

Objectifs généraux du projet GPF Échassières n° 1 et résultats essentiels acquis par le forage de 900 m sur le granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir

Michel Cuney* et Albert Autran**

Mots-clés : Sondage (profond), Granite, Tungstène substance, Étain substance, Lithium substance, Allier (Échassières)

Résumé

Le sondage GPF de 900 m à travers le granite peralumineux albitique de Beauvoir à topaze, lépidolite et métaux rares (Sn, Nb, Ta, Be, Li...) a permis d'étudier en détail une coupe carotée en continu. Il montre une puissance exceptionnelle pour ce type de granite, exemplaire des termes les plus évolués des complexes leucogranitiques peralumineux. Il a permis d'appréhender des mécanismes de différenciation, fractionnement et transfert, habituellement exprimés de manière beaucoup plus discrète et plus délicats à révéler. Les résultats les plus significatifs sont :

1) L'acquisition par des processus magmatiques des taux de fractionnement considérable observés. Les phénomènes métasomatiques post solidus n'interviennent que subsidiairement.

2) La mise en place autonome de ce granite très évolué, par injections successives dans un « caisson », de magmas dont les caractéristiques ont été acquises pour l'essentiel avant leur mise en place.

3) La confirmation par l'étude expérimentale originale du système, du cursus de cristallisation observée et du rôle fondamental du fluor, du lithium et de la pression fluide sur l'ordre et la nature des phases minérales apparaissant entre liquidus et solidus.

4) Le caractère non eutectique de ces bains magmatiques par rapport aux leucogranites plus banaux de fins de différenciation des lignées non peralumineuses.

5) L'origine primaire, magmatique, des enrichissements en métaux rares Sn, Ta, Nb, Li, Be conduisant à des teneurs économiques et le comportement inversé de l'étain et de l'uranium lors des conditions de FO_2 élevée apparaissant avec la sursaturation du magma en fluides.

6) L'observation de la démixtion de saumures aqueuses chlorurées par arrivée à saturation du magma, avant le solidus. L'ébullition de ces saumures magmatiques par suite de la fracturation hydraulique de l'encaissant, grâce aux conditions très superficielles de la mise en place de ce granite, montre l'analogie phénoménologique avec le cas maintenant bien documenté des « porphyres cuprifères ».

7) Les variations considérables et bien organisées de la composition des micas lithinifères couvrent tout le champ connu de ces minéraux. Ils se révèlent d'excellents indicateurs de l'évolution magmatique.

A ce stade des études, un certain nombre de phénomènes majeurs sont encore insuffisamment étudiés pour faire l'objet de conclusions fermes. Il s'agit : des relations cogénétiques ou non entre les différentes unités magmatiques du granite de Beauvoir et entre celles-ci et les autres termes du complexe leucogranitique peralumineux d'Échassières ; de la comparaison détaillée des comportements géochimiques des nombreux éléments traces aux stades magmatiques, transsolidus et subsolidus, de façon à appréhender la réalité, l'importance et les conditions de transfert et de fractionnement de ces éléments.

Nous espérons que de nouvelles équipes de chercheurs viendront s'intéresser à un objet géologique aussi bien documenté.

* CREGU et G.S. CNRS-CREGU, BP 23, 54501 Vandœuvre Cedex.

** BRGM, Direction scientifique, BP 6009, 45060 Orléans Cedex.

Abstract

General aims of the G.P.F. Échassières project. Main results of the 900 m borehole through the Beauvoir albite-topaz-lepidolite granite.

The 900 m-deep Géologie Profonde de France (GPF) borehole traversing the Beauvoir peraluminous, albitic, topaz-, lepidolite- and rare metal-bearing (Sn, Nb, Ta, Be, Li, etc.) granite has made possible the detailed study of a continuous cored section through the granite. It is shown to be exceptionally thick for this type of granite, exemplifying the most evolved terms of the leucocratic peraluminous granitic complexes. The study of the core has revealed the existence of mechanisms of differentiation, fractionation and transfer that normally are expressed much more subtly and are more difficult to demonstrate. The most significant results are:

- 1) The acquisition by magmatic processes of the considerable observed degrees of fractionation. Post-solidus metasomatic processes play only an accessory role. The filling of the beauvoir reservoir by successive magmatic injections which individual characteristics mostly results process acting before emplacement.
- 2) Confirmation, by original experimental study of the system, of the observed order of crystallization and of the fundamental part played by F, Li and fluid pressure in determining the sequence and nature of the mineral phases appearing between liquidus and solidus.
- 3) The non-eutectic character of these magmas compared with the more normal differentiation end-products of non-peraluminous descent.
- 4) The primary magmatic origin of the enrichment in Sn, Nb, Li and Be leading to economic concentrations, and the opposite behaviour of U and Sn, in the high FO_2 conditions prevailing during fluid oversaturation of the magma in later stage.
- 5) Observation of the unmixing of Cl-bearing aqueous brines as a result of saturation of the magma before the solidus is attained. The ebullition of these magmatic brines following the hydraulic fracturing of the host-rock, due to the shallow conditions of emplacement of this granite.
- 6) The considerable and well-ordered variations in composition of the lithium micas cover the entire known field of these minerals. They are revealed as excellent indicators of magmatic evolution.

At this stage of the investigations, certain major magmatic phenomena are still insufficiently well-known for firm conclusions to be drawn. These are: a) the cogenetic or non-cogenetic relations between the different units of the Beauvoir granite and between this granite and the other terms of the Échassières peraluminous, leucogranitic complex; b) detailed comparison of the geochemical behaviour of the numerous trace elements at the magmatic, trans-solidus and subsolidus stages in order to evaluate the reality, importance and conditions of their transfer and fractionation.

We very much hope that other research teams will express an interest in such a well-documented geological feature.

1. — Introduction. Intérêt de la cible d'Échassières

Le site d'Échassières a été sélectionné car il offrait, en France, les meilleures conditions pour explorer les mécanismes gouvernant les transferts d'éléments dans la croûte continentale, à travers l'étude de la genèse des magmas peralumineux, de leur mise en place et de leur interaction avec des phases fluides et les roches encaissantes. Tout accroissement des connaissances sur ces mécanismes contribuera à une meilleure définition de guides pour l'exploration des ressources minérales importantes, telles que U, Sn, W, Li, Ta, Kaolin, précisément associées à ce type de granitoïde et très répandues en Europe.

Le complexe leucogranitique peralumineux d'Échassières (nord Massif central) (fig. 1 et 2) se présente comme un objet géologique de dimension restreinte permettant de bien focaliser les travaux d'équipes mettant en œuvre des spécialités différentes. L'érosion a amené à la surface la partie apicale de ce complexe leucogranitique peralumineux présentant des minéralisations de caractères très différents (magmatiques, métasomatiques (?) et hydrothermales) celles-ci ont atteint des tonnages et des teneurs économiques (W, kaolin) à sub-économiques (Sn, Li, Ta, Be) pour les unes ou d'intérêt uniquement métallogénique au stade des recherches actuelles, pour d'autres (U, Cu, Pb, Ag,...). Une telle cible permet donc d'étudier dans des conditions optimales les processus de concentration métallifère et laisse la possibilité d'accéder par des sondages de profondeur moyenne (quelques centaines à 5 000 m) à la quasi-totalité du volume granitique pour en préciser la pétrogenèse.

Une approche par étape sur cette cible était possible. Dans le cadre des contraintes budgétaires, un premier forage de 900 m a été réalisé sur un des termes ultimes les plus évo-

lués de ce complexe leucogranitique, associé à des minéralisations de métaux rares (Ta, Nb, Li, Be) et de métaux plus communs (Sn, U, W): l'apex granitique de Beauvoir, localisé à la bordure sud du Massif d'Échassières. Il s'agit d'un granite albitique à topaze-lépidolite très fortement enrichi en de nombreux éléments incompatibles (F, Li, Rb, Cs,...). Les exemples d'appareils similaires étudiés en France (Montebras, Moulin Barret, Neuf jours, les Epesses...) ou à l'étranger (Chine, URSS, Tchécoslovaquie,...), présentent une zonalité verticale développée sur quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres mais toujours inférieure au kilomètre. L'extension géographique et l'intensité des anomalies géochimiques les plus importantes développées autour de l'apex affleurant de Beauvoir laissent présager un ensemble granitique parmi les plus puissants de ce type. Un forage de 900 m apparaissait donc comme un minimum nécessaire pour traverser la totalité du système Beauvoir et permettait d'envisager de recouper des ensembles plutoniques plus profonds.

L'exécution d'un sondage carotté a mis à la disposition de la communauté scientifique une coupe continue dans un ensemble granitique très évolué auquel des minéralisations sont spatialement associées. Le sondage permettait de s'affranchir de l'altération météorique presque toujours très développée dans ce genre de massif. Des coupes continues, sans altérations peuvent être étudiées par exemple dans l'Himalaya, le granite du Manaslu (Deniel *et al.* 1987, le Fort *et al.* 1987) ou au Groenland, mais ces massifs ne sont pas associés à des minéralisations d'importance significative et ne répondent donc pas à l'objectif d'étude de la genèse des concentrations minérales. De plus, ils ne présentent pas la variété de faciès rencontrés dans les complexes leucogranitiques peralumineux de la chaîne hercynienne. Par contre, le site d'Échassières en présente un certain nombre qui pourront être étudiés lors des phases ultérieures du projet pour aboutir à une quantification globale des processus.

Si l'acquisition d'échantillons sains est fondamentale pour l'obtention de données physiques et chimiques non per-

turbées, la possibilité d'étudier leurs variations le long d'une coupe continue est absolument nécessaire. Par exemple, plusieurs études récentes (Deniel *et al.*, 1987 ; Friedrich et Cuney 1987) ont tendance à montrer que les granites peralumineux sont formés par l'accrétion d'unités magmatiques de faible dimension (décamétriques à hectométriques) non cogénétiques. La démonstration de tels processus sur d'autres cibles n'est possible qu'à partir d'échantillonnages très serrés le long de profils continus. L'orientation des carottes du sondage a permis de plus les études structurales qui ont abouti à reconstituer, d'une part la dynamique de mise en place des magmas et à replacer celle-ci dans le contexte cinématique régional, d'autre part les géométries successives des drains de perméabilité utilisés par les circulations hydrothermales lors du refroidissement de l'intrusion et ultérieurement.

2. — Les grands modèles en présence pour la genèse et l'évolution des granites à métaux rares

Deux modèles ont été essentiellement proposés pour la genèse de tels granites fortement enrichis en éléments incompatibles (granites fertiles, Moreau *et al.*, 1966 ; granites spécialisés Tischendorf 1977 ; granites minéralisés, Plant *et al.*, 1980 ; granites à métaux rares, Beus, 1962)

Le premier modèle invoque la transformation métasomatique subsolidus de l'apex d'un massif granitique à biotite par des fluides enrichis en éléments incompatibles (Beus *et al.*, 1962) ; une zonation en différents faciès est alors développée vers le toit à partir du granite à biotite : granite à microcline-protolithionite, granite albitique, granite albitique à amazonite-zinnwaldite, le granite à albite lépidolite représentant le terme apical et le plus transformé ; cette zonalité n'excède pas 500 à 600 m de puissance et le granite à albite-lépidolite, équivalent au faciès apical du granite de Beauvoir, y présenterait une puissance maximale de 100 mètres.

Le deuxième modèle est essentiellement magmatique (Kovalenko et Kovalenko, 1984). Il propose une origine généralement par cristallisation fractionnée (Groves et McCarthy, 1978, Pichavant *et al.*, 1987, Derré *et al.*, 1981, Lehman, 1982). L'existence de verres volcaniques, comme les ongonites (Kovalenko et Kovalenko) ou les macusanites (Pichavant *et al.*, 1987), présentant des compositions semblables à celles de granites de type Beauvoir constitue un argument très solide pour cette hypothèse magmatiste.

Quelques contraintes supplémentaires peuvent être apportées par une modélisation simple de la concentration en étain du granite de Beauvoir. La partie supérieure de ce granite peut être représentée par une demi sphère de 300 m de rayon avec des teneurs en Sn de 1 000 ppm, ce qui donne un stock métal de 150 000 tonnes. Un facteur proche de 2 peut être ajouté si l'on considère les résultats apportés par le sondage. Un facteur supplémentaire de 2 à 5 peut être ajouté si l'on considère les enrichissements importants en étain observés dans de larges volumes de micaschistes et l'existence très probable d'autres granites de type Beauvoir au sud du complexe d'Échassières. Seule la première évaluation du stock métal sera considérée dans la discussion qui suit. La teneur moyenne en étain d'un granite est de l'ordre de 3 ppm. Si la

totalité de ce métal est concentrée dans le granite de Beauvoir par différenciation magmatique ou transfert par des phases fluides, une telle efficacité étant bien évidemment peu vraisemblable, un corps granitique au moins 5.10^4 fois plus volumineux que celui de Beauvoir est donc nécessaire, c'est-à-dire au moins $5\,700\text{ km}^3$. D'après la modélisation de l'anomalie gravimétrique mesurée sur le complexe d'Échassières, le volume estimé du complexe (avec une sphère de rayon moyen 2,5 km) est de l'ordre de 65 km^3 , c'est-à-dire deux ordres de grandeur en dessous du volume nécessaire. Plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer un tel écart :

1. — Dans l'hypothèse d'une origine du granite de Beauvoir par différenciation magmatique, un plus grand volume de granite est nécessaire en profondeur dans la croûte. Cependant pour une teneur du magma parent équivalente au Clarke, ce volume serait 200 fois supérieur à celui qui est estimé par la gravimétrie ; ceci repousse l'existence éventuelle d'une telle chambre de différenciation dans la croûte profonde où sa réalité devient pratiquement incontrôlable.

