIER S. (1986). — Étude de l'anisotropie de la susceptibilité magnétique dans le granite de Beauvoir (GPF). D.E.A. Universités de Nantes et Orsay, 78 p.
- BERNIER S., BOUCHEZ J.L., ROCHELLE P. (1987). — Anisotropie de la susceptibilité magnétique du granite de Beauvoir (Sondage GPF d'Échassières, Massif central français). *C.R. Acad. Sci. Fr., sous presse*.
- BOUCHEZ J.L., JOVER O. (1986). — Le Massif central : un chevauchement de type himalayen vers l'Ouest-Nord-Ouest. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **302**, (2), pp. 675-680.
- CUNY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON P., FEYBESSE J.L., GAGNY C., JACQUOT T., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G., TEGEY M. (1986). — Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur la coupoles de granite albítique à topaze-lépidolite de Beauvoir (Massif central français). *C. R. Acad. Sci. Fr.*, **303**, (1), pp. 569-574.
- FERNANDEZ A., FEYBESSE J.L., MEZURE J.F. (1983). — Theoretical and experimental study of fabrics developed by different shaped markers in two dimensional simple shear. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **25**, pp. 319-326.
- FEYBESSE J.L., JACQUOT T., MARTIN P., BONIJOLY D. (1985). — Présentation des données structurales acquises sur le forage Échassières n° 1. Document BRGM n° 100, GPF3, pp. 166-235.
- GAGNY C., JACQUOT T. (1985). — Présentation de quelques problèmes mis en évidence par la pétrologie structurale sur le forage d'Échassières n° 1. Document BRGM n° 100, GPF3, pp. 139-163.
- GROLIER J. (1971). — Contribution à l'étude géologique des séries cristalophylliennes inverses du Massif central français : la série de la Sioule (Puy-de-Dôme, Allier). *Mém. BRGM n° 64*, 163 p.
- HROUDA F. (1986). — The effect of quartz on the magnetic anisotropy of quartzite. *Sudia Geophys. Geod.*, **30**, pp. 39-45.
- JOVER O., BOUCHEZ J.L. (1986). — Mise en place syntectonique des granitoïdes de l'Ouest du Massif central français. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **303**, (2), pp. 969-974.
- MONIER G., TEGEY M. (1985). — La pétrographie des différents faciès du granite de Beauvoir : étude préliminaire. Document BRGM n° 100, GPF3, pp. 40-93.
- ROCHELLE P., FILLION G., MOLLARD P., VERGNE R. (1983). — Utilisation d'un magnétomètre cryogénique à effet Josephson pour l'analyse de l'anisotropie magnétique des roches. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **296**, pp. 557-559.
- ROCHELLE P. (sous presse). — Magnetic susceptibility of the rock matrix related to magnetic fabric studies. *J. Struct. Geol.*