

Le batholite composite du Veynazès (Cantal, France) : pétrographie, géologie et géochimie. Relations avec le gisement tungstifère de Leucamp.

par MICHEL DEMANGE*;***, VINCENT A. NICOLAS*, PIERRE SOLER**;*** et HÉLÈNE GIOUSE*

Mots-clés. — Granite, Hercynien, Géochimie, Métallogénie, Tungstène, Massif central.

Résumé. — Le batholite du Veynazès est un granite tardi-hercynien intrusif dans la série épimétamorphique de la Chataigneraie. Dans sa partie NE, au voisinage du gisement tungstifère de Leucamp, ce granite apparaît comme un massif complexe résultant de la mise en place successive de différentes venues : le « granite noir » apparaît en petits corps en forme de cloche montrant fréquemment des bordures figées; il présente un caractère peralumineux (grenat déstabilisé en biotite — corindon — sillimanite) suggérant une contamination crustale à un niveau profond. Cette première venue est disloquée par le « granite principal », granite porphyroïde banal formant l'essentiel du massif qui s'enracine vers le SE et semble s'ennoyer sous forme d'une lame sous les schistes vers le nord. Enfin le « granite ocre », microgrenu porphyrique, se dispose en filons contournés plus ou moins concentriques, ce qui suggère l'existence d'un apex granitique caché.

Les données géochimiques sont compatibles avec l'hypothèse d'un comagmatisme de ces différentes venues. Leur discussion détaillée permet de montrer que l'ensemble granitique a évolué à deux niveaux : (1) différenciation en profondeur liant les différents termes; (2) évolution au niveau de la mise en place (cristallisation fractionnée et accumulation puis altérations hydrothermales).

Les éléments métalliques économiques se concentrent lors de ces différents stades; les données géochimiques actuellement disponibles ne suffisent pas pour définir sans ambiguïté à quel stade les fluides minéralisateurs se séparent. L'hypothèse la plus vraisemblable est que ce phénomène ait eu lieu à un degré très avancé de l'évolution du « granite ocre ».

The Veynazès batholith (Cantal, France) : petrography, geology, and geochemistry. Its relations with the Leucamp tungsten ore deposit.

Key words. — Granite, Hercynian, Geochemistry, Metallogenes, Tungsten, French Massif central.

Abstract. — The Veynazès granite is a late Variscan batholith that intrudes the epimetamorphic rocks of the Chataigneraie series. In the NE part of the batholith, near the Leucamp tungsten ore deposit, the batholith is characterized by a complex series of plutons: the « black granite » appears as small bell-shaped bodies, frequently exhibiting chilled margins; its peraluminous character (garnet destabilized in biotite — corundum — sillimanite) suggests a crustal contamination at a deep level. This first unit is disrupted by the « main granite », a common porphyritic granite which constitutes the greater part of the massif and seems to be buried as a strip beneath the schists to the North. Finally, the « ochre granite », a porphyritic, microgranular granite, appears as twisted, more or less concentric veins; the existence of a hidden granitic apex is suggested.

Geochemical data are consistent with the hypothesis of consanguineous magmatism for these different units. The detailed discussion of these data indicates that the granitic suite has evolved at two levels: (1) at depth by a differentiation process binding the different units; (2) at the emplacement level by fractional crystallization and crystal accumulation, with later hydrothermal alterations (greisenization and sericitization).

The economic metallic elements are concentrated during these different stages; the available geochemical data are not sufficient to define unambiguously the formation stage of the mineralizing fluids. The most likely hypothesis is that this phenomenon took place during the last evolution of the « ochre granite ».

Le granite du Veynazès est un batholite carbonifère (isochrone Rb/Sr à 320 ± 25 Ma — Duthou *et al.* [1986]) intrusif dans la série épimétamorphique de la Chataigneraie (Cantal et Aveyron, France). Ce granite appartient à une famille d'intrusions tardi-tectoniques qui apparaissent en relation spatiale avec les gisements du tungstène du district de la Chataigneraie [Weppe, 1951; Chèze, 1975; Joubert, 1978; Boesse, 1980] dont le plus important est le gisement de Leucamp [Nicolas, 1985; Bogdanoff *et al.*, 1987; Demange *et al.*, 1988].

L'étude du granite du Veynazès, au voisinage immédiat

du gisement de Leucamp, a été menée avec le souci de rechercher de possibles liaisons entre l'évolution de ce granite et les minéralisations. Seule la partie nord-est du massif a été cartographiée [Giouse, 1984; Nicolas, 1985] (fig. 1); le reste du granite n'a fait l'objet que de quelques itinéraires de reconnaissance.

I. — PÉTROLOGIE ET MODE DE MISE EN PLACE.

Le massif du Veynazès est un batholite complexe formé d'intrusions successives : — le « granite noir » précoce; — le « granite principal » qui constitue l'essentiel du massif; — le « granite ocre » tardif; — le « granite sud-ouest » distingué du granite principal sur des bases géochimiques mais dont nous ignorons les relations chronologiques avec les autres intrusions.

L'ensemble est recoupé tardivement par des filons variés : aplites, microgranites, microgranodiorites et micro-

* CGGM, Ecole des Mines, 60 boulevard Saint-Michel, 75006 Paris.

** ORSTOM, 213 rue Layette, 75010 Paris.

*** UA 384 CNRS « Pétrologie et Métallogénie ».

Note déposée le 6 Avril 1987, présentée à la séance du 18 mai 1987; manuscrit définitif accepté le 25 janvier 1988.

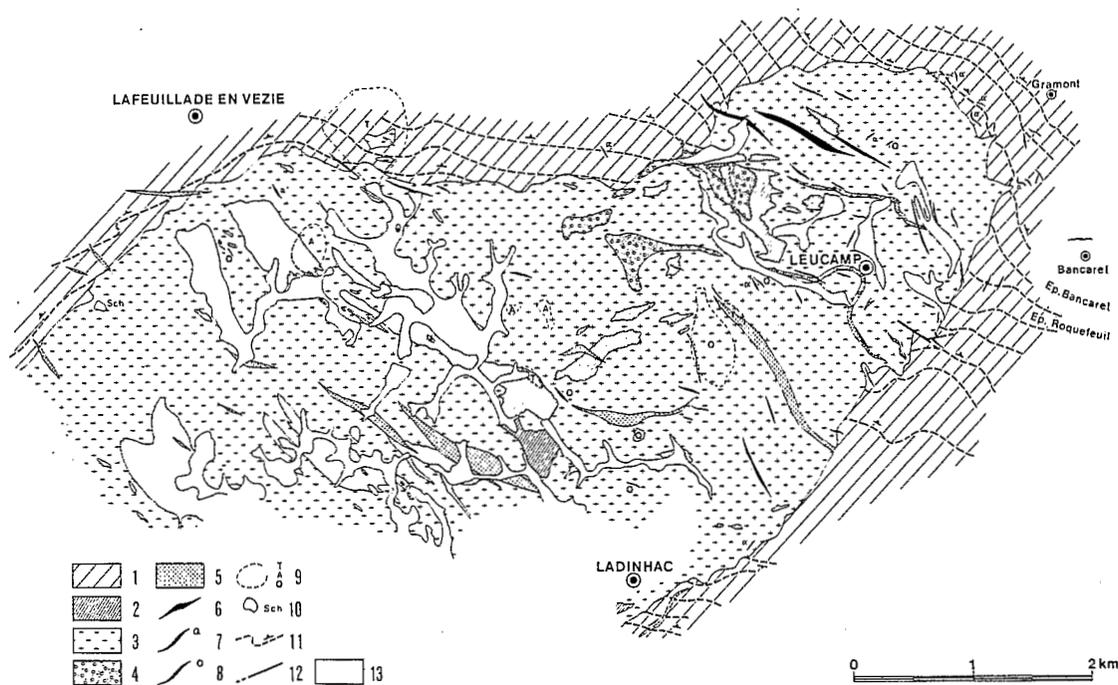


FIG. 1. — Carte géologique de la partie NE du batholite du Veynazès.

1 : encaissant (schistes X); 2 : granite noir *s.l.*; 3 : granite principal; 4 : granite ocre; 5 : microgranitoïdes; 6 : microdiorite; 7 : aplitite; 8 : filon de quartz; 9 : zones particulières (T = tourmalinisées; A = riches en aplites; Q = riches en quartz); 10 : roof-pendant de schistes; 11 : orientation de S3; 12 : faille; 13 : alluvions récentes.