2. — Toujours dans l'hypothèse d'une origine par différenciation magmatique, on peut diminuer considérablement le volume initial à différencier, en envisageant une teneur plus élevée en Sn du granite banal parent, résultant elle-même de l'anatexis d'un protolithe anormalement riche en Sn.

3. — Une origine non plus par différenciation, mais directement par fusion partielle nécessite, pour rendre compte de l'enrichissement élevé en Sn mais aussi F, Li, Rb observés, d'une part un très faible taux de fusion et d'autre part, la déstabilisation massive des phases micacées dans une zone en voie de granulitisation. Cette hypothèse est tout à fait compatible avec l'âge tardif de ces granites à métaux rares, âge comparable à celui du développement en base de croûte d'un faciès granulite terminal de basse pression proposé par Pin et Vielzeuf (1983).

Ces calculs très simples, effectués grâce aux résultats obtenus par l'exécution du sondage montrent clairement, l'enjeu, sur l'aspect transfert d'éléments dans la croûte continentale, que le projet se propose d'aborder.

3. — Le complexe granitique d'Échassières dans son contexte régional

3.1. — Le cadre géologique régional

Le complexe granitique d'Échassières affleure au centre d'une fenêtre circulaire ouverte dans les nappes de la série gneissique et migmatique de la Sioule (Grolhier, 1971) dont le gradient de métamorphisme est inverse. Le complexe est intrusif dans les micaschistes à biotite, grenat, staurolite et muscovite, qui représentent les termes les moins métamorphiques de la région. (fig. 1).

Les nouvelles études réalisées dans cette série dans le cadre de la préparation du projet (Feybesse, 1985 et Feybesse et Tegye, ce volume) puis par l'exploitation des micas-

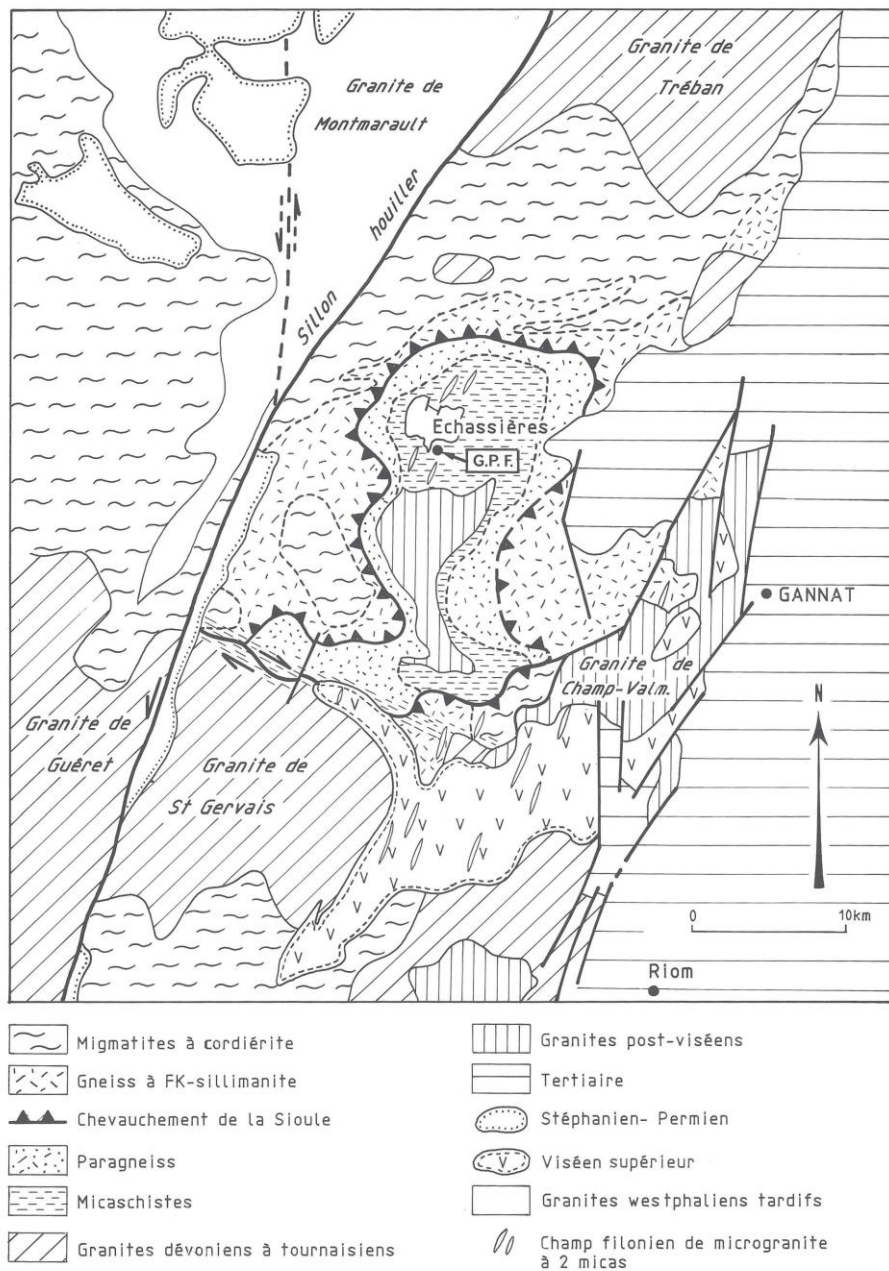


Fig. 1. — Cadre géologique du complexe granitique d'Echassières.
Geological setting of the Echassières granitic complex.

chistes recoupés par le sondage GPF (Audren *et al.*, 1987, ce volume et document du BRGM n° 124) ont permis de préciser l'évolution tectonométamorphique de la série :

- au Dévonien, trois nappes crustales ont été superposées avec une cinématique d'Est en Ouest, les deux plus profondes étant échantillonnées par le sondage,
- à la fin du Dévonien, vers 350 Ma, la série est écaillée vers l'est lors du fonctionnement des décrochements dextres et décrochevauchements, prolongement oriental de ces mêmes structures du massif armoricain. Le bâti épaissi au Dévonien par les nappes crustales superposées, subit alors une érosion accélérée, bien montrée par le dépôt transgressif du Viséen supérieur volcanique de Manzat, quelques kilomètres du sud du site d'Échassières, et le blocage des réactions métamorphiques rétrogrades vers 400° – 3kb (Audren *et al.* ce volume ; figures 1, 4 et 5 in Feybesse et Tegye, ce volume).
- A partir du Viséen supérieur et jusqu'au Permien, l'évolution structurale de cette région est dominée par une importante fracturation en compression dans un bâti devenu rigide, l'essentiel de la surrection étant réalisé dès le Viséen. L'importance des magmatismes (volcanisme acide et granite) et parmi eux, ceux bien représentés qui résultent de l'anatexie crustale, montre que la croûte profonde était encore très chaude et susceptible de déformations plastiques. Les générations successives de ces magmatismes, leur déformation ou non par les décrochements, les directions de champs filoniens de cette époque, permettent de reconstituer les directions régionales de la déformation (Feybesse 1985, Vennat 1985, Grolier *et al.*, 1984, Lerouge et Quenardel 1985, Lerouge et Rolin, 1987). On reconstitue ainsi une direction de raccourcissement majeure orientée N30E à NS jusqu'au Stéphanien.
- C'est dans ce cadre régional que le complexe granitique d'Échassières se met en place, la dernière intrusion venant d'être datée (Duthou et Pin ce volume) vers 310 Ma. Gagny *et al.* (1984) et Feybesse (1985) constatent la contemporanéité de cette mise en place et d'une compression maximale orientée N20E. Cette direction est compatible à la fois avec la création ou l'accentuation de l'antiforme de la Bosse (Grolier, 1971) dont le complexe granitique occupe la terminaison périclinale ouest, avec les champs filoniens de microgranites alumineux à deux micas, cordiérite, orientés N20-30E, et avec des couloirs N60E affectés d'un cisaillement senestre modéré.

3.2. — La forme en subsurface du complexe d'Échassières

La géophysique (gravimétrie, sondages électriques, magnétisme) montre que le complexe d'Échassières qui n'affleure que sur 6 km² environ, présente sous une faible couverture de micaschistes (0 à 300 m) une extension de l'ordre de 40 km² correspondant approximativement au contour –31,0 mgal de la gravimétrie (Vignerresse, *et al.* 1985 et Vignerresse, ce volume, fig. 3-4). Cette extension est surtout notable au nord et à l'est du massif. Le granite plonge rapidement sous les micaschistes au sud et à l'ouest d'après les données gravimétriques. Cette morphologie du toit du granite est également indiquée par l'effet des failles N20° sur le découpage du contact granite-micaschistes à l'affleurement qui très marqué au nord est très peu visible au sud. En ce qui concerne la bordure sud, les sondages électriques, réalisés à

proximité de la carrière de Beauvoir, étalonnés sur des sondages existants, montrent que les micaschistes peuvent devenir extrêmement résistants dans les zones hydrothermalisées au toit du granite. Les isobathes du toit du granite ne peuvent donc être tracées avec précision dans ce secteur ; toutefois, le tracé finalement adopté (Favin et Millon 1984, Ezano et Poinclou, 1985) s'accorde bien avec la cartographie des anomalies gravimétriques légères proposée par Gable (1972) dans ce secteur (cf : Gagny et Jacquot, ce volume, fig. 5 et Vignerresse, ce volume fig. 5).

L'épaisseur moyenne du complexe granitique d'après l'amplitude de l'anomalie négative (6 à 7 mgal) et les contrastes de densité mesurés entre schistes et granite seraient d'environ 3 à 4 km avec des racines se prolongeant jusqu'à 6 km de profondeur. L'épaisseur du granite serait plus faible au nord car dans ce secteur l'anomalie magnétique est moins marquée que l'anomalie gravimétrique. Cette morphologie repose sur l'hypothèse d'une différence de densité constante entre les micaschistes et les granites.

Si l'on envisage sous les micaschistes, à 1 ou 2 km de profondeur, l'existence de terrains, plus denses, ceci tend à réduire la puissance du complexe. Cette réduction d'épaisseur est toutefois peu importante et s'annule si l'on admet une croissance de la densité des granites en profondeur en raison de leur évolution vers des termes moins différenciés.

3.3. — Organisation interne, chronologie relative des intrusions

Le complexe d'Échassières est considéré comme composé d'au moins trois unités magmatiques qui sont par ordre chronologique de mise en place (fig. 2 et 3) :

1. — Le granite non affleurant de La Bosse, considéré comme nécessaire pour expliquer le stockwerk à ferberite de La Bosse, bréchifié par le granite affleurant des Colettes (Aubert, 1969) et les auréoles géochimiques d'ensemble du béryllium, du tungstène et du fluor et probablement de l'arsenic (Aubert, 1969 ; Burnol et Viallefond, 1984). Ce granite présenterait le volume le plus important. Ses limites sont estimées à partir des contours de l'anomalie gravimétrique à –31,0 mgal. L'activité métallogénique maximale de ce granite, marquée spécifiquement par les anomalies de haute intensité du tungstène, du bismuth et du molybdène (ces deux dernières étant nettement plus faibles), se localise immédiatement au sud du granite des Colettes (secteur de la Bosse et des Bois Menus) où elle est recoupée par le granite postérieur de Beauvoir.