FIG. 1. — Geological map of the northeastern part of the Veynazes batholith 1 : encaissant (schistes X); 2 : black granite *s.l.*; 3 : main granite 4 : ochre granite; 5 : microgranitoids; 6 : microdiorite; 7 : aplitite; 8 : quartz vein; 9 : particular zones (T = tourmalinized; A = rich in aplites; Q = rich in quartz); 10 : roof-pendant of schists; 11 : S3 orientation; 12 : fault; 13 : Quaternary.

diorites. Ces trois dernières venues sont d'ailleurs postérieures à la minéralisation.

1) Le granite noir.

Le faciès typique du « granite noir » est une roche microgrenue porphyrique sombre (granite noir *s.s.*), très dure, à cassure esquilleuse et à débit en dalles. Les phénocristaux sont : biotite, plagioclase, quartz en moins grande abondance et, rarement, orthose. Le plagioclase est une andésine (An 33 en moyenne) présentant une zonation complexe récurrente (An65 à An10); les macles sont également complexes, les syneusis fréquentes et l'on peut observer des cristaux précoces brisés chemisés d'un cortex plus tardif. La biotite se présente également en amas polycristallins dérivant sans doute d'un minéral antérieur, peut-être d'amphibole. La matrice est formée de microlites de plagioclase (An25 en moyenne avec des cœurs atteignant An60) et biotite englobés dans de grands phénocristaux poecilites et xénomorphes de feldspath potassique et/ou une association, parfois graphique, de quartz et d'orthose. Les minéraux accessoires sont l'ilménite (manganésifère, parfois à inclusions de rutile), le zircon, l'apatite et parfois une tourmaline tardive.

Ces faciès microgrenus représentent sans doute la bordure figée (plus ou moins recristallisée) d'intrusions dont le cœur était formé de faciès grenus assez grossiers (« granite poivre et sel ») auxquels ils passent d'ailleurs progressivement.

Le granite noir *s.l.* (« granite poivre et sel » et « granite noir » *s.s.*) se caractérise par la présence de minéraux alumineux :

— cordiérite (très peu variable dans les différents faciès — $Fe/Fe + Mg = 0,45$);

— association complexe de biotite + quartz en symplectite, sillimanite, corindon et hercynite ($Fe_{0,9}Mg_{0,1}Al_2O_4$) qui dérivent de la déstabilisation d'un minéral alumineux non identifié;

— grenat en voie de déstabilisation en biotite + quartz. Ces grenats sont assez variables d'échantillon à échantillon et dans un même échantillon. Ce sont des grenats purement alumineux. Les cœurs ont des compositions ($Fe/Fe + Mg = 0,87 \pm 0,02\%$; $CaO = 2,43 \pm 0,8\%$, $MnO = 1,26 \pm 0,43\%$) analogues à celles des grenats de paragneiss catazonaux [Deer *et al.*, 1982], assez semblables par exemple aux grenats de kinzigites du massif de l'Agout [Demange, 1982]. Ils montrent une évolution — sans doute liée au rééquilibrage au sein du granite — vers un terme plus riche en constituant almandin ($Fe/Fe + Mg = 0,95\% - 0,96\%$), pauvre en manganèse ($0,34 \pm 0,17\%$) mais plus calciques ($CaO = 3,12 \pm 0,98\%$). La biotite qui en dérive est également caractéristique de paragneiss; elle se distingue sans ambiguïté (par ses teneurs en Al, Ti et son rapport Fe/Mg) des biotites magmatiques du granite (fig. 2). L'application des thermomètres au couple grenat-biotite qui en dérive [Ferry et Spear, 1978; Thompson, 1976] donne des températures de l'ordre de 680-740 °C (avec deux données

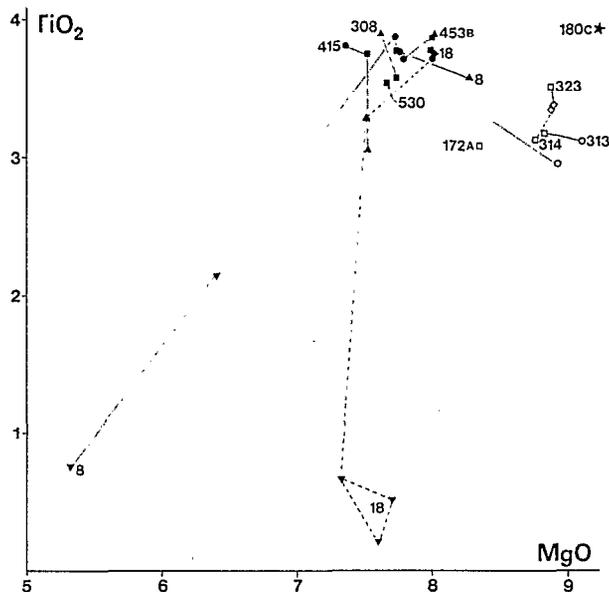


FIG. 2. — Composition (MgO/TiO_2) des biotites du batholithe du Veynazès.

Figurés pleins : granite noir (triangles pointe en haut = associée au grenat; triangle pointe en bas = symplectite quartz-biotite; carrés = phénocrystal; ronds = microlite). — Figurés vides : granite principal et sud-ouest (carré pointe en haut = agrégat polycristallin; carré = phénocrystal; ronds = microlite). — Etoiles : granite ocre. — Les traits joignent les minéraux analysés dans le même échantillon.

FIG. 2. — Composition (MgO/TiO_2) of biotites from Veynazès batholith.

Black symbols : black granite (triangles pointed up = association with garnet; triangle pointed down = symplectite quartz-biotite; square = phenocrystal; circles = microlite). — Open symbols : south west and main granites (square pointed up = polycrystallin aggregate; square = phenocrystal; circles = microlite). — stars : ochre granite. — The lines join the minerals analyzed from the same sample.

extrêmes à 600 et 850 °C), incompatibles avec le degré de métamorphisme de l'encaissant immédiat.

Ces observations, ainsi que la présence d'enclaves surmicacées (à biotite + sillimanite) montrent que le granite noir soit a subi une contamination crustale à un niveau plus profond que son niveau de mise en place, soit englobe des restes de fusion crustale.

Le granite noir est clairement la venue la plus ancienne du granite du Veynazès comme le montre, à l'échelle de l'affleurement, l'observation d'essaims d'enclaves décimétriques à métriques de granite noir dans le granite principal, ou des veines des autres faciès recoupant le granite noir. A l'échelle de la carte, la répartition actuelle du granite noir résulte de la désintégration par le granite principal de corps sans doute plus continus; il est possible de reconstituer la géométrie originelle du granite noir en s'appuyant sur la disposition des affleurements et, au sein de ceux-ci, sur les positions relatives des faciès granite noir s.s. qui représentent des bordures figées et « poivre et sel » plus grenu. Ces corps de granite noir s.l., dont la taille va du décimètre à des corps plurikilométriques, montrent fréquemment une disposition en échelon. Ils s'organisent en deux arcs où l'on distingue des panneaux subverticaux de direction N130 reliés par des lames subhorizontales dont on peut même parfois cartographier le mur (fig. 3). Ce mode de gisement, ainsi que les observations pétrographiques, suggèrent que

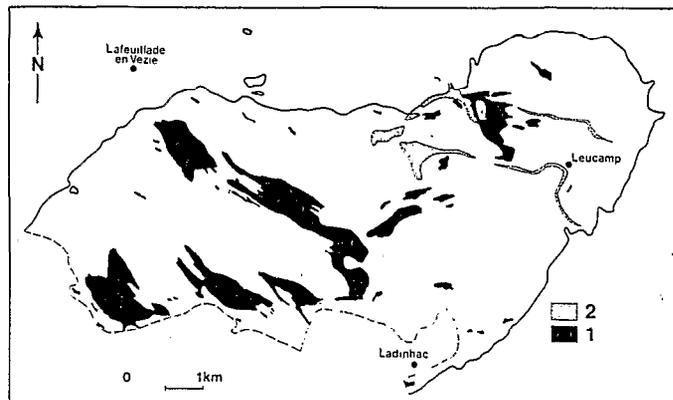


FIG. 3. — Gisement du granite noir et du granite ocre. 1 : granite noir; 2 : granite ocre.

FIG. 3. — Setting of the « black granite » and « the ochre granite ». 1 : black granite; 2 : ochre granite.

le granite noir s'est mis en place en petits stocks à refroidissement rapide, rappelant les granites subvolcaniques; la disposition en arcs suggère une mise en place par « *cauldron subsidence* » peut être contrôlée par les structures de la phase tardive P4, en plis droits ou en kinks de direction N130 [Demange et Nicolas, 1983; Demange *et al.*, 1988] (fig. 4).

2) Le granite principal.

L'essentiel du granite du Veynazès est formé d'un granite porphyroïde à biotite, à grain moyen, macroscopiquement très homogène à l'échelle de toute la partie nord-est du massif.

Le caractère porphyroïde de la roche est peu accusé : la taille moyenne des phénocristaux est de l'ordre de 2 cm pour une granulométrie du fond d'environ 0,5 cm. Les rayons X montrent qu'il s'agit d'orthose. Il n'apparaît pas possible de définir des zones plus ou moins riches en phénocristaux, ni d'observer d'orientation privilégiée de ceux-ci permettant de définir une structure interne du massif.

En dehors de ces phénocristaux la roche est constituée de plagioclase (An28 en moyenne, zonés de An 45 à An 5, parfois chemisés d'albite), de feldspath potassique, de quartz, de biotite et de minéraux accessoires (cordiérite pinitisée, apatite, zircon libre, sphène, ilménite) qui s'associent en une texture grenue xénomorphe parfois à tendance monzonitique. La composition chimique des biotites distingue aisément les différents types de granite (noir, principal, ocre) (fig. 2). Toutefois, à l'intérieur d'un même granite, les biotites ne présentent pas de variation significative qui puisse suggérer une quelconque évolution.

La cartographie, l'étude du métamorphisme de contact et les données géophysiques (travaux du BRGM in Joubert [1978]) permettent de préciser la forme du massif : le granite forme un laccolithe elliptique de direction NE-SW long d'une vingtaine de kilomètres et large au plus de cinq, qui s'enracine au sud-ouest de Ladinhac. Son contact sud-est apparaît très raide alors que dans les autres directions et en particulier dans la région de Leucamp, le granite semble

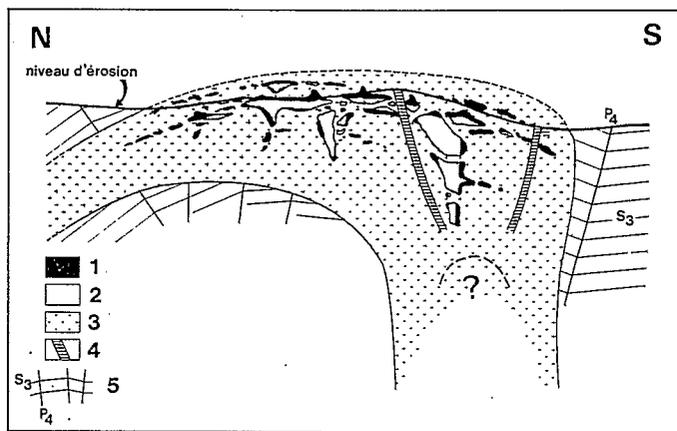


FIG. 4. — Schéma de mise en place de la partie NE du batholite du Veynazès.

1 : granite noir s.s.; 2 : granite « poivre et sel »; 3 : granite principal; 4 : granite ocre; 5 : schistosité S3 et plans axiaux des plis et kinks P4.

FIG. 4. — Scheme of the emplacement of the northeastern part of the Veynazès batholith.

1 : black granite s.s.; 2 : « salt and pepper » granite (1 and 2 constitute the black granite s.l.); 3 : main granite; 4 : ochre granite; 5 : S3 foliation and axial plans of the P4 folds and kinks.

former une lame qui s'ennoie doucement sous son encaissant.

3) Le granite sud-ouest.

La partie sud-ouest du massif est constituée d'un granite porphyroïde très analogue au granite principal mais dont le feldspath potassique est du microcline au lieu d'orthose. Toutefois les données géochimiques (infra) suggèrent qu'il s'agit d'une intrusion différente que les données cartographiques actuellement disponibles ne permettent pas de situer chronologiquement.

4) Le granite ocre.

Le « granite ocre » est une roche à structure microgrenue porphyrique souvent granophyrique, à grain fin; gris-vert à l'état frais, ce granite prend par altération une teinte ocre caractéristique.

Les phénocristaux sont par ordre d'importance : plagioclase (An 10 à 0), biotite, quartz globuleux et orthose. Des microlites de plagioclase (An 7) et de biotite représentent un second stade de cristallisation. La matrice est formée de quartz et de feldspath potassique formant fréquemment des associations graphiques développées en micropegmatites centrées sur les phénocristaux. Les accessoires sont zircon, apatite, pyrite, ilménite, cordiérite et tourmaline tardive. Ces roches sont généralement très altérées (chlorite, pinite, muscovite et calcite secondaires).

Le granite ocre renferme des enclaves centimétriques : enclaves surmicacées isolées et enclaves « mouchetées » en essais. Ces roches, très altérées, sont constituées de lattes de plagioclase et de chlorite imbriquées suivant une structure doléritique et cimentées par du quartz, du feldspath potassique et de la muscovite. On y observe des phénocristaux de quartz, de plagioclase (An 30) et d'agrégats de

chlorite remplaçant un minéral ferromagnésien non identifié.

Le granite ocre forme au nord-est du massif des filons contournés et des amas dont la disposition (fig. 3) rappelle un dispositif en « cone sheet » centré précisément dans la région où les données de la géophysique placent l'enracinement du massif : il est possible que le granite ocre représente le chevelu filonien d'un apex caché (fig. 4).

5) Les aplites.

Les aplites sont relativement peu abondantes à la périphérie du granite du Veynazès, elles sont d'ailleurs plus rares dans l'encaissant que dans le granite lui-même. Elles se regroupent en champs de filons inframétriques dont les directions sont identiques à celles des autres venues tardives.

Ce sont des roches de couleur claire à grain fin, à structure microgrenue xénomorphe composées de quartz, feldspath potassique (orthose en général, microcline dans la partie sud-ouest du massif), plagioclase (An 20 à 10), biotite, zircon, tourmaline et muscovite secondaire. La présence de cordiérite et une plus grande richesse en biotite (qui forme parfois des symplectites avec le quartz) permet d'individualiser un groupe particulier, que l'on est tenté de rapprocher du granite noir.

6) Les roches éruptives filoniennes tardives.

Le granite et son encaissant sont recoupés par de nombreux dykes tardifs de microgranitoïdes et de microdiorites, d'extension longitudinale décamétrique à plurikilométrique.

Les microgranitoïdes sont des roches porphyriques que les phénocristaux permettent de classer en trois types :

- des microgranodiorites à phénocristaux de biotite et de plagioclase (An 30 à 50);
- des microgranites à phénocristaux de quartz et de plagioclase (An 10 à 40);
- des microgranites à phénocristaux de quartz et feldspath potassique.

La matrice est felsitique principalement dans les types 1 et 3. Cette matrice recristallise en sphérolithes d'abord isolés puis coalescents et enfin en un fond microgrenu. Dans le type 2, elle est plus souvent granophyrique.

Les microdiorites sont des roches sombres compactes à grain fin, à texture doléritique, formées de plagioclase et de minéraux ferromagnésiens (pyroxène plus ou moins ouralitisé, hornblende brune, biotite) qui permettent de les classer en plusieurs types. Ces roches montrent un peu de quartz interstitiel, d'apatite et des minéraux opaques. Elles sont très largement altérées (séricite, chlorite, carbonates et leucoxène).

Dans le granite, ces différents filons apparaissent comme le remplissage de joints de tension en échelon formant deux familles conjuguées (N060-080 et N000-015), suggérant une compression de direction N150.

Hors du granite, ces dykes apparaissent, comme les filons minéralisés de Leucamp [Demange *et al.*, 1988], contrôlés par les discontinuités créées par la tectonique souple : plans axiaux peu pentés vers le nord des plis en genoux P3, fractures subverticales en plan axial des plis droits ou en kink de direction N130 (P4) et méridienne (P5) [Demange et Nicolas, 1983; Demange *et al.*, 1988].

Ces roches s'intègrent dans un champ filonien régional sensiblement NW-SE qui recoupe les granites.

Les levés montrant que les microdiorites sont postérieures aux microgranites, eux-mêmes postérieurs aux filons de quartz à wolframite.