2. — Le leucogranite à biotite-muscovite et cordiérite des Colettes représente à l'affleurement l'intrusion la plus importante. Il est riche en fluor, lithium et étain. Il est enveloppé au nord et nord-ouest par les isanomaes : F > 2 220 ppm, Li₂O > 500 ppm et Sn > 65 ppm. Dans la partie méridionale, ces isanomaes le débordent largement. Ceci peut correspondre à une plus grande extension du granite vers le sud ou une diffusion plus large des fluides vecteurs de ces éléments en réponse à une fracturation plus importante (fracturation N20 surtout). Les pendages très faibles des contacts granites-micaschistes tels qu'ils peuvent être déduits de la gravimétrie et des sondages électriques, suggèrent que le niveau actuel d'érosion tangente la partie apicale du complexe granitique. Le caractère très évolué du granite des Colettes et sa très faible différenciation (Raimbault et Ouin, 1984) appuient cette idée. Il semble que nous disposions à Échassières de la

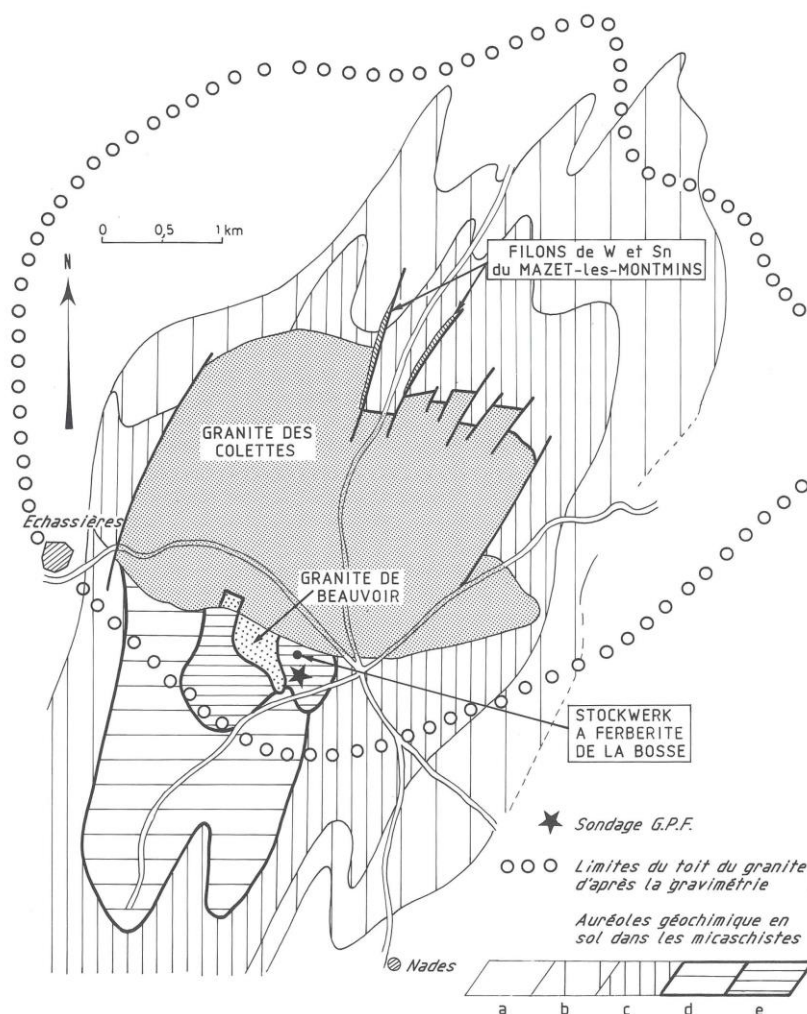


Fig. 2. — Carte géologique du complexe d'Echassières. Les auréoles de dispersion des éléments géochimiques d'origine granitique sont représentées dans les micaschistes encaissant (a) au toit des granites; (b) auréole atténuée ($Li > 200$, $Be > 6$, $As > 200$, $F > 200$, $P > 1600$, $Sn > 22$, $W > 18$); (c) auréole interne ($Li > 250$, $Be > 6$, $As > 320$, $F > 2000$, $P > 2000$, $Sn > 70$, $W > 45$); b et c sont supposées en relation avec le granite des Colettes ou le granite caché de la Bosse; (d) auréole spécifique des granites à métaux rares du type Beauvoir à niveau de teneur exceptionnellement anormaux: $Li_4 500$, $Sn_4 100$, $As_4 1000$, $F_4 4500$; (e) anomalie à $W_{4 00}$ et $Bi_{4 20}$ spécifique du stockwerk de la Bosse, recoupée par la lame granitique de Beauvoir. (valeur en ppm.) (d'après L. Viallefond, 1985).

Geological map of the Echassières granitic complex, showing composite dispersion aureoles, in the micaschists (a) roofing the granite, for certain characteristic elements emanating from the granite. (b) external aureole; (c) internal aureole (these anomalies in $Li + Be + As + F + P + W$ are assumed to be related either to the Colettes granite or to the concealed Bosse granite); (d) highly anomalous halo specific to the most evolved rare-metal-bearing granites of Beauvoir type ($Li + Sn + As + F$); (e) $W + Bi$ anomaly specific to the Bosse ferberite stockwork. Contour in open circles = limits of the top of the granite interpreted from gravity data.

quasi-totalité du volume granitique mis en place dans cette région. Ceci est d'un intérêt capital pour une modélisation quantitative et globale des processus pétrogénétiques et métallogéniques. Les premières données géochimiques (Raimbault et Ouin, 1984) montrent que le compartiment

central présente un caractère légèrement moins différencié (le plus riche en cobalt en particulier). La remontée de ce bloc mettrait à l'affleurement des faciès plus profonds de l'intrusion. C'est donc dans ce compartiment qu'un sondage serait susceptible de rencontrer le plus rapidement des faciès moins

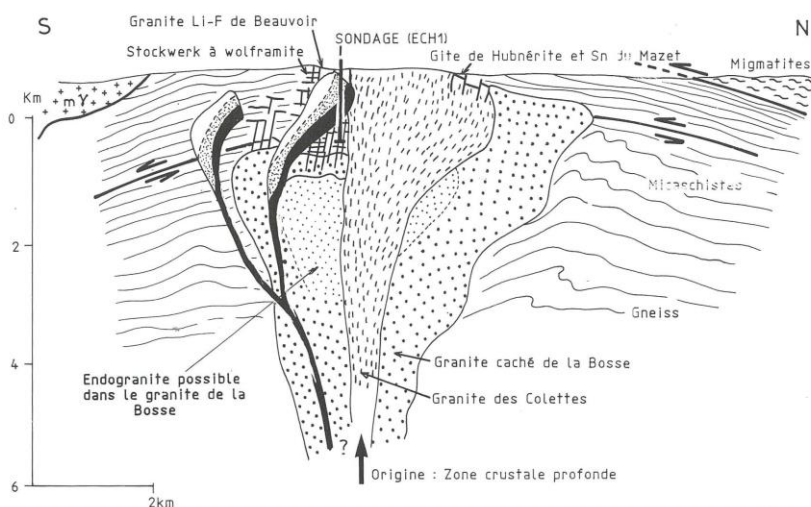


Fig. 3. — Coupe interprétative du complexe granitique d'Échassières, dessinée en respectant les contraintes de la gravimétrie, de la chronologie des intrusions, des données de la pétrologie structurale et situant la zone de différenciation et d'origine des magmas dans la croûte profonde. Deux corps de granites à métaux rares, du type Beauvoir, sont schématiquement dessinés avec trois unités constitutives.

Interpretative N-S section through the Échassières granitic complex, drawn on the basis of gravity data, the order of intrusion of the various components of the complex and structural petrologic information on the dynamics of emplacement and the origin of the zone of differentiation in the deep crust. Two bodies of rare-metal granite of Beauvoir type are represented, each comprising three successively emplaced units.

évolués du granite des Colettes. Enfin, la morphologie des contacts du granite avec les micaschistes en « marches d'escalier » et l'existence de blocs basculés au sein du magma suggèrent un mode de mise en place de type « magmatic stopping ». Les études structurales de surface (Gagny et al. 1984 ; Gagny et Jacquot, ce volume), ont montré que le granite des Colettes se met en place dans une ouverture en « pull apart » induite par une compression σ_1 N20E, provoquant un cisaillement senestre N60E.

3. — Le granite de Beauvoir à albite-lépidolite-topaze, localisé à la bordure Centre-Sud du granite des Colettes, représente en surface une intrusion de très faible dimension (environ 14 ha) morcelée en deux unités. Une mise en place par « magmatic stopping » est également indiquée par l'existence de blocs de micaschistes effondrés rencontrés dans la carrière de Beauvoir et en sondage (blocs de dimension allant jusqu'à 15 m de puissance).

Ce granite extrêmement riche en Li, Rb, F, Sn, Ta, Nb, Be constitue un minéral potentiel de Sn, Li, Be et Ta. Les anomalies géochimiques de forte intensité (Sn, Li et F) suggèrent une extension vers le nord du granite de Beauvoir, sous le granite des Colettes. L'extension en profondeur de ce granite n'a pu être modélisée en géophysique. L'image gravimétrique résiduelle après soustraction du gradient régional indique une extension vers le sud-est du granite de Beauvoir (Vignerresse, ce volume, fig 6).

Les anomalies géochimiques de forte intensité de l'étain, du lithium et du fluor suggèrent l'existence de plusieurs autres coupoles de type Beauvoir. L'une d'entre elles localisée à l'ouest et à proximité immédiate du château de Beauvoir est très fortement marquée par des anomalies géochimiques

identiques à celles du granite de Beauvoir, superposées à une anomalie gravimétrique légère N20E. D'autres coupoles pourraient également exister plus au sud le long d'axes N20. Elles sont marquées par des anomalies géochimiques identiques et de faibles anomalies négatives en gravimétrie. (Gable, 1974 in Vignerresse, ce volume fig. 5).

Des filons de microgranite et lamprophyres de direction N25E s'alignent principalement entre le granite des Colettes et le microgranite de Pouzol-Servant au sud et sont recoupés par les granites des Colettes et de Beauvoir. (cf. carte fig n°4 in Jacquot et Gagny, ce volume)

3.4. — Les types de minéralisations associées spatialement au complexe d'Échassières

Quatre périodes principales d'activité métallogénique ont été reconnues dans la région d'Échassières :

1. — Stockwerk à ferberite de la Bosse, bréchifié par les granites des Colettes et de Beauvoir ; il fait l'objet dans ce volume (Aissa et al. a et b) d'une étude des inclusions fluides et de la minéralogie des ferberites ;
2. — Filons à hubnérine du Mazet et des Montmins recoupés au nord le granite des Colettes et les micaschistes ;
3. — Le gisement d'étain, lithium, béryllium et tantale de Beauvoir, auquel sont probablement liés chronologiquement les filons N5 à N20 à Sn ou Sn-Cu (télescopage possible avec une source de cuivre en relation avec une intrusion dioritique localisée à sa bordure sud Les Chaillats, les Bois Menus, les

Pierres Cassées, la Gourdonne; c'est lui que le sondage recoupe et qui fait l'objet de plusieurs approches thématiques dans ce volume;

4. — Les filons à plomb + zinc + argent situés à la bordure est du granite des Colettes.

Enfin, d'autres manifestations hydrothermales sont intéressantes à signaler. Les filons à antimoine présents au sud-est des Chaillats sont à rattacher régionalement au microgranite de Pouzol-Servant. Des indices d'uranium ont été prospectés par le CEA dans les micaschistes au sud du granite des Colettes.

Les gisements de kaolin résultent d'une double activité : hydrothermale qui initialise le phénomène le long de structures N20 dans le granite des Colettes et le granite de Beauvoir qui développe de manière importante la kaolinisation dans la partie apicale de celui-ci, l'altération, supergène y restant subsidiaire.

4. — Résultats majeurs acquis grâce au sondage sur le système magmatique et hydrothermal d'Échassières

Dans cette partie, nous avons regroupé les résultats marquants obtenus grâce au sondage selon des thèmes clés correspondant aux objectifs initiaux du projet et dont l'intérêt général peut servir de référence pour d'autres objets du même type. Les grandes étapes de l'évolution géologique venant d'être présentées ci-dessus, nous n'aborderons ici les problèmes de chronologie qu'au niveau des épisodes magmatiques et hydrothermaux mis en évidence dans ce complexe. Les six thèmes clés choisis sont les suivants :

1. — dynamique de mise en place des magmas,
2. — pétrogenèse des magmas,
3. — reconstitution de l'évolution spatiale et temporelle des conditions de pression, température et composition des circulations de fluides et des altérations associées,
4. — géochimie et cristallochimie des minéraux à solutions solides complexes,
5. — genèse des concentrations métalliques,
6. — propriétés pétrophysiques du bâti.

La figure 4 tente d'utiliser les résultats du forage G.P.F. pour reconstituer la forme du granite de Beauvoir. On trouvera la coupe détaillée du forage dans Rossi et al., ce volume.

4-1. — La dynamique de mise en place des magmas

Les études structurales préliminaires réalisées en surface sur les granites des Colettes et de Beauvoir permettent selon Gagny et Jacquot et Jacquot et Gagny (ce volume) de rejeter un modèle de mise en place par gonflement diapirique pour ces deux granites. Le granite des Colettes se mettrait en place dans un système de « pull-apart » induit par des cisaillements régionaux N60 (Gagny et Jacquot 1985) compatible avec une contrainte régionale σ_1 orientée N20E, induisant des cisail-

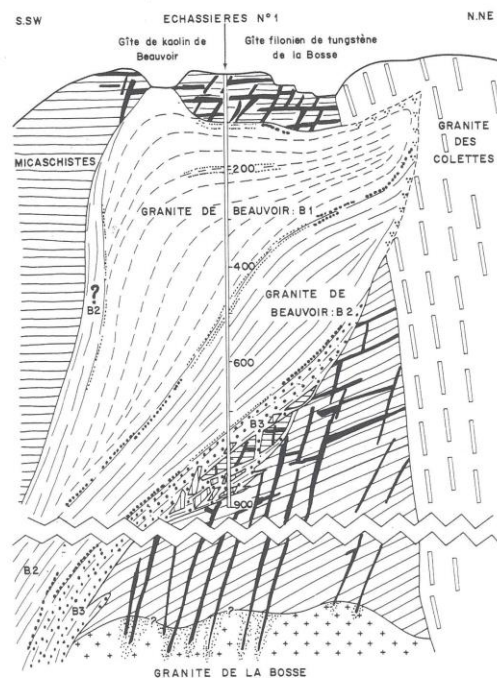


Fig. 4. — Coupe interprétative du granite de Beauvoir. Cette coupe est dessinée à partir des nouvelles observations structurales et pétrographiques réalisées en surface et dans le forage G.P.F. de 900 m. Les figurés sont orientés en fonction des pendages pour les foliations magmatiques ou celles des micaschistes. Elle montre les relations chronologiques et géométriques entre le granite de Beauvoir et les granites antérieurs : granite des Colettes et granite caché de la Bosse, lui-même en relation supposée avec le stockwerk à ferberite de la Bosse. Dans le granite de Beauvoir, les lignes de points fins suggèrent l'extension latérale des zones de litage magmatique observées dans le forage G.P.F. entre les unités B1, B2, B3 ou dans l'unité B1.

Section through the Beauvoir granite, drawn on the basis of surface observations and data from the G.P.F. borehole. The ornament indicates the attitudes of magmatic foliation in the granite and schistosity in the micaschist, where the ferberite stockwork, assumed to be related to the concealed La Bosse granite, is also shown.

lements senestres N60E et des failles normales et filons distensifs N20E. Ce champ de contrainte existait déjà avec les mêmes caractéristiques, avant la mise en place du granite des Colettes, car il contrôle le stockwerk de la Bosse et le champ filonien de microgranite à cordiérite N25E, encore antérieur. Ce dernier est nettement postérieur (fig. 1) aux dépôts volcaniques viséens de Manzat et d'après Vennat (1985) serait en relation avec le leucogranite monzonitique de Champ Valmont. La signature géochimique (Li, As, W, Be) de ce granite obtenu dans le cadre de « l'inventaire national des gîtes minéraux » est très similaire à celle obtenue autour du complexe d'Échassières et particulièrement à celle qui est centrée autour du stockwerk de la Bosse. Ce granite de Champ Valmont pourrait représenter un équivalent très probable de la masse principale profonde du complexe d'Échassières qui pourrait être à l'origine du stockwerk à ferberite (concept du « granite caché de la Bosse »). Seule cette masse granitique

cachée dont la signature gravimétrique coïncide relativement bien avec l'emprise de l'antiforme de la Bosse, pourrait avoir eu une dynamique de mise en place de type diapirique.

Malgré l'absence de perturbation des foliations des micaschistes encaissants et la mise en place probable par « cauldron subsidence » des deux granites, Jacquot et Gagny, (ce volume) admettent toutefois que la dynamique ascensionnelle du magma des Colettes (linéation magmatique verticale) a été suffisante pour induire, à sa bordure sud verticale, l'ouverture dans les micaschistes de « caisson, dont celui de Beauvoir d'orientation subméridienne ». C'est cette ouverture saccadée qui aurait permis la mise en place des différentes unités magmatiques constituant le granite de Beauvoir par pulsions successives. La mise en place du granite de Beauvoir serait alors synchrone de celui des Colettes. Si les observations de Gagny et Jacquot (1985) dans la carrière de Beauvoir suggèrent une costructuration à l'état magmatique dans la zone à faciès mixtes au contact Colettes-Beauvoir (malheureusement très kaolinisée), d'autres observations sont plutôt en faveur d'une antériorité de cristallisation du granite des Colettes. La même zone mixte traversée par les sondages ES4 et ES5 (Aubert 1969) a des caractéristiques géochimiques qui conduisent Raimbault (1985) à l'interpréter à la suite d'Aubert (1969) comme du granite des Colettes métasomatisé par les fluides issus de Beauvoir. Une étude minéralogique fine serait toutefois nécessaire pour préciser l'origine postsolidus ou synmagmatique de cette métasomatose. Pour Aïssa et al., (ce volume), la mise en place du granite de Beauvoir serait postérieure à la solidification des Colettes car un filon de granite qui serait de type Beauvoir (malheureusement très kaolinisé et donc non caractérisé géochimiquement) apparaît nettement sécant sur le granite des Colettes. Des variations locales du degré de cristallisation du granite des Colettes lors de la mise en place du granite de Beauvoir, pourrait toutefois expliquer ces différentes observations qui ne seraient contradictoires qu'en apparence.

La postériorité du granite de Beauvoir peut aussi être argumentée par l'observation dans les micaschistes du toit et du mur d'un plan d'aplatissement E-W vertical exprimé sous forme d'une légère crénulation de la schistosité horizontale S1-2 antérieure. Ce plan qui contrôle les néocristallisations de biotite et andalousite (Audren et al., ce volume, et document BRGM n° 124) est attribuable au granite des Colettes du fait de son orientation parallèle au contact sud de ce granite, mais orthogonale à ceux du granite de Beauvoir. Une vérification de cette conclusion devra être recherchée par une analyse de l'attitude de ce plan dans les panneaux de micaschistes actuellement disloqués à la base du granite de Beauvoir (zone - 790 à - 880 m).

L'attitude des schistosités et linéations des deux principaux panneaux de micaschistes de la base (799 à 817 m et 882 à 900 m) est voisine de celle observée dans les micaschistes du toit. Ce fait, combiné à une diminution de la percolation par F et Li (Piantone et Burnol, ce volume) ainsi que l'absence d'altération hydrothermale (topaze, ixiolite, micas lithiques) (Aïssa et al., ce volume) surimposée dans le stockwerk du panneau basal nous conduisent à considérer les micaschistes de la base du sondage comme le mur très probable du corps de granite de Beauvoir.

Les fabriques magmatiques moyennes du granite de Beauvoir, foliation E-W à 115° E plongeant à 40 - 55° S, ont été déterminées par des approches différentes, donnant des résultats globalement concordants :

- mesures directes macroscopiques sur les carottes orientées (Jacquot, ce volume et Feybesse et al., 1985),
- mesures microstructurales sur lame mince Gagny et Jacquot 1985 ; Jacquot ce volume, Bouchez et al., ce volume,
- mesures d'anisotropie de susceptibilité magnétique sur carottes orientées (Bouchez et al., ce volume),

Les limites entre les différentes unités magmatiques mises en évidence par la géochimie (Raimbault et Azencott ; Rossi et al., Gagny, Monier et al., ce volume) sont marquées par une intensification de la fabrique magmatique (Bouchez et al., Jacquot, ce volume) et une variation de l'attitude des plans et directions linéaires de fluidalité (Bouchez et al., Jacquot ce volume). Ceci est particulièrement remarquable vers 450-500 m de profondeur, à la base de l'unité supérieure B1, la plus évoluée, définie lors de la description préliminaire du sondage (Cuney et al., 1986)

Si statistiquement la linéation magmatique a pu être définie en direction E-W subhorizontale par l'anisotropie de susceptibilité, une analyse détaillée des résultats de Bouchez et al., (ce volume) et les observations de Jacquot (ce volume) montrent la grande variabilité de ces linéations depuis l'horizontale jusqu'à la ligne de plus grande pente des plans porteurs en particulier au sein des unités B2, B3.

Autant la présentation statistique de Bouchez et al. conduit à homogénéiser l'image de la fabrique de l'ensemble du granite et à rechercher sa cause dans la dynamique crustale régionale, autant la recherche des relations entre structure et hétérogénéité chimique conduisent Jacquot et Gagny, (ce volume) à privilégier les contrôles géologiques locaux de l'environnement (« caissons »), et les contrastes de viscosité inter et intra unités magmatiques superposées. Pour Bouchez et al., la mise en place du granite de Beauvoir serait globalement contrôlée par la logique structurale qu'ils estiment continue du Dévonien au Carbonifère avec des cisaillements ESE-WNW qui structurent toute la pile métamorphique encaissante de façon de moins en moins pénétrative avec le temps aboutissant pour ces auteurs à un « écaillage tardif et translation passive » de blocs lors de la mise en place de Beauvoir. Cette interprétation est en contradiction avec l'analyse structurale régionale de Feybesse et Teggey (ce volume) qui montre qu'à la suite d'un cisaillement vers l'ouest avec mise en nappe au cours du Dévonien, le cycle tectonométamorphique majeur s'achève au début du Carbonifère par une phase de décrochement et chevauchements de blocs en direction de l'est conduisant à une pénéplanation anté Viséen moyen.

Lorsque les granites d'Échassières se mettent en place la contrainte principale observée est orientée N20E. Cette direction bien établie paraît difficilement compatible avec un cisaillement orthogonal sinon sous forme d'une direction « d'échappement » liée à la forme du corps granitique suggérée par l'anomalie gravimétrique résiduelle locale (Vignerresse, ce volume fig. 6).

Remarquons enfin que Royer et Danis (ce volume) montrent que le fort gradient géothermique mesuré dans le forage n'est pas compatible avec une forme peu inclinée vers le sud du « caisson » de granite de Beauvoir.

- De tels magmas, enrichis en F, Li, P, présentent un liquidus de très basse température (Pichavant et al.) et une très faible viscosité (Dingwell et al., 1985). Ces deux caractéristiques

leur permettent une ascension à des niveaux crustaux très élevés, (on en connaît même d'effusifs (verres de Macusani, Pichavant *et al.* 1987, et ongonites Kovalenko et Kovalenko 1984)), dans des ouvertures qui peuvent être de faible puissance (forts contrastes de viscosité avec l'encaissant), avant de se collecter dans des zones en extension de la croûte fragile supérieure. Un important dyke (6 km x 5 à 40 m d'épaisseur) de ce type de magma est connu en Limousin au Nord du granite de Blond (microgranite de Richemont à faciès felsitique, Burnol, 1974)

A l'intérieur du corps polyphasé de Beauvoir, tous les contacts observés entre unités ont enregistré une déformation à l'état magmatique à l'exclusion de tout contact de type visqueux/rigide. Vu la faible dimension de l'ensemble granitique (~ 500 m d'épaisseur reconnue en sondage), la basse température de son solidus et sa mise en place superficielle, son refroidissement est nécessairement très rapide (quelques dizaines de milliers d'années). Ceci implique que les intrusions successives de ses différentes unités se sont effectuées dans un intervalle de temps très bref, contrainte dont il faudra tenir compte dans l'interprétation des résultats de géochronologie isotopique.

4.2. Pétrogenèse des magmas

Il apparaît déjà clairement à partir des études structurales présentées dans le paragraphe précédent que le granite de Beauvoir représente un magma et non une différenciation métasomatique apicale d'un batholite. Les études géochimiques (Raimbault et Azencott, ce volume), expérimentales (Pichavant *et al.*, ce volume) isotopiques (Fouillac *et al.*) et minéralogiques (Monier *et al.*, Rossi *et al.*, Fonteilles, ce volume) sont toutes en faveur d'une empreinte magmatique dominante, pour la plupart des caractéristiques du granite de Beauvoir, à l'exception de certains éléments dont la distribution est fortement perturbée par des altérations tardives et postmagmatiques. Cependant à partir des deux échantillons géochimiques actuellement réalisés (Rossi *et al.*; Raimbault et Azencott, ce volume) focalisés sur des échantillons ne présentant pas macroscopiquement d'évidence d'altération subsolidus, il est difficile de quantifier l'importance de ces perturbations pour chaque élément. Seules des études ultérieures réduites à des zones clés : litages magmatiques, environnement des zones d'altération, sous unités à zonalités répétitives ... permettront de préciser la réalité et l'intensité de la migration de certains éléments aux stades magmatiques à subsolidus.

Rappelons que dans les hypothèses métasomatistes (Beus *et al.*, 1962), les zonalités décrites correspondant à la transformation d'apogranite, depuis des termes à biotite profonds jusqu'au terme à albite-lépidolite n'excèdent pas une puissance totale de l'ordre de 700 m, le terme à albite-lépidolite étant d'ordre décimétrique. Or à Beauvoir ce terme à lépidolite peu ferrifère (faciès B1 et sommet du B2) représente déjà environ 500 m. Si l'on veut appliquer ce mécanisme génétique au granite de Beauvoir en conservant les ordres de grandeur homothétique pour l'épaisseur des zones, on obtient une colonne métasomatique totale de plusieurs milliers de mètres, ce qui paraît physiquement irréaliste.