Les quelques données géochimiques disponibles indiquent que ces différentes venues sont vraisemblablement *indépendantes* du granite du Veynazès : la plupart des échantillons s'intègrent à une lignée parallèle à celle du granite du Veynazès mais sensiblement plus riche en fer. Les données géochimiques différencient également ces microgranites de ceux de la région d'Entraygues qui se rattachent au granite de la Margeride et qui sont datés à 320 ± 10 Ma [Bellon et Gibert, 1981]. Ils se rapprochent par contre de certains granites et microgranites du nord de la Margeride, tels ceux de la région de Chaudes Aygues, datés par les mêmes auteurs à 260 ± 8 Ma; ces auteurs ont d'ailleurs trouvé un âge de 274 ± 8 Ma pour un « filon hypovolcanique » de la région d'Entraygues.

II. — GÉOCHIMIE.

Nous disposons de 50 analyses pour les éléments majeurs et certains éléments traces (Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Sr, V, Rb) effectuées par quantométrie au CRPG-Nancy. Après une première discussion de ces analyses, 20 échantillons ont été sélectionnés pour des analyses complémentaires : terres rares, U, Th, W et Sn dosés par I.C.P. au CRPG-Nancy et F et Li dosés par voie humide à Paris VI.

Les problèmes posés sont de trois ordres :

— peut-on caractériser chacun des granites distingués par la pétrographie ? Inversement existe-t-il des venues différentes mais indistinguables de celles reconnues par la pétrographie ?

— existe-t-il une évolution interne à chaque granite ?

— existe-t-il une liaison génétique entre ces différents granites ?

1) Distinction entre les différents granites.

Si l'on considère globalement les analyses chimiques, les différents granites identifiés dans le Veynazès apparaissent extrêmement voisins : tout au plus le granite sud ouest est-il légèrement plus basique et le granite ocre possède-t-il des termes plus acides. Les roches sont très groupées dans le diagramme de Streckeisau au voisinage de la limite grano-diorite — granite monzonitique.

Parmi les différents indices de différenciation possibles, et tout paramètre tendant uniformément vers 0 avec la différenciation peut être utilisé, MgO apparaît comme celui qui sépare le mieux les différents granites. La plupart des éléments (Si, Fe, Ti, Mn, Ba, Sr) à l'exception des alcalins et de l'alumine, montrent une évolution monotone et régulière, la corrélation étant positive pour Fe, Ti, Mn, Ba, Sr et négative pour Si.

Le teneur en MgO étant sensiblement le même (les aplites mises à part), les évolutions des différents granites se font en parallèle. Pour une même teneur en MgO, Fe, Ti, Ba et Si classent les différents granites dans l'ordre suivant (fig. 5) : granite sud ouest, granite noir, granite principal, granite ocre et aplites.

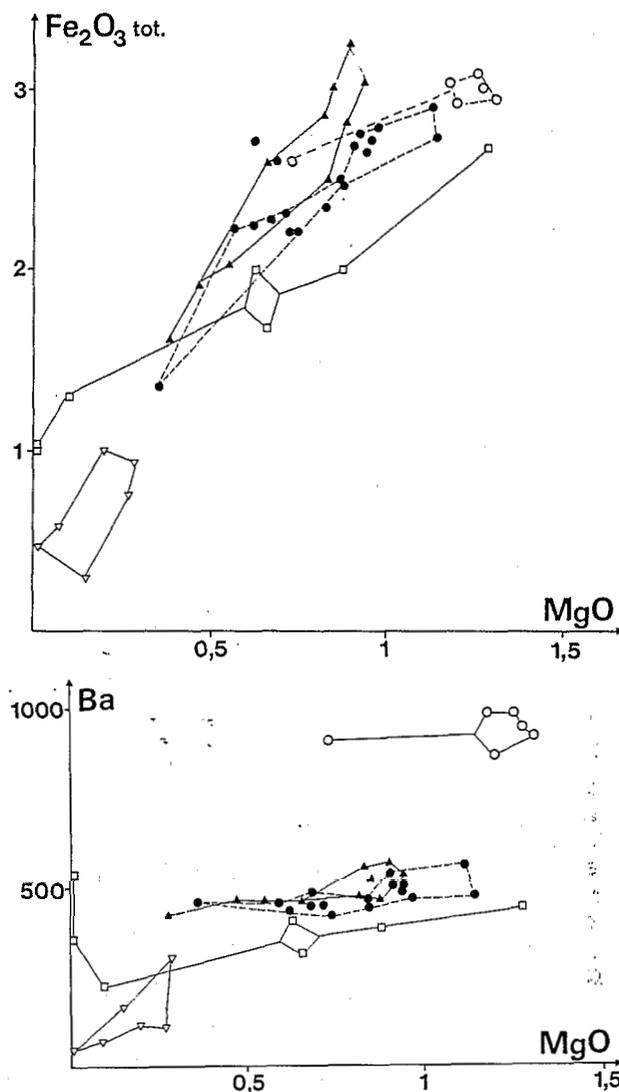


FIG. 5. — Diagrammes MgO/Fe₂O₃ et MgO/Ba. — Ronds blancs : granite sud-ouest; triangles noirs : granite noir; ronds noirs : granite principal; carrés : granite ocre; triangles blancs : aplites.

FIG. 5. — MgO/Fe₂O₃ and MgO/Ba diagrams. — Open circles : south-west granite; black triangles : black granite; black circles : main granite; squares : ochre granite; open triangles : aplites.

3) Evolution interne à chacun des granites.

A la différence des éléments précédents, Ca, Na, K, Al, Rb ne montrent pas en fonction de Mg. de variation monotone dans chacun des granites. Ainsi, par exemple, dans le granite principal et le granite sud ouest (fig. 6), K₂O commence par décroître pour croître ensuite, Na₂O et CaO montrent des variations inverses. Cela peut s'interpréter à priori par une cristallisation alternée de plagioclase et de feldspath potassique avec éventuellement participation de la biotite. La discussion et la quantification de cette hypothèse nous a amenés à introduire une norme utilisant quartz, orthose, albite, anorthite, muscovite (de composition idéale) et la biotite réellement présente dans le granite.

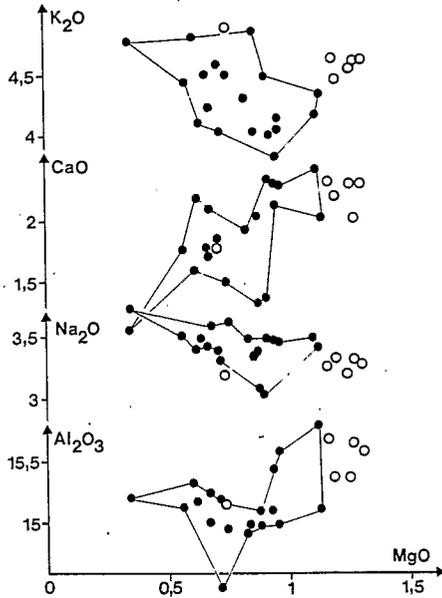


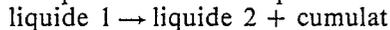
FIG. 6. — Diagrammes MgO/Al₂O₃/Na₂O/CaO/K₂O pour le granite principal et le granite sud-ouest (mêmes figurés que pour la figure 5).

FIG. 6. — MgO/Al₂O₃/Na₂O/CaO/K₂O diagrams for the main granite and the southwest granite (same symbols as in figure 5).

Le report des compositions normatives dans le diagramme quartz — albite — orthose (fig. 7) montre que les points sont très étroitement regroupés. Mis à part quelques points très dispersés (qui, comme nous le verrons plus loin, correspondent à des roches altérées), les points représentatifs des différents granites se disposent selon des courbes qu'il est tentant d'interpréter par une cristallisation le long de lignes cotectiques, les différences entre chaque granite étant dues à de faibles différences dans les conditions physiques. Toutefois si l'on indice les différents points par un paramètre représentant le degré de différenciation (sur la figure 8, établie pour le granite principal, les points sont indicés par l'indice de différenciation de Kuno — mais on pourrait également utiliser Mg, Ti, La...), il apparaît que ce paramètre ne varie pas de façon monotone le long de ces courbes.

L'interprétation géochimique nécessite donc une discussion beaucoup plus serrée, analyse par analyse.