• Les rapports initiaux du strontium (0,710 à 0,715, Duthou et Pin, ce volume) et le $\delta^{18}\text{O}$ élevé du granite non altéré (11 ‰, Fouillac *et al.*, ce volume) confirment l'origine par fusion crustale de ce type de magma, déjà bien établie et confortée aussi par l'absence totale d'enclaves magmatiques basiques.

et Pin, ce volume) et le $\delta^{18}\text{O}$ élevé du granite non altéré (11 ‰, Fouillac *et al.*, ce volume) confirment l'origine par fusion crustale de ce type de magma, déjà bien établie et confortée aussi par l'absence totale d'enclaves magmatiques basiques.

• Les trois unités pétrographiques (B1, B2, B3) reconnues lors de la réalisation du log du sondage (Cuney *et al.*, 1985, 1986) dans le granite de Beauvoir, ont été confirmées par la plupart des études réalisées au cours de ce projet. Elles se caractérisent minéralogiquement (Rossi *et al.*, Ohnenstetter et Piantone, Monier *et al.*, Fonteilles, ce volume) géochimiquement (Rossi *et al.*, Raimbault et Azencott, Gagny, Duthou et Pin, Fouillac *et al.*, ce volume) structuralement (Jacquot, Bouchez *et al.*, ce volume) ainsi que de façon moins nette par leurs propriétés pétrophysiques (Royer et Danis, Vignerresse et Cannat, Straub, Bouchez *et al.*, ce volume). Toutefois les limites entre ces trois unités ne sont pas toujours localisées exactement au même endroit selon les critères ou les éléments choisis et des sous-unités ont été définies par un certain nombre de travaux détaillés (Gagny; Jacquot; Bouchez *et al.*; Monier *et al.*, Raimbault et Azencott; Rossi *et al.*; ce volume). La variation de la localisation de ces limites définies par les études minéralogiques et géochimiques peut provenir de la mobilité différentielle de certains éléments dans les zones de transition, chaque ayant pris des éléments différents pour caractériser ses limites. Ces unités se sont mises en place successivement, leur ordre exact n'a pas pu être défini de manière équivoque. Les caractéristiques géochimiques les différenciant ont été acquises en profondeur avant leur mise en place (Raimbault et Azencott, Gagny, Fonteilles, ce volume)

• Les études expérimentales de Pichavant *et al.* (ce volume) ont par contre permis d'estimer la très faible température des solidus, des liquidus et la disparition successive des phases au cours d'expérience de fusion des faciès B1 et B2 à 1 et 3 kb. Les résultats obtenus sont très proches de ceux publiés très récemment par Weidner et Martin (1987) sur un granite du même type, mais à fluorite, appartenant au complexe de Saint-Austell (batholite cornubien, Grande-Bretagne). La disparition de la lépidolite à des températures proches du liquidus à haute pression, suggère, dans la mesure où les expériences en cristallisation le confirmeront, une cristallisation très précoce de ce mica à haute pression comme l'indique la pente positive de la courbe de stabilité des muscovites par rapport au solidus des granites. Ceci explique la mémoire remarquable de ce minéral, décryptée par Monier *et al.* et Fonteilles (ce volume). Les températures obtenues doivent être considérées comme indicatives car la quantité et la composition de la phase fluide dissoute dans le magma de Beauvoir sont mal connues. Les expériences ont été réalisées en régime $\text{PH}_2\text{O} = \text{P}$ totale alors que Beauvoir était probablement sous-saturé au moment de sa mise en place comme le suggère l'absence de différenciations pegmatiques. Les teneurs en F et Li utilisées dans les expériences sont les teneurs résiduelles fixées par les minéraux ayant cristallisé dans les granites utilisés. Du fait de l'importante diffusion de F et Li dans l'encaissant micaschisteux ces teneurs devaient être originellement beaucoup plus élevées dans le magma. On peut toutefois remarquer que ces deux effets auront tendance à s'annuler. L'absence de saumures précoces piégées dans les topazes des faciès B2 et B3 est plutôt en faveur d'une sursaturation tardive de ces magmas.

• L'ordre de cristallisation des différents minéraux du granite, tel qu'il résulte des observations pétrographiques et structurales, est conforme à l'ordre prédit par l'expérimenta-

tion. On constate donc que ces granites très évolués sont loin d'avoir des compositions de type eutectique. Ils se distinguent ainsi très clairement des leucogranites non peralumineux à biotite ferrifère, terme de la différenciation des granites calcoalcalins.

- L'étude des inclusions fluides (Aïssa et al., ce volume) et, en particulier, les phénomènes de décrépitation des inclusions du stockwerk lors de l'intrusion du granite des Colettes et l'ébullition des saumures magmatiques ont permis de contraindre les pressions de mise en place des ensembles granitiques. Leur mise en place serait très superficielle : 3,7 à 4,5 km de profondeur pour le granite des Colettes et environ 3 km pour le granite de Beauvoir. Ces estimations sont compatibles avec l'évolution du bâti métamorphique décrite précédemment (§ III).

- Le modèle de genèse et d'évolution conduisant à des magmas fortement enrichis en éléments incompatibles du type de ceux observés à Beauvoir n'a toutefois pas pu être contraint de manière univoque. L. Raimbault (ce volume) a passé en revue et proposé plusieurs modèles possibles, pour la genèse de ce type de magma, cependant l'étude concernant plus directement le granite de Beauvoir (Raimbault et Azencott, ce volume) montre qu'aucun des modèles proposés (cristallisation et fusion fractionnée ou à l'équilibre, diffusion thermogravitationnelle, immiscibilité, mélanges) ne permet d'expliquer totalement les caractéristiques de ce granite.

Pichavant et al. (ce volume) proposent une origine par cristallisation fractionnée du magma de Beauvoir à partir d'un magma parent non précisé, par référence aux études des macusanites et tuffis associés du Pérou (Pichavant et al., 1987). Cependant aucune argumentation directe sur l'exemple de Beauvoir n'est apportée.

- Un des points importants restant à résoudre est le cogénéisme ou le non-cogénéisme entre les différentes unités magmatiques mises en évidence dans le granite de Beauvoir et entre ces unités et le granite des Colettes. Quelques observations originales réalisées grâce à ce sondage, permettent de mieux formuler les hypothèses et d'imaginer de nouvelles recherches à entreprendre sur ce problème très important de la famille des leucogranites peralumineux.

En ce qui concerne le granite de Beauvoir, les minéraux à composition variable montrent, dans les faciès les plus évolués (B1) des oxydes de Ta-Nb piégés dans les topazes précoces et des cœurs de mica, dont les compositions se recouvrent partiellement avec celles des faciès moins évolués de type B2 (Rossi et al., ce volume). La présence systématique de microlite intergranulaire, plus tardif, dans B1, de même que la très faible teneur en fer de ses lépidolites, sont plus en relation avec la composition chimique du magma et ses conditions de cristallisation à faible pression, que des indices de non cogénéisme entre B1 et B2. Il en est de même de la cristallisation précoce du feldspath potassique dans les faciès B2-B3.

D'après la composition des micas blancs analysés dans les différents termes magmatiques du complexe d'Échassières, Fontailles (ce volume) considère que l'ensemble est très probablement cogénéétique. L'évolution magmatique se produirait depuis le granite des Colettes constituant le terme le moins différencié, vers le granite de Beauvoir, les microgranites enclavés dans ce dernier constituant des faciès intermédiaires. Toutefois, les tendances d'évolutions observées

dans les micas du granite des Colettes ne peuvent être poursuivies sans ambiguïté en direction du granite de Beauvoir. Une lacune de composition importante les sépare. Les termes du type « granulite ultime » du massif de Saint Sylvestre peuvent représenter des jalons intermédiaires entre ces deux types de granites (Monier et al., ce volume).

Les études de géochimie trace et des isotopes radiogéniques sont encore insuffisamment développées pour résoudre ce problème de cogénéisme ou non cogénéisme entre les différents termes du complexe d'Échassières.

Les rapports isotopiques initiaux du strontium obtenus sur les unités B1 et B2 (Duthou et Pin, ce volume) seraient plutôt en faveur d'un non-cogénéisme de ces deux termes. Cependant, les incertitudes élevées sur les résultats (recouvrement des fourchettes d'erreur) et la différence d'âge importante observée entre B1 et B2 (299 ± 8 et 315 ± 9 Ma), alors que ces deux ensembles apparaissent pétrographiquement comme étant simultanément visqueux (figures de mélange magmatique entre les deux unités), ne permettent pas de retenir cette interprétation de manière fiable. Duthou et Pin (ce volume), envisagent une mise en place synchrone de B1 et B2 à 315 Ma avec rajeunissement à 299 Ma de la partie supérieure de la coupole, ce qui enlèverait toute signification génétique aux différences de strontium initial.

4.3. — Reconstitution P, T, t, X des circulations hydrothermales

L'histoire des circulations hydrothermales a été principalement abordée dans les études concernant les paragneuses argileuses (Merceron et al. (a) et (b), ce volume), les inclusions fluides du granite (Aïssa et al., ce volume) du stockwerk à ferberite (Aïssa et al., ce volume) et les isotopes stables (Fouillac et al., ce volume).

- Le premier épisode hydrothermal observé dans le secteur correspond à celui ayant formé le stockwerk à ferberite de la Bosse, accompagné par des filons d'aplite et de pegmatite, et antérieur aux deux granites affleurants. Sa genèse aurait été induite par le granite hypothétique de la Bosse. Ce granite se localiserait plus profondément sous le panneau inférieur de micaschistes recoupés également par des filons à ferberite rencontrés au cours du sondage GPF. (Aïssa et al. ((a), ce volume) ont montré une zonalité verticale de la composition des wolframites sur une extension du stockwerk recoupé environ 200 m. Avec la profondeur une diminution des teneurs en niobium et une croissance du rapport Fe/Fe + Mn se parallélise avec une augmentation de l'intensité des altérations d'épentes représentées par des biotites probablement lithinifères et une tourmalinisation des micaschistes surtout développée dans le panneau basal. Ceci suggère que l'on s'approche du granite supposé de la Bosse. Par rapport à la plupart des gisements péritholites de wolframite du Massif central, le stockwerk de la Bosse représenterait un des systèmes les plus éloignés du corps intrusif (Aïssa et al., ce volume). Cette altération à biotite se retrouve associée à de la phengite de manière diffuse et filonienne dans tout le volume des micaschistes, mais d'intensité beaucoup plus marquée à la base (Merceron et al. (a), ce volume). Sa température a été évaluée par ces mêmes auteurs à 400-350 °C pour une pression proche de 1 kbar. L'âge K-Ar des phengites filoniennes mesuré à $324-320 \pm 7$ Ma correspondrait donc bien à un épisode antérieur à Beauvoir. Par contre, les phengites diffuses (environ 295 Ma), seraient contemporaines de la mise en place ou pourraient avoir été rajeunies par

l'effet thermique de Beauvoir ou les circulations hydrothermales induites. Les fluides associés au stockwerk sont aquo-carboazotés.

- Les fluides les plus précoces faisant suite à l'intrusion de Beauvoir sont localisés dans les topazes du faciès apical (B1) du granite de Beauvoir (Aïssa et *al.*, ce volume). Il s'agit de saumures aqueuses (25 à 30 % de NaCl), s'homogénéisant à haute température (490 à 590 °C). Elles sont interprétées comme représentant le fluide démixté du magma, car leur température est identique à celle du solidus saturé en eau du granite de Beauvoir (560 à 580 °C à 1 kbar). L'existence de chlorure de Li dans ces fluides est proposée pour expliquer les eutectiques très bas (–60 °C) mesurés sur ces inclusions. La démixtion de ces fluides aurait provoqué une augmentation de pression temporaire et conduit à une fracturation hydraulique du toit de micaschistes. La baisse de pression résultant du passage d'un régime lithostatique à un régime hydrostatique conduit à l'ébullition de ces fluides. Cette ébullition donne naissance par démixtion à une phase vapeur peu salée et des saumures (30 à 50 % pds NaCl). Leur percolation dans le stockwerk à ferbélite y induit la dissolution du quartz et le développement de micas lithinifères, de topaze et la modification des compositions des wolframites du stockwerk supérieur (corrosion des cristaux, développement de wolframioïlites, oxydation du fer, hupnéritisation locale). Ils sont responsables d'une partie du métamorphisme hydrothermal observé dans les micaschistes et le granite des Colettes qui produit les halos géochimiques de forte intensité observés pour de nombreux éléments (Li, F, Sn en particulier) (Aubert, 1969, Burnol et Viallefond 1985, Viallefond 1985) autour de l'intrusion de Beauvoir. Cependant le message géochimique donné par ces fluides n'a pas pu être différencié de celui produit par le granite des Colettes ou de celui du stockwerk à ferbélite, par l'étude statistique multiélémentaire sur les micaschistes du sondage (Viallefond et Burnol, ce volume).

- D'après les données des isotopes stables, des fluides d'origine météorique interagissent dès le stade magmatique avec le granite de Beauvoir (Fouillac et *al.*, ce volume). Ces fluides induiraient une forte baisse des $\delta^{18}\text{O}$ du quartz et des autres minéraux du granite dont l'intensité augmenterait de la base au toit de la lame. Différentes observations indiquent que ce fluide devait avoir des caractéristiques oxydantes :

- augmentation du rapport $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ dans les lépidolites (Monier et *al.*, ce volume) et dans le microlite (Rossi et *al.*, ce volume) de la base au sommet de la lame granitique,

- présence de Fe^{3+} dans les ferbélites de la partie supérieure du stockwerk, où des évidences d'interaction avec des phases fluides sont observées (Aïssa et *al.*, ce volume),

- diminution des teneurs en uranium de la base au sommet de la lame compatible avec son fractionnement dans une phase fluide oxydante au moment de la sursaturation du granite de Beauvoir (Cunéy et Brouand, ce volume) ; la diminution drastique des teneurs en uranium dans les zones corticales des microlites de B1 dont le cœur contenait 6 à 12 % d'uranium, ainsi que les microlites les plus tardifs (Ohnensetter et Piantone, ce volume ; Kosakevitch, 1976 ; Rossi et *al.* ce volume) suggèrent que l'augmentation de FO_2 s'est produite pendant la cristallisation de l'unité B1.

- le comportement de l'étain qui ne forme pas ou très peu de filons autour de la coupole de Beauvoir, ce métal étant mobile

dans des solutions réductrices ; sa rétention au sein du granite de Beauvoir est en faveur de conditions oxydantes lors de la cristallisation du magma.

L'intervention d'un tel fluide météorique a pu favoriser la sursaturation en fluide du magma. Le phénomène de mélange entre les saumures magmatiques et ce fluide d'origine externe probablement peu salé qui devrait en résulter n'apparaît toutefois pas très bien enregistré au niveau des inclusions fluides. Les fluides observés au niveau –207, de salinité variable (8 à 20 % équivalent pds NaCl) et encore relativement chauds ($420 < T_h < 490$ °C) pourraient correspondre à ce stade. Ils présentent cependant une lacune de composition et de température avec les saumures précoces. La rapidité du passage entre le régime lithostatique lors de la mise en place du granite de Beauvoir (560–580 °C, 800 à 900 bars) et le régime hydrostatique lors de la fracturation hydraulique du toit avec chute brutale de T et P (350–400 °C à 100–200 bars) pourrait expliquer le faible enregistrement de ce phénomène de mélange.

La chute de pression et l'ébullition du magma lors de la fracturation hydraulique du toit ont dû obligatoirement entraîner la cristallisation et le refroidissement rapide du granite de Beauvoir à ce stade. L'interaction des fluides avec le magma de Beauvoir a donc dû se produire plus probablement avant cette fracturation hydraulique, c'est-à-dire en régime de pression lithostatique lors de sa mise en place ou éventuellement au cours de son ascension. Des données supplémentaires sur les isotopes stables seraient toutefois nécessaires pour montrer si la dérive des compositions de $\delta^{18}\text{O}$ des minéraux dans les faciès B1–B2 et B3 est réellement continue. S'il y a rupture entre les trois unités, cette interaction fluide-magma pourrait s'être produite avant l'injection des magmas dans leur site actuel, mais il pourrait s'agir également de signatures initiales différentes dans l'hypothèse de magmas anatectiques génétiquement indépendants.

- La faible température, le volume restreint de l'intrusion, son niveau de mise en place superficiel et la fracturation hydraulique précoce du toit entraînant rapidement l'établissement de circulations convectives, sont autant de facteurs qui ont provoqué un refroidissement en un temps très bref de ce granite. Seuls les granites des Colettes et de la Bosse (si leur mise en place est chronologiquement très rapprochée de celui de Beauvoir) ont pu apporter la chaleur nécessaire pour maintenir les circulations convectives pendant une durée supérieure à quelques dizaines de milliers d'années. D'après les âges obtenus par la méthode K–Ar sur les minéraux d'altération : 273 à 150 Ma (Merceron et *al.* (b), ce volume) une ou plusieurs anomalies thermiques successives d'origine profonde doivent être nécessairement invoquées.

- Les témoins des circulations fluides observés par Merceron et *al.*, sont postérieures à la cristallisation du granite de Beauvoir. Ce sont notamment vers 400 °C, la néoformation de muscovite de manière diffuse dans le granite. Ces néoformations sont observées principalement au dessous de 450 m par Merceron et *al.*, mais existent également dans la partie supérieure du granite (Kosakevitch, 1976 ; Monier et *al.*, et Fontelles, ce volume). Ces altérations de type greisen sont remarquablement peu développées dans le sondage, alors qu'elles représentent à l'affleurement dans la carrière de Beauvoir une proportion importante du granite (10–15 %) d'après la cartographie réalisée par Carroué et Faure (1973). Cet épisode peut correspondre aux fluides de la gamme 420–350 °C (1 à 8 % équivalent poids NaCl) observés par Aïssa et

al., (ce volume) qui, après la phase magmatique-hydrothermale envahissent la totalité du système Beauvoir. Ces fluides seraient d'origine météorique d'après les données isotopiques de $\delta^{18}\text{O}$ sur ces micas (Fouillac *et al.*, ce volume). La distribution des isothermes à ce stade, établie à partir des températures d'homogénéisation des inclusions fluides suggère une alimentation du système à la base, avec une décroissance de la température autour du cœur du faciès B1 encore chaud (Aïssa *et al.*, ce volume). La datation K-Ar à 273 Ma de ces micas est toutefois incompatible avec un granite de Beauvoir encore chaud 30 Ma après sa mise en place. Cet âge correspondrait plutôt au passage global du système sous la température de piégeage de l'argon (de l'ordre de 300°). Il peut également représenter un âge intermédiaire par mélange de lépidolites héritées avec les micas néoformés, et donc sans signification géologique, ou un épisode thermique autonome.

Le circuit géothermique continue ensuite à se refroidir avec une succession de circulations fluides présentant des salinités très variables et des températures décroissant de 420 à 120 °C. Des ébullitions tardives de faible pression conduisent à la formation de saumures de basse température. Ces différentes générations de fluides n'ont toutefois pas encore été calées précisément par rapport aux six paragenèses d'altération hydrothermale qui suivent décrites par Merceron *et al.* (ce volume) et pour lesquelles des intervalles de température, basés sur des comparaisons géothermométriques empiriques, sont proposées :

— épisode (1), filonien à muscovite (400 à 350 °C), daté à 225–209 ± 5 Ma (Trias) par la méthode K-Ar,

— épisode (2) filonien à donbassite puis tosudite lithinifères et localement pyrophyllite de plus basse température (350 à 250 °C),

— épisode (3) diffus à interstratifié désordonné illite-smectite ± kaolinite ± illite ± fluorite à des températures inférieures à 100 °C ;

— épisode (4) diffus et filonien à kaolinite seule, surtout développé dans l'environnement de la grande zone de fracture entre –454 et –456 m et au toit de l'apex granitique ;

— épisode (5) filonien à environ 200 °C, à illite développé en dessous de 500 m, daté à 151 ± 4 Ma et 137 Ma (Jurassique supérieur) par la méthode K-Ar ;

— épisode (6) filonien, à interstratifié désordonné illite-smectite, observé dans l'ensemble du sondage dans des fractures subverticales tardives ; c'est le refroidissement final du système, en dessous de 100 °C.

Un gradient thermique élevé est encore observé actuellement (50,4 °C/Km à 886 m) et correspond à un flux beaucoup plus élevé (150 à 160 mW/m²) que toutes les valeurs obtenues dans le Massif central par Lucazeau et Vasseur 1983 (de l'ordre de 120 mW/m² dans cette zone). Ce flux élevé est probablement à relier à la remontée du manteau sous cette partie du Massif central, mais résulte aussi d'un phénomène de réfraction thermique produit par la présence de micaschistes à la base du granite de Beauvoir (Royer et Danis, ce volume). Malgré un gradient thermique élevé les circulations fluides actuelles dans le granite de Beauvoir sont pratiquement inexistantes. Une venue d'eau mineure a été identifiée par les diagrapies thermiques (Gable, 1985) à –736 m.

4.4. — Les phases minérales à solutions solides complexes

La géochimie des lépidolites (Monier *et al.*, Fontelles *et al.*, ce volume), des niobotantalates (Ohnenstetter et Piantone, Rossi *et al.*, ce volume) des cassitérites (Wang *et al.*, ce volume) des wolframites (Aïssa *et al.*) et des argiles (Merceron *et al.* a et b, ce volume) a fait l'objet d'études extrêmement détaillées (plusieurs milliers d'analyses ponctuelles à la microsonde).

Les micas et les niobotantalates se sont révélés être des marqueurs extrêmement fins de l'évolution magmatique et postmagmatique de ce type de granite, par la variété des substitutions possibles en réponse aux variations P, T, X du milieu. Si l'existence d'une lacune de miscibilité entre muscovite et biotite récemment mis en évidence par Monier (1987) et Monier et Robert (1986) est bien confirmée à Échassières (Monier *et al.*, et Fontelles, ce volume), l'existence d'autres lacunes dans la partie du système riche en-Li et F proposée par Fontelles, ce volume, ouvre une voie à de nouvelles études expérimentales dans ce domaine. Des compositions de micas encore non reportées dans la littérature internationale en particulier des termes proches du pôle pur de la trilithionite ont été identifiées.

Les vecteurs de substitutions mis en évidence dans les niobotantalates, les cassitérites (Wang *et al.*, ce volume, Piantone *et al.*, Document BRGM n° 124) et les wolframites (Aïssa *et al.*, ce volume) représentent une base analytique précieuse pour des études futures sur la caractérisation directe des sites impliqués dans ces substitutions par les méthodes de physique du solide.

4-5. — Genèse des concentrations métalliques

Parmi les nombreux types de minéralisations observés dans l'environnement du complexe d'Échassières, le sondage GPF a apporté de nouvelles contraintes sur la genèse de trois d'entre eux ; le gisement polymétallique (Sn, Li, Ta, Nb ± Be) disséminé dans le granite de Beauvoir, le stockwerk à ferberite de la Bosse et les minéralisations uranifères, ces deux derniers étant localisés dans les micaschistes.

5a. — Le gisement polymétallique disséminé de Beauvoir

Le résultat majeur pour cet aspect du projet est la caractérisation de l'origine essentiellement magmatique des minéralisations à cassitérite, microlite, columbotantalite, amblygonite et lépidolite disséminés dans toute la masse du granite de Beauvoir. Ce caractère magmatique est prouvé par des méthodes d'approche très différentes.

La puissance même du granite à lépidolite (~ 700 m) minéralisé dans sa masse n'est compatible qu'avec une origine magmatique comme cela a été montré ci-dessus.

Les minéraux porteurs des minéralisations sont disséminés de manière homogène dans toute la masse du granite de Beauvoir souvent en inclusion dans la plupart des minéraux majeurs qui présentent des textures de cristallisation typiquement magmatique (Rossi *et al.*, Fontelles ce volume). Aucune concentration minérale particulière n'est associée aux multiples épisodes d'altération mis en évidence par Merceron *et al.*, (a), ce volume.

Les variations de concentration des éléments métalliques sont corrélées avec les variations des autres éléments et en particulier des éléments majeurs et sont compatibles avec des mécanismes de fractionnement de type magmatique. Ainsi, la géochimie des isotopes stables (Fouillac *et al.*, ce volume) montre que l'équilibre isotopique entre les minéraux du granite de Beauvoir a été établi à des températures supérieures au solidus. Si une interaction avec phase fluide oxydante a pu conduire à la cristallisation dans le granite de la cassitérite (Cuney et Brouand, ce volume), ce phénomène s'est produit au stade magmatique. Le même phénomène est invoqué pour la cristallisation des niobotantalates (Fouillac *et al.*, ce volume), d'après la corrélation entre teneurs en tantale et $\delta^{18}\text{O}$ du quartz du granite. Cependant, l'absence de données expérimentales sur les conditions de stabilité des complexes du tantale à haute température rend cette interprétation très hypothétique.

Cette origine magmatique est également appuyée par les compositions équivalentes au granite de Beauvoir, quoiqu'un peu moins enrichies en éléments incompatibles pour les termes extrêmes, observées dans des verres volcaniques : les ongonites de Mongolie et les macusanites du Pérou.