L'hypothèse d'une évolution par cristallisation plus ou moins fractionnée peut être traduite par la relation :



Soit :

$$[R1] = x [R2] + (1 - x) (a \text{ Qtz} + b \text{ Pl} + c \text{ Or} + d \text{ Bi} + e \text{ Mu}),$$

équation dans laquelle sont connues les compositions chimiques des roches [R1] et [R2] et la composition des minéraux (nous avons utilisé la biotite prise en compte dans le calcul de la norme de R1). Le calcul des inconnues (x, a, b, c, d, e) se fait par une régression par la méthode des moindres carrés. Ce calcul n'est pas purement formel : les valeurs obtenues, proportion liquide — cumulat et composition du cumulat doivent être vraisemblables. D'ailleurs, si l'on tente toutes les combinaisons deux à deux possibles,

le nombre de solutions vraisemblables est très faible voire nul.

Nous pouvons ainsi discuter l'évolution interne à chacune des lignées définies précédemment ainsi que le passage entre les différentes lignées. Nous ne détaillerons les calculs que pour le granite principal, nous bornant à signaler les résultats pour les autres granites.

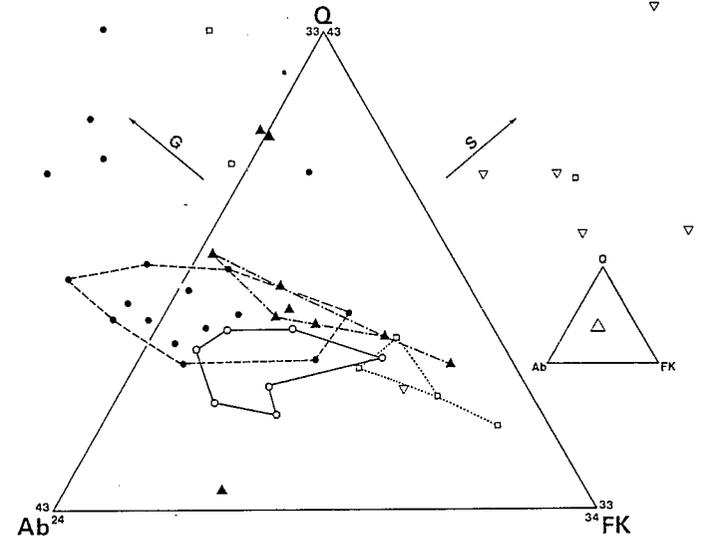


FIG. 7. — Diagramme normatif Quartz-Albite-Feldspath potassique. Mêmes figurés que pour la figure 5; vecteur G : greisenisation; vecteur S : vecteur séricitisation.

FIG. 7. — Normative diagram Quartz-Albite-K-Feldspar. Same symbols as in figure 5. G vector : greisenisation; S vector : sericitisation.

a) Toutes les analyses du *granite principal* peuvent être recalculées à partir de l'une d'entre elles (23) que nous considérerons comme magma parent, en utilisant les minéraux réellement présents. Différents processus peuvent expliquer les variations de ce granite (fig. 8).

— *Cristallisation fractionnée*, dont voici un exemple de calcul :

$$[23] = 0,74 [303] + 0,26 [0,27 \text{ Q} + 0,14 \text{ Or} + 0,31 \text{ Ab} + 0,17 \text{ An} + 0,17 \text{ Bi}]$$

$$\text{magma parent 1} \rightarrow 0,74 \text{ liquide 2} + 0,26 \text{ cumulat}$$

Les roches que l'on peut considérer comme des liquides déduits l'un de l'autre sont d'ailleurs peu nombreuses et le taux de différenciation est faible : l'indice de solidification de Kuno ne varie que de 8,54 à 6,60.

— *Phénomènes cumulatifs* : la plupart des roches apparaissent comme des mélanges entre un liquide différencié à partir du magma parent et la fraction solide formée par la cristallisation fractionnée.

$$\text{Il peut s'agir d'un cumulat total comme par exemple :}$$

$$[316] = 0,78 [321] + 0,22 [0,27 \text{ Qu} + 0,05 \text{ Or} + 0,28 \text{ Ab} + 0,18 \text{ An} + 0,19 \text{ Bi}]$$

[316] = 0,74 liquide différencié à partir de [23] + 0,22 cumulat total formé à partir de [23] (très analogue au cumulat calculé précédemment).

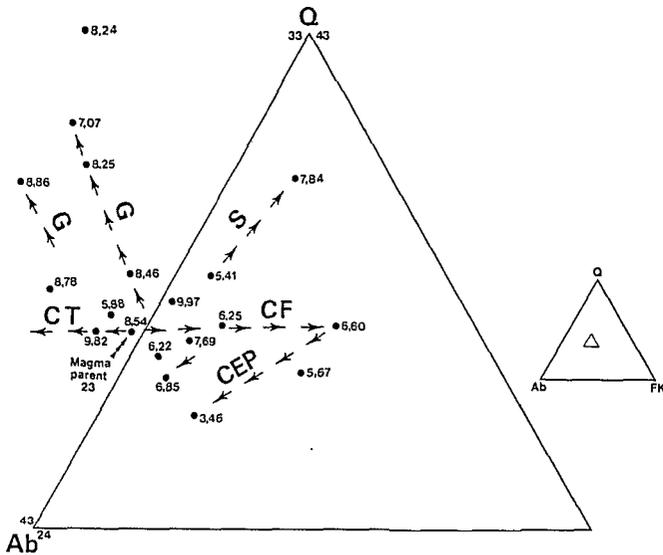


FIG. 8. — Diagramme normatif Quartz-Albite-Feldspath potassique pour le granite principal. Les points sont indicés par le S.I. de Kuno. — Vecteur CF : cristallisation fractionnée; vecteur CT : cumulats totaux; vecteur CEP : cumulats éclatés plagioclasiques; vecteur G : muscovitisation du feldspath potassique, greisenisation; vecteur S : séricitisation.

FIG. 8. — Normative diagram Quartz-Albite-K-Feldspar for the main granite — Points are indexed by Kuno's S.I. — CF vector : fractionnal crystallization; CT vector : total cumulats; CEP vector : plagioclastic cumulats; G vector : muscovitization of K-feldspath, greisenisation; S vector : sericitisation.

Il s'agit aussi très fréquemment d'un cumulat éclaté à dominante feldspathique, comme par exemple :

$$[516] = 0,56 [314] + 0,44 [0,28 \text{ Qu} + 0,18 \text{ Or} + 0,35 \text{ Ab} + 0,06 \text{ An} + 0,09 \text{ Bi}]$$

$$[516] = 0,56 \text{ liquide le plus différencié à partir de } [23] + 0,44 \text{ cumulat feldspathique.}$$

La très grande variabilité des teneurs en phosphore et la dispersion des points dans des diagrammes MgO/P₂O₅, suggèrent que l'apatite participe également à ces phénomènes cumulatifs.

l'analyse [172A] peut être recalculée à partir de [316] (ou de [23]) de la façon suivante :

$$[172A] = 1,18 [316] - 2,17 \% \text{ Qu} - 0,09 \% \text{ Or} - 8,82 \% \text{ Ab} - 7,23 \% \text{ An} - 3,35 \% \text{ Bi} + 4,10 \% \text{ Mu}$$

Le calcul conduit à admettre différents phénomènes : silicification, séricitisation du plagioclase et transformation du feldspath potassique en muscovite.

Ces phénomènes hydrothermaux ne se rencontrent que dans un nombre très limité de roches et dans celles-ci leur importance demeure faible.

Cette évolution interne du granite principal peut aussi être discutée à l'aide des terres rares : les différents spectres (fig. 9) se déduisent les uns des autres par translation sans qu'il y ait fractionnement. Nous sommes donc amenés à proposer une évolution sous l'influence d'un processus de minéraux qui globalement ne fractionne pas les terres rares : un tel processus apparaît possible avec une association biotite + plagioclase + apatite, ces deux der-

nières minéraux jouant en sens inverse pour l'euporium [Fourcade et Allègre, 1981; Henderson, 1984; Cocherie, 1985].

En conclusion il apparaît que les variations internes du granite principal, extrêmement faibles, peuvent être expliquées à l'aide des minéraux présents au niveau où nous observons ce granite. Nous considérons que ce granite résulte de la mise en place en bloc d'un unique magma puis d'une évolution de ce magma parent au niveau de la mise en place : la plupart des roches observées ne sont pas des liquides mais des mélanges entre un magma évoluant par cristallisation fractionnée et ses produits d'accumulation restés sur place ou faiblement triés.

b) Le granite sud-ouest est moins différencié (plus riche en Mg, Ti, V, La, Th, ...) que le reste du massif. Il apparaît considérablement enrichi en Ba et Sr et relativement plus riche en K et Rb, variations qui expliquent peut-être le feldspath différent, la biotite étant par ailleurs tout à fait comparable à celle du granite principal s.s. Chimiquement le granite sud-ouest est d'ailleurs très peu variable et la modélisation ne peut être poussée aussi loin que pour le granite principal s.s. Le calcul qui tenterait de faire dériver le granite principal du granite sud ouest à l'aide des minéraux réellement présents, est impossible; le passage de l'un à l'autre ne se fait donc pas par une évolution sur place. Les spectres de terres rares montrent que le granite sud ouest est enrichi en terres rares légères par rapport au granite principal s.s. et ne montre pas d'anomalie en Eu.

c) Les analyses du granite noir se regroupent autour de deux pôles : l'un moins évolué (norme : 20 % feldspath potassique, 12-14 % biotite, plagioclase An 25), l'autre beaucoup plus (norme : 25-26 % feldspath potassique, 6-7 % biotite, plagioclase An 15-17). Le calcul permet de montrer que les variations autour de ces deux pôles se font par un enrichissement soit en quartz soit en biotite, soit par altération hydrothermale.

Comme pour le granite principal, les spectres de terres rares se déduisent les uns des autres par translation; on retrouve le rôle de la biotite, de l'apatite et du plagioclase. La richesse relative en terres rares lourdes de certains échantillons est à mettre en relation avec une plus grande abondance du grenat [Henderson, 1984].

nous choisi pour analyse des échantillons apparemment sains, la discussion montre que les deux tiers des granites ocre analysés et la presque totalité des aplites sont des roches plus ou moins hydrothermalisées; ces altérations sont de deux types : muscovitisation plus ou moins poussée du feldspath potassique (sans toutefois atteindre de véritables greisens), cette altération est propre au granite ocre, et séricitisation du plagioclase.

Si l'on s'en tient aux roches non modifiées ou très faiblement modifiées (303A), il est possible de définir une lignée que l'on peut interpréter comme de différenciation, le SI de Kuno variant de 7,55 à 1,00. Les spectres de terres rares ne varient pas dans les termes peu différenciés (180C — 451) puis montrent une baisse d'ensemble pour les termes les plus évolués (303A). Notons d'ailleurs que les spectres de terres rares des roches affectées par la muscovitisation sont analogues à ceux des roches saines (180B) ou montrent une légère baisse des terres rares légères (439D) : cette altération est en

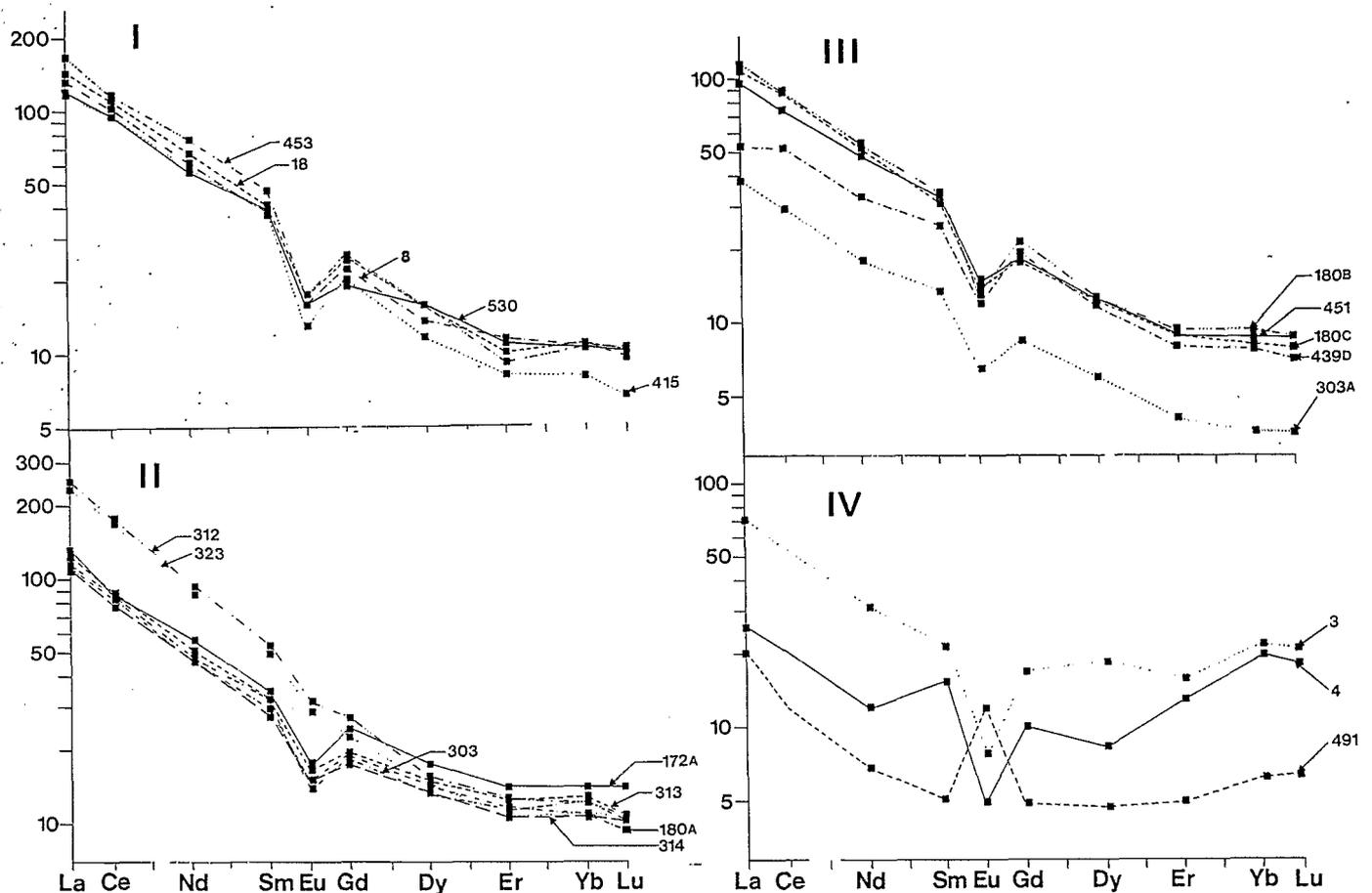


FIG. 9. — Spectres des terres rares normés aux chondrites pour les différents faciès du batholite du Veynazès. I : granite noir; II : granite principal et granite sud-ouest (échantillons 312 et 323; III : granite ocre; IV : aplites.
 FIG. 9. — Chondrite normalized rare-earth diagrams for the different facies of the Veynazès batholith. I : black granite; II : main granite and south west granite (samples 312 and 323); III : ochre granite; IV : aplites.

effet peu développée. Par contre la séricitisation modifie considérablement les spectres de terres rares.

La modélisation de cette lignée en utilisant les minéraux effectivement observés dans les roches apparaît impossible : l'évolution constatée ne s'est pas produite au niveau de mise en place.

e) *En résumé*, le batholite composite du Veynazès apparaît comme le résultat de l'injection successive de magmas provenant de zones profondes; l'existence de xénocristaux de grenat dans le granite noir suggère pour le moins une contamination au niveau catazonal. Les grands massifs qui constituent le massif principal et le granite sud-ouest semblent s'être mis en place en une seule fois, alors que les corps de dimensions plus réduites (granite noir, granite ocre, aplites) semblent résulter de plusieurs (voire de multiples) injections. Les différents magmas ont pu évoluer à leur niveau de mise en place par un processus de cristallisation fractionnée et d'accumulation produisant des roches relativement variées (liquides, cumulats, mélanges dans des proportions variables entre liquide et produits déjà cristallisés) au moins pour ce qui est des massifs assez gros; ceci n'est

guère sensible dans le cas des corps plus petits. Les altérations hydrothermales tardives, bien que limitées, introduisent d'autres variations.

3) Le problème d'une liaison génétique entre les différents granites.

Le problème se pose désormais de savoir si ces différents magmas issus de zones plus profondes que leur niveau de mise en place possèdent un quelconque lien de parenté. Deux modèles extrêmes peuvent être défendus : soit ces différents magmas résultent de processus de fusion plus ou moins poussée de la zone source, ou bien ils sont comagmatiques et dérivent l'un de l'autre et le problème se pose alors de savoir par quels processus ils sont liés.

Sur la base des données actuellement disponibles, nous pensons pouvoir retenir préférentiellement la seconde hypothèse. Plusieurs arguments suggèrent en effet le comagmatisme de ces différentes venues :

— tout d'abord leur association géographique au sein d'un même batholite;

TABL. I. — Sélection d'analyses des différents granites du batholite composite du Veynazès.

TABL. I. — Selected analyses from various granites of the Veynazès composite batholith.

Éch.	Granite noir			Granite principal			Granite S-O			Granite ocre		
	8	18	415	23	303	316	180A	312	323	180C	451	180B
SiO ₂	68,56	70,00	72,12	69,78	70,22	68,66	70,86	67,96	67,75	70,89	74,11	68,22
Al ₂ O ₃	15,16	15,13	14,50	15,01	14,99	15,57	15,18	15,33	15,67	14,79	13,20	15,03
Fe ₂ O ₃	0,52	0,42	0,45	0,44	0,45	0,45	0,41	0,67	0,54	0,39	--	0,34
FeO	2,28	2,16	1,32	1,99	1,65	2,11	1,65	2,19	2,25	1,52	1,23	2,11
MnO	0,05	0,06	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06	0,03	0,06	0,05
MgO	0,34	0,88	0,47	0,94	0,67	0,97	0,62	1,26	1,18	0,88	0,00	1,28
CaO	1,83	1,79	1,22	2,17	1,74	2,33	1,62	2,36	2,36	0,71	0,00	1,25
Na ₂ O	3,39	3,31	3,42	3,50	3,45	3,48	3,42	3,19	3,30	3,27	3,60	3,01
K ₂ O	4,62	4,79	4,98	4,14	4,50	4,04	4,84	4,58	4,66	5,59	5,53	5,20
TiO ₂	0,45	0,41	0,32	0,29	0,33	0,36	0,32	0,56	0,54	0,34	0,23	0,52
L.O.I.	0,81	0,89	0,99	0,81	0,83	1,21	0,86	1,01	0,89	1,67	1,36	1,73
	100,27	100,06	100,14	100,44	98,94	99,31	99,97	99,16	99,43	100,00	99,53	98,84
F	880	755			580		520	750	800	690	320	980
Li	235	276			240		225	240	250	235	173	279
Ba	533	476	464	452	447	468	437	987	984	384	363	442
Sr	125	133	101	143	120	141	137	694	631	94	83	141
Rb	199	239	230	216	200	188	212	188	182	272	254	276
V	26	36	< 10	29	30	54	44	67	66	19	< 10	39
Cu	16	13	< 10	< 10	108	3861	119	< 10	< 10	81	< 10	98
U	4,9	6,8	4,5		6,3		9,4	3,6	4,6	4,4	7,7	9,9
Th	16,0	15,7	16,1		7,0		14,4	21,8	24,5	16,0	15,1	15,9
Y	22,8	22,6	17,1		22,5		22,4	25,8	21,8	16,8	19,9	18,6
W	1,0	1,3	3,7		1,6		6,9	0,9	0,6	3,4	5,5	8,5
La	34,6	32,0	29,2		27,5		28,4	61,6	59,7	26,3	28,9	23,4
Ce	71,3	67,7	61,1		53,8		55,0	113,9	111,9	57,2	52,6	47,6
Nd	31,8	28,7	37,0		23,1		23,5	44,6	42,4	24,2	24,7	23,1
Sm	6,4	6,0	6,1		4,4		5,0	7,8	7,7	4,9	5,2	4,9
Eu	1,03	0,93	0,76		0,87		0,80	1,80	1,63	0,76	0,75	0,84
Gd	5,1	4,1	4,1		4,0		3,7	5,7	4,5	3,5	4,3	3,6
Dy	3,9	3,9	2,9		3,6		3,3	3,9	3,7	3,0	3,1	3,0
Er	1,55	1,69	1,38		1,90		1,74	2,05	1,84	1,42	1,43	1,49
Yb	1,79	1,87	1,35		1,83		1,80	1,99	1,76	1,32	1,42	1,51
Lu	0,26	0,26	0,17		0,27		0,23	0,27	0,26	0,20	0,24	0,22
Q	25,74	29,09	30,86	28,96	29,75	28,63	29,18	27,76	26,45	29,01	32,44	27,20
FK	20,65	21,14	23,82	18,48	20,21	16,41	21,98	19,94	20,42	24,47	29,12	21,21
Ab	30,59	28,56	29,57	30,86	30,08	30,34	29,55	27,74	28,67	28,40	31,80	27,09
An	9,76	9,12	6,21	11,21	8,94	11,98	8,24	12,13	12,11	3,64	0,00	6,66
Biot	9,82	8,72	5,42	8,62	6,85	8,96	6,53	10,64	10,21	7,27	2,02	10,32
Musc	3,40	3,34	4,09	2,05	4,14	3,64	4,50	1,76	2,11	7,18	4,91	7,48

PROVENANCE DES ÉCHANTILLONS :

Granite noir.

8 — La Gane, début du chemin de La Gane au Puech Long; roche interprétée comme légèrement cumulative en biotite.

18 — près d'Aygueparse, 70 m au sud du Roc, en bordure de chemin; liquide sans doute voisin du magma parent.

415 — bordure du chemin, 200 m au nord d'Aygueparse; liquide évolué.

Granite principal.

23 — 1 km au nord de La Gane, bord de la route; sans doute magma parent.

303 — boules en bordure de la D28, 250 m à l'est du pont du Diable; liquide.

316 — carrière privée, entrée du chemin d'accès de la D128 à Valette, 100 m à l'est de Melzac; cumulat.

180A — boules dans un champ, 250 m à l'WSW de la croix de Coupjac; cumulat plagioclasiq. de liquide évolué.

Granite sud-ouest.

312 — en bordure de la D28, 350 m au SW du Carbonier.

323 — en contrebas de la D125, 200 m au nord du cimetière de Senezergues.

Granite ocre.

180C — boules dans un champ, 250 m à l'WSW de la croix de Coupjac; liquide.

180B — Même localisation; faciès altéré (FK → Musc + Q).

451 — ensemble dans un champ, 150 m au NE de Coupjac; liquide.

L'ensemble des analyses réalisées au cours de cette étude est donné dans Nicolas [1985]; les lecteurs intéressés peuvent demander cet ensemble de données auprès du premier des auteurs (M. Demange).

— le fait que l'on puisse tracer une unique isochrone [Duthou *et al.*, 1986] incluant les différents granites;

— l'existence de diagrammes de différenciation où les différents granites n'apparaissent plus comme évoluant parallèlement mais successivement. Le lanthane par exemple, du fait de son large domaine de variation (5-60 ppm) apparaît comme un des paramètres les plus commodes pour mesurer le degré d'évolution du granite du Veynazès. Comme dans la plupart des granites calco alcalins hercyniens français [Cocherie, 1985], à partir d'un certain stade d'évolution, le lanthane (et les terres rares en général) se comporte comme un élément compatible et sa teneur décroît avec la différenciation.

La plupart des éléments évoluent de façon régulière et monotone avec la concentration en La, la corrélation étant positive pour Fe, Al, Ca, Ti, Mn, Ba et les terres rares (fig. 10), négative pour Si, K et Rb; Na ne varie pas de manière significative dans cette évolution et seuls Mg et P montrent d'importantes dispersions qui apparaissent liées aux phénomènes d'accumulation de biotite et d'apatite... On découvre là une loi d'évolution d'ensemble du « granite » du Veynazès qui intègre les variations internes propres à chaque granite. Il est certes possible d'objecter

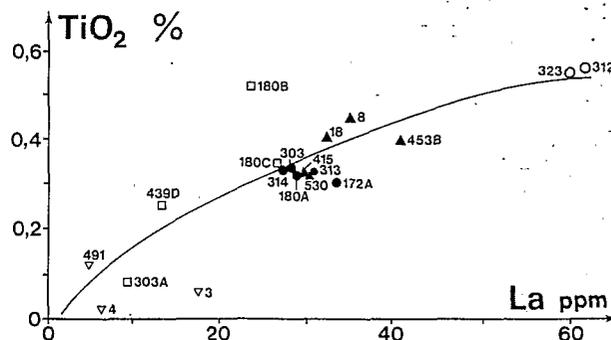
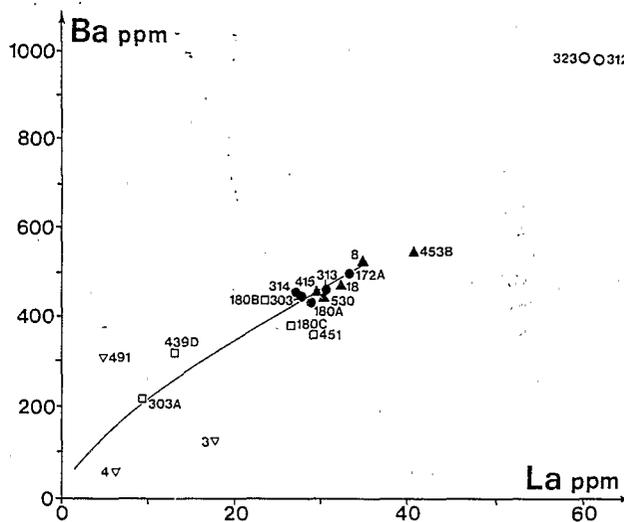


FIG. 10. — Diagrammes La/TiO₂ et La/Ba (mêmes figurés que pour la figure 5).

FIG. 10. — La/TiO₂ and La/Ba diagrams (same symbols as in figure 5).

que ce trend d'ensemble est un pseudo-trend qui engloberait des trends élémentaires de même direction. En fait, comme nous l'avons montré précédemment, les variations internes à chaque granite sont faibles et se font au voisinage du magma parent de chaque venue. Le trend d'ensemble apparaît en fait comme le trend d'évolution entre les différents magmas parents.

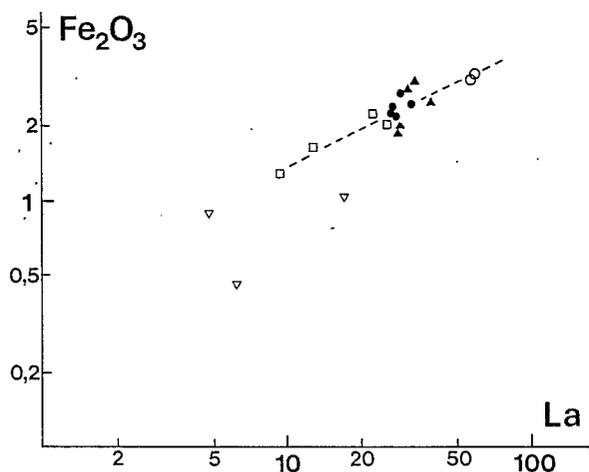


FIG. 11. — Diagramme bilogarithmique La/Fe₂O₃*.

FIG. 11. — *Bilogarithmic La/Fe₂O₃* diagram.*

En diagramme binaire simple, les courbes ne sont pas des droites mais l'emploi de coordonnées logarithmiques conduit à des alignements (fig. 11); l'ensemble des analyses apparaît donc compatible avec l'hypothèse que les différents faciès du « granite » du Veynazès sont comagmatiques et sont liés les uns aux autres par un processus de cristallisation fractionnée. La discussion précédente nous permet de définir la suite des magmas parents suivants : 312-323 pour le granite SW, 8-18 pour le granite noir, 23-303 pour le granite principal, 180C puis 303A pour le granite ocre. Les analyses se placent dans l'ordre suivant, du moins évolué au plus évolué : granite noir, granite principal, granite ocre, aplites. Sur beaucoup de diagrammes le granite sud-ouest apparaît comme le moins évolué; toutefois ses fortes teneurs en K, Ba, Rb, Sr et terres rares légères suggèrent que ce granite pourrait provenir d'une zone source différente.

Toutefois la modélisation que nous avons développée pour expliquer l'évolution interne à chaque granite ne permet pas d'expliquer le passage d'un granite à l'autre, voire même d'un magma à l'autre dans un même granite (granites noir et ocre) à l'aide des minéraux réellement présents au niveau de mise en place. La filiation entre les différents magmas apparaît s'être faite à un niveau profond qui nous échappe partiellement et la reconstitution des processus qui lient ces magmas est plus conjecturale : les minéraux qui interviennent ne sont pas accessibles à l'observation, soit qu'ils aient été résorbés soit qu'ils aient cumulé en profondeur.

Parmi les éléments dosés, les terres rares apparaissent comme les éléments qui peuvent le mieux nous renseigner sur les minéraux susceptibles d'être intervenus.

— Le passage du granite noir au granite principal se marque par un basculement des spectres autour du gado-

linium : abaissement des terres rares légères et augmentation des terres rares lourdes. Ceci peut s'expliquer par la cristallisation de monazite + plagioclase et moins vraisemblablement d'allanite.

— Le passage du granite principal au granite ocre se fait par abaissement des terres rares lourdes, les terres rares légères n'étant pas modifiées, ce qui peut s'expliquer par une cristallisation d'amphibole ou de pyroxène.

Il apparaît donc que le passage d'une lignée à l'autre est très différent de l'évolution interne de chaque lignée : à l'intérieur de chaque lignée les spectres de terres rares se déplacent par translation, ce que nous avons expliqué dans le cas du granite principal par une évolution au niveau de mise en place contrôlée par les minéraux effectifs du granite; par contre le passage d'une lignée à l'autre se fait avec basculement du spectre des terres rares et nous devons invoquer pour expliquer ce phénomène une évolution en profondeur sous l'influence de la cristallisation de plagioclase mais aussi de minéraux que nous n'observons pas sur place.

Le granite du Veynazès apparaît donc résulter d'une évolution magmatique à deux niveaux structuraux différents : l'évolution profonde produit par cristallisation fractionnée une suite de magmas (un tel schéma d'évolution en profondeur a également été proposé pour les granites de Meymac par Raimbault [1984]) qui sont injectés à un niveau structural supérieur où ils évoluent sur place sous l'influence des minéraux que nous observons dans le granite. Le diagramme MgO/La (fig. 12) permet de visualiser cette double évolution.

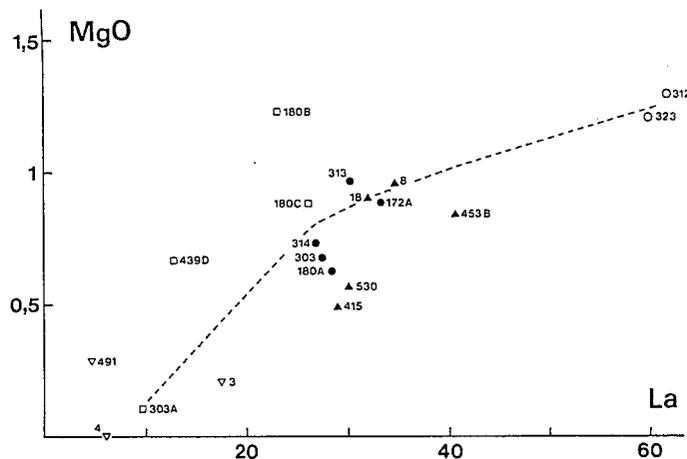


FIG. 12. — Diagramme La-MgO (mêmes figurés que pour la figure 5) Evolution d'ensemble du massif du Veynazès et évolution de chacun des granites.

FIG. 12. — *La-MgO diagram (same symbols as in figure 5). General evolution of the Veynazès batholith and evolution of each granite.*

4) Rôle métallogénique du granite du Veynazès.

Nous pouvons tenter d'apprécier le rôle métallogénique du granite du Veynazès en examinant le comportement de W, Sn, U, Li et F au cours de son évolution.

En toute rigueur la discussion devrait porter uniquement sur des liquides et nous savons que beaucoup de roches du Veynazès peuvent être en partie cumulatives et/ou hydro-

thermalisées. Les phénomènes cumulatifs ne semblent guère affecter ceux des éléments traces considérés ici, qui sont essentiellement concentrés dans les liquides. Par contre les altérations hydrothermales peuvent en modifier considérablement les teneurs. Leur importance peut être testée par :

- la discussion sur les éléments majeurs;
- la discussion sur certains éléments traces (Cu, Li, F) particulièrement sensibles aux phénomènes hydrothermaux : la teneur en cuivre, généralement supérieure au seuil de mesure (10 ppm), peut atteindre plusieurs centaines de ppm dans certains échantillons (par exemple 5 400 ppm dans 313 et 430 ppm dans 314) même pour des échantillons non modifiés en ce qui concerne les éléments majeurs et la plupart des autres éléments traces;

- la comparaison des spectres de terres rares avec ceux des roches qui peuvent être considérées représentatives de liquides non modifiés.

Il apparaît ainsi que les granites sud-ouest et noir ne sont pas ou très peu modifiés. En ce qui concerne