5b. — Le stockwerk à ferberite de la Bosse

Le sondage a permis la mise en évidence d'une zonalité verticale remarquable sur plus de 200 m dans ce stockwerk éclaté en deux parties par le granite de Beauvoir. La croissance des teneurs en Nb, du caractère ferberitique et de l'intensité des altérations micacées aux épontes (Aïssa *et al.*, ce volume) indique la proximité d'un corps granitique en profondeur dans lequel s'enracine probablement cet ensemble minéralisé. Une paragenèse sulfurée (As, Cu, Bi, Mo, Zn) se développe surtout dans la partie la plus profonde du stockwerk mais apparaît plutôt comme télescopée (Aïssa *et al.*, Piantone et Burnol, ce volume).

Il est remarquable de constater que contrairement à de nombreux autres stockwerks, celui de la Bosse est exclusivement à tungstène. La cassitérite, lorsqu'elle apparaît, est toujours en relation avec la dissolution du quartz et la néoformation de topaze et micas lithinifères provoqués par la percolation des fluides du granite de Beauvoir.

L'étude des fluides minéralisateurs dans les filons de quartz minéralisés a confirmé leur caractère aquocarboazoté complexe (Aïssa *et al.*, ce volume) observé dans la plupart des minéralisations de ce type. Cependant, l'effet thermique du granite des Colettes a conduit à la décrépitation des inclusions de forte densité et a donc conduit à la destruction d'une partie de l'évolution thermobarométrique de ces fluides. Ce résultat permet, par contre, de confirmer la postériorité de la mise en place du granite des Colettes par rapport au stockwerk.

Le dépôt du tungstène s'est effectué lors d'un phénomène de mélange entre les fluides aquocarboazotés de haute température, transportant très probablement le métal, et des fluides aqueux de faible salinité et de plus basse température. Ce mécanisme est bien connu dans de nombreux gisements de tungstène. La source du métal demeure, à ce stade de l'étude spéculative : granite de la Bosse sous-jacent (?), endo-granite sous-jacent (?), micaschistes environnants (?).

Un résultat plus original est la mise en évidence de transformations profondes dans le stockwerk induites par les saumures issues du granite de Beauvoir et décrites plus haut.

Cependant, aucune reconcentration économiquement significative du tungstène n'est observée.

5c. — Les minéralisations uranifères (Cuney et Brouand, ce volume)

Des minéralisations uranifères ont été rencontrées dans les micaschistes du toit, directement au contact avec le granite de Beauvoir et au mur de ce granite. Leur puissance ne dépasse pas quelques centimètres, mais leur présence est significative d'une activité hydrothermale spécifique ayant mobilisé et concentré l'uranium et confirme l'intérêt de cette région pour la recherche de telles minéralisations.

Source : l'uraninite du granite de Beauvoir présente dans les faciès B2 et B3 du granite représente un stock d'uranium disponible. Les figures de corrosion observées sur certains cristaux sont une preuve de sa mobilisation. Les micaschistes enrichis en uranium lors de leur percolation par les fluides oxydants du granite B1 constituent également une source potentielle.

Dépôt : l'uranium a été déposé essentiellement sous forme de pechblende avec une paragenèse à sulfures, Bi, Ni, Co bien connue dans l'Erzgebirge mais observée pour la première fois dans le Massif central.

Des mobilités récentes de l'uranium (< 1 Ma.) ont été mises en évidence à plusieurs niveaux dans le sondage jusqu'à -890 m. Elles montrent la persistance de circulations fluides oxydantes subactuelles malgré la faiblesse des venues de fluides observées dans le forage.

4.6. — Propriétés pétrophysiques du bâti

Dès le lancement du programme GPF, l'acquisition de mesures de différentes propriétés physiques des roches et des bâtis de la croûte continentale, à l'occasion des forages, était fortement recommandée, surtout en domaine de socle où ces données sont encore très rares en France.

Le forage GPF d'Échassières a d'abord fait l'objet de diagnostics décrites par R. Straub (ce volume). La densité gamma et la porosité neutron ont été comparées à des mesures de porosité et densité sur les carottes (Vignerresse et Canat, Straub, ce volume). Il apparaît ainsi que l'accroissement simultané de la porosité neutron et de la densité, en dessous de la tranche décompressée superficielle, peut être mis en relation avec la très forte teneur en lépidolite du faciès B1 du granite de Beauvoir.

La forte valeur du gradient géothermique mesuré par R. Gable (1985) dans le granite, pose un problème sérieux de détermination du flux géothermique réel. Les mesures de conductivité thermique réalisées par Royer et Danis (ce volume) montrent la forte anisotropie de ce paramètre liée à la structure planaire des micaschistes et son incidence très importante sur les variations de gradient. Les valeurs de gradient (de l'ordre de 5 °C par 100 m) ne seraient pas dues à un flux très anormalement fort de 150 mW/m² sec, mais à un effet de réfraction thermique à condition que la « lame » épaisse du granite de Beauvoir soit inclinée de plus de 50°. Le flux local, compte tenu de la production de chaleur par les leucogranites alumineux de l'ensemble plutonique d'Échassières, peut ainsi être ramené à une valeur plus habituelle pour la zone à lithosphère amincie d'Auvergne, de l'ordre de 130 mW/m², sec.

La susceptibilité magnétique très faible de ces granites a pu être mesurée sur les carottes. Son log, présenté par Bouchez et *al.*, (ce volume, fig. 1) reflète fidèlement les teneurs en fer des lépidolites et comme elles, les limites des unités magmatiques. L'anisotropie de cette susceptibilité a pu être utilisée pour décrire la structure de déformation visqueuse du granite marquée par les micas (et l'albite) ; mais la faible susceptibilité intrinsèque de ce granite crée un certain bruit de fond dans la description de l'ellipsoïde de susceptibilité magnétique (Bouchez et *al.*, ce volume, fig. 2 et 4-5). La structuration ainsi décrite par ce paramètre physique est en gros comparable à celle qui résulte d'une analyse plus classique, « à l'oeil », complétée par des mesures de fabriques en lame mince orientée (Jacquot, ce volume), comme nous l'avons discutée en 4-1).

Le champ des contraintes mécaniques actuelles sur le site du forage a pu être déterminé par la méthode de fracturation hydraulique entre obturateurs. Cette série de mesures, réalisées conjointement avec le programme géothermie profonde généralisée de l'AFME, a permis de caractériser à plus de 400 m de profondeur le champ classique en France dans cette région (σ_1 horizontale en direction N 160°). Feuga (ce volume) présente et discute deux interprétations des mêmes mesures et met en évidence l'effet majeur du relief local dans les 400 m supérieurs du forage. On constate que les directions des fractures les plus représentées dans le forage, sont sollicitées en compression par ce champ de contraintes. C'est une raison très probable des circulations d'eau actuelles quasi nulles constatées sur les 900 m de ce forage.

5. — Conclusions et perspectives :

Dans quelle mesure les objectifs généraux sur le magmatisme peralumineux et la métallogénèse associée, ainsi que les objectifs plus spécifiques au granite de Beauvoir ont-ils été atteints ?

Du fait de la puissance exceptionnelle du granite de Beauvoir, puissance sans équivalent connu dans le monde, la première phase de sondage limitée à 900 m, n'a pratiquement permis d'étudier que ce granite et le stockwerk à tungstène qu'il dilate. Cependant, cette cible présentait un caractère exemplaire par l'intensité extrême des fractionnements de nombreux éléments incompatibles (Li, Rb, Cs, Ta, Nb ...) et de certains éléments compatibles (Th, Terres rares, Mg ...). Ce type très représentatif des termes les plus évolués des complexes leucogranitiques peralumineux a permis d'appréhender des mécanismes exprimés habituellement de manière beaucoup plus discrète et donc plus délicate à révéler.

Au stade actuel des études, les résultats les plus significatifs sont les suivants :

- 1) Toutes les caractéristiques inhabituelles de ce granite sont essentiellement acquises au stade magmatique : richesse en albite, en lépidolite, en topaze, caractère très peralumineux, absence de biotite, fractionnements extrêmes de beaucoup d'éléments ...
- 2) Ces caractéristiques trouvent leur explication pour l'essentiel dans la richesse en éléments volatils (F, Li ...) qui conduisent à un abaissement très important des liquidus et solidus, des viscosités des magmas, à une modification drastique de la composition des liquides silicatés à l'ap-

proche des eutectiques et à un changement de l'ordre de cristallisation des phases minérales.

- 3) De même, la minéralisation à Sn, Li, Nb, Ta, Be disséminée dans la masse du granite de Beauvoir présente un caractère magmatique dominant. Aucune concentration minérale significative n'a été observée avec des épisodes d'altération hydrothermaux bien caractérisés.
- 4) Le granite de Beauvoir ne représente pas une chambre magmatique avec une différenciation interne, mais le remplissage par des injections magmatiques successives d'une ouverture produite par un événement structural cassant. Les caractéristiques de chacune de ces venues sont acquises pour l'essentiel en profondeur. Ce modèle est très différent du modèle métasomatique ou du modèle de genèse par cristallisation fractionnée plus ou moins *in situ* d'un très vaste batholite classiquement donnés dans la littérature.
- 5) Des saumures aqueuses ont été identifiées comme dérivant de la sursaturation du granite de Beauvoir. La découverte de ces fluides magmatiques est un résultat rare sinon unique pour ce type de granitoïdes. La fracturation hydraulique et les altérations métasomatiques développées dans les micaschistes environnant résultent de l'augmentation de pression provoquée par l'apparition de ces fluides lors de la sursaturation du magma et leur ébullition subséquente, bien que classiquement décrite dans les gisements de type porphyre cuprifères trouve ici une illustration exemplaire.
- 6) L'étude de la cristallogénèse des phases minérales à solutions solides complexes a été riche de résultats. La famille des lépidolites, tout particulièrement, s'est révélée être un enregistreur extrêmement fidèle des étapes successives de la cristallisation de ce type de magma au cours de son ascension, puis sur son site de mise en place. Ces résultats démontrent tout l'intérêt d'une étude fine des micas dans ce type de magmatisme.
- 7) L'étude du granite de Beauvoir a montré que la richesse en étain d'un magma, nettement supérieure à celle des granites classiquement considérés, n'est pas une condition suffisante pour conduire à la genèse de minéralisations stannifères hydrothermales malgré l'évidence de circulations fluides très précoces et riches en complexant chloruré. Le faible fractionnement de l'étain dans ces fluides résulte des conditions relativement oxydantes dans le magma de Beauvoir lors de sa sursaturation en fluide.
- 8) La pétrologie des altérations hydrothermales a permis de mettre en évidence plusieurs épisodes hydrothermaux largement déconnectés s'échelonnant du Stéphanien au Jurassique, après la mise en place du granite. « La kaolinite, d'origine essentiellement hydrothermale, s'est formée en profondeur, mais surtout intensivement dans la partie la plus apicale du granite où elle est exploitée ».
- 9) La réflexion et les observations nouvelles sur l'environnement géologique de mise en place du complexe granitique d'Echassières ont précisé les conditions de l'écaillage crustal régional au Dévonien ; la rapidité de l'érosion antévisséenne et les conditions très superficielles de la mise en place du complexe d'Echassières sont corroborées par les résultats obtenus sur les inclusions fluides.

- 10) Ce sondage a permis d'acquiescer des mesures sur les propriétés physiques actuelles du bâti local : gradient géothermique particulièrement élevé et faibles circulations fluides. Ces deux caractéristiques s'expliquent d'une part par un phénomène de réfraction thermique entre les micaschistes et la lame de granite de Beauvoir intercalée et par la fermeture des fractures, en majorité orthogonales à la direction de la contrainte horizontale majeure mesurée.

Malgré la richesse et la diversité des résultats acquis lors de cette première phase du projet de nombreux problèmes restent à résoudre et devraient faire l'objet d'une nouvelle phase d'investigation par des compléments d'étude sur les matériaux disponibles, ainsi que par une nouvelle phase d'exploration par sondage sur d'autres termes du complexe d'Échassières.

- A) Les contraintes en chronologie isotopique sur l'ensemble du complexe d'Échassières mériteraient d'être développées. La méthode U-Pb sur la très grande variété de minéraux porteurs de radioéléments déjà entreprise au laboratoire de géochimie isotopique de Montpellier devrait permettre de répondre au moins en partie à ces problèmes.
- B) Le co-génétisme ou le non-co-génétisme entre les différentes unités du granite de Beauvoir et entre celles-ci et les autres termes du complexe d'Échassières (microgranite, granite des Colettes, granite de la Bosse (?)) devra être contraint dans un premier temps par le développement de l'application des méthodes de la géochimie isotopique sur les matériaux déjà recueillis et sur des problèmes maintenant bien posés et dans un deuxième temps par l'accès par forage à de nouveaux termes du complexe. En particulier, la géochimie du strontium montre le caractère extrêmement erratique de sa répartition, il conviendrait donc de préciser les conditions de migration de cet élément (échange avec les micaschistes encaissants (?)) et les incidences sur la signification des signatures isotopiques complexes obtenus sur les granites des Colettes et de Beauvoir.

La géochimie isotopique du Pb et du Nd peuvent contribuer à préciser la ou les sources différentes de ces granites. Enfin, un complément sur les compositions isotopiques de l'oxygène sur les différentes unités du granite de Beauvoir devrait permettre de départager les hypothèses actuellement présentées.

- C) Les études actuelles ont permis de préciser l'existence de nombreuses unités magmatiques au sein de Beauvoir. Ces unités sont définies actuellement de manière encore assez grossière. La signification des gradients de concentrations internes aux unités ainsi que des ruptures d'évolution aux interfaces demande à être précisée et interprétée par une nouvelle phase d'échantillonnage pétrographique et géochimique plus fine.
- D) Dans la géochimie comparée des différents éléments montrant des évolutions contrastées, peut-on arriver à quantifier la part relevant des fractionnements au stade magmatique par rapport à celle résultant de transferts volatils intramagmatiques ou hydrothermaux sub-solidus ? Ainsi alors que le rubidium a un comportement remarquablement régulier, indifférent ainsi au découpage en unités, de nombreux autres éléments montrent

une relation nette avec ce découpage en unité, ou encore montrent des comportements erratiques (Sr, P, Cs) dont on soupçonne seulement leur relation avec des stades hydrothermaux précoces.

- E) La géochimie des altérations hydrothermales, qui n'a encore été qu'esquissée, serait une voie d'approche complémentaire aux problèmes posés ci-dessus. De même, la relation précise entre les circulations fluides tardives et les types d'altérations hydrothermales permettrait de préciser l'évolution thermique polyphasée post Beauvoir.
- F) Un approfondissement du forage permettrait également de suivre l'évolution en profondeur du stockwerk à ferberite et d'accéder à un magmatisme plus précoce que ceux qui sont accessibles à l'affleurement et probablement en relation directe avec le gisement de ferberite.
- G) La forme à trois dimensions du granite de Beauvoir et de ses zonalités pourrait être mieux contrainte à partir de l'exploitation des données géochimiques existantes et à compléter sur les nombreux sondages miniers répartis sur toute la surface du granite de Beauvoir, à la lumière des distinctions d'unités et des critères de leur identification obtenus grâce au sondage GPF. On pourrait ainsi accéder à la reconstitution d'un modèle d'organisation d'un certain nombre d'éléments compatibles avec le découpage en unités magmatiques et les contrôles structuraux mis en évidence dans le forage et observer pour d'autres éléments, notamment les incompatibles, une organisation éventuellement discordante, sans rapport avec les fractionnements magmatiques mais contrôlée par des phénomènes de diffusion intramagmatique in situ, ou de transferts syn à tardimagmatique par des fluides.

En fin de compte, on peut constater que le carottage continu à travers ce corps granitique exceptionnel, confronte les chercheurs à des phénomènes pétrologiques qu'ils étaient mal préparés à étudier avec la finesse, la richesse, la variété de cas et d'hypothèses sur les processus que la continuité d'observation permet ici d'appréhender ; maintenant que le modèle et certains de ses attributs concrets sont bien révélés par cette première phase d'étude, nous espérons que de nouvelles équipes de chercheurs viendront s'intéresser à un objet géologique aussi bien documenté.

Remerciements : Les auteurs ont vivement apprécié les remarques constructives de Mme M.J. Lienhardt et de MM. M. Cathelineau et P. Barbey.

Références bibliographiques

- AUBERT G. (1969). — Les coupoles granitiques de Montebres et d'Échassières (Massif central français) et la genèse de leurs minéralisations en étain, lithium, tungstène et béryllium. *Mémoire BRGM* n° 46, 345 p.
- BEUS A.A., SEVERON V.A., SITNIN A.A., SUBBOTIN R.D. (1962). — Albitized and greisenized granites (apogranites). *Acad. Sci. Press, Moscou*, 196 p. (en russe).

- BURNOL L. (1974). — Géochimie du béryllium et types de concentration dans les leucogranites du Massif central français. Mémoire BRGM n° 85, 168 p.
- BURNOL L., VIALLEFOND L. (1984). — Géochimie complémentaire en sol à Échassières. Résultats préliminaires. Programme G.P.F. Documents BRGM, 81-8, pp. 57-86.
- CUNEY M., AUTRAN A., BURNOL L. (1985). — Premiers résultats apportés par le sondage G.P.F. de 900 m, réalisé sur le granite de Beauvoir, sodolithique et fluoré à minéralisation disséminée (complexe granitique d'Échassières, Massif central, France). *Chron. Recherche minière*, n° 481, pp. 59-63.
- CUNEY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND N., DUDOIGNON Ph., FEYBESSE J.L., GAGNY C., JACQUOT T., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G., TEGYEV M. (1986). — Résultats préliminaires apportés par le sondage G.P.F. sur la coupole de granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir (Massif Central, France). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **303**, II, 7, pp. 569-574.
- DENIEL C., VIDAL P., FERNANDEZ A., LE FORT P., PEUCAT J.J. (1987). — Isotopic study of the Manaslu granite (Himalaya, Népal) : inferences on the age and source of Himalayan leucogranites. *Contrib. Mineral. Petrol.* **96**, n° 1, pp. 78-92.
- DERRÉ C. (1982). — Caractéristiques de la distribution des gisements à étain et tungstène dans l'Ouest de l'Europe. *Mineral. Dep.*, **17**, pp. 55-77.
- 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. *Am. Mineral.*, **70**, pp. 89-97.
- EZANNO P., POINCLOU C. (1984). — Campagne complémentaire de sondages électriques sur la coupole granitique d'Échassières (Allier). Rapport BRGM 84 SGN 261 GPH, 13 p + annexes.
- FAVIN H., MILLON R. (1984). — Campagne de sondages électriques sur la coupole d'Échassières (Allier). Document du BRGM n° 81-8, pp. 41-56.
- FEYBESSE J.L. (1985). — Étude structurale du massif d'Échassières et de son encaissant métamorphique. Document du BRGM n° 95-8 pp. 55-72.
- FRIEDRICH M., CUNEY M. (1987). — Petrogenesis of variscan peraluminous granitoids : the St-Sylvestre example, N-W. Massif central, France, *Terra Cognita*, 7, 2-3, 359.
- GABLE R. (1974). — Un exemple d'application de la méthode gravimétrique à l'étude structurale d'une coupole granitique : la coupole d'Échassières. Rapport BRGM 74, DSGN 406 BSS, 40 p. + annexes.
- GABLE R. (1985). — Étude thermique préliminaire du forage GPF. Ech. 1 — Documents BRGM n° 100, pp. 280-292.
- GAGNY Cl., JACQUOT T. (1985). — Présentation de quelques problèmes mis en évidence par la pétrologie structurale. Forage profond Échassières n° 1 sur le granite de Beauvoir (Échassières, Allier). Documents BRGM n° 100, pp. 139-163.
- GAGNY Cl., COURRIOUX G., GUENIN O., JACQUOT T., LEISTEL J.M. (1984). — Contrôle structural de la métallogénèse dans la région d'Échassières par une zone de cisaillement orientée à N 60 E (Massif Central français). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **298**, II, pp. 459-462.
- GROLIER J. (1971). — Contribution à l'étude géologique des séries cristallophylliennes inverses du Massif central français : la série de la Sioule. Mémoire BRGM, 64, 163 p.
- GROLIER J., HERZ N., DUTHOU J.L., MERGOIL J., MONIER G., RISS J., DE LA ROCHE H., ROQUES M., SOSSA M., STUSSI J.M., TURLAND M., VACHETTE M. (1984). — Idées actuelles sur la géologie, la géochimie et la géochronologie du complexe granitique de Montmarault (Allier). Document du BRGM n° 81-2, pp. 65-105.
- GROVES D.T., Mc CARTHY J.S. (1978). — Fractional crystallization and the origin of tin deposits in granitoids. *Mineral. Deposita* **13**, pp. 11-26.
- KOSAKEVITCH A. (1976). — Evolution de la minéralisation en Li, Ta et Nb dans la coupole granitique de Beauvoir (massif d'Échassières, Allier). Rapport interne BRGM, 76 SGN 316 MGA, 82 p.
- KOVALENKO V.I., KOVALENKO N.I. (1984). — Problems of the origin, ore bearing and evolution of rare metal granitoids. *Physics of the Earth and Planetary interior*, **35**, pp. 51-62.
- LE FORT P., CUNEY M., DENIEL C., FRANCE LANORD C., SHEPARD J.M.F., UPRETI B.N., VIDAL P. (1987). — Crustal generation of the Himalayan leucogranites. *Tectonophysics*, **134**, pp. 39-57.
- LEHMAN B. (1982). — Metallogeny of tin : magmatic differentiation versus geochemical heritage. *Econ. Geol.*, **77**, pp. 50-59.
- LE ROUGE G., QUENARDEL J.M. (1985). — Chronologie des événements tectoniques dans le N-W du Massif central français du Carbonifère inférieur au plioquaternaire. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **301** (II), n° 9, pp. 621-626.
- LE ROUGE G., ROLIN P. (1987). — Tectogenèse comparée de deux segments de la chaîne hercynienne : le Massif central français septentrional et le sud du massif armoricain. *Thèse doctorat d'État - Univ. Orsay Paris-Sud*.
- LUCAZEAU F., VASSEUR G. (1983). — Production de chaleur et régime thermique de la croûte du Massif central français. *Ann. Geophys.* **37**, pp. 493-513.
- MONIER G. (1987). — Cristallochimie des micas des leucogranites. Nouvelles données expérimentales et applications pétrologiques, *Géol. Géochim. Uranium*, Mém. Nancy, n° 14, 347 p.
- MONIER G., ROBERT J.L. (1986). — Evolution of the miscibility gap between muscovite and biotite solid solutions with increasing lithium content : an experimental study in the system $\text{K}_2\text{O}, \text{Li}_2\text{O}, \text{MgO}, \text{FeO}, \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$, HF at 600°C, 2 Kbar pH_2O : comparison with natural lithium micas. *Min. Mag.* **50**, pp. 641-650.
- MOREAU M., PUGHON A., PUIBARAUD Y., SANSELMÉ H. (1986). — L'uranium et les granites. *Chronique Recherche Minière*, n° 450, pp. 47-50.
- PERRIN J., RAVATIN F. (1985). — Un profil de sondages magnéto-telluriques sur le granite d'Échassières. Document du BRGM n° 95, pp. 93-123.
- PICHAVANT M., VALENCIA HERRERA J., BOULMIER S., BRICQUEU L., JORON J.L., JUTEAU M., MARIN L., MICHARD A., SHEPARD S.M.F., TREUIL M., VERNET M. (1987). — The Macusani glaces, S-E Peru : evidence of chemical fractionation in peraluminous magmas. In : B.O Mysen ed. « Magmatic Processes : Physicochemical Principles », the Geochemical Society Special Publication n° 1, 359-373.
- PIN C., VIELZEUF D. (1983). — Granulites and related rocks in Variscan median Europe : a dualistic interpretation. *Tectonophysics* **93**, 47-74.
- PLANT J., BROWN G.C., SIMPSON P.R., SMITH R.T. (1980). — Signatures of metalliferous granites in the Scottish Caledonides. *Trans. Inst. Mining. Metall.*, **89**, B 198 - B 210.
- RAIMBAULT L. (1985). — Étude préliminaire des terres rares dans le granite de Beauvoir, Programme G.P.F., Documents BRGM, 100, pp. 125-129.
- RAIMBAULT L., OUIN M.C. (1984). — Géochimie du massif granitique d'Échassières (Allier). Documents BRGM 81-8, pp. 109-119.
- TISCHENDORF G. (1987). — Geochemical and petrographic characteristics of silicic magmatic rocks associated with rare element mineralization. In « Metallization Associated with Acid Magmatism » (Stemprok, M. et Burnett, L. edit.), 2, 41 - 96 - Service Géologique de Tchécoslovaquie, Prague.

VENNAT G. (1985). — Le complexe volcano-plutonique viséen supérieur de Gannat - Les Ancizes (Allier, Puy-de-Dôme). Étude pétrographique structurale, géochimique et dynamique. *Géologie de la France* n° 4, pp. 341-364.

VIALLEFOND L. (1985). — Application de la classification hiérarchique ascendante au traitement des résultats de géochimie sol à l'aplomb de l'apex granitique d'Échassières - Beauvoir. Programme G.P.F., Documents BRGM 95-8, pp. 125-139.

VIGNERESSE J.L., MENICHETTI V., CANNAT M. (1985). — Couverture géophysique du massif granitique d'Échassières. Programme G.P.F., Documents BRGM 95-8, p. 81-92.

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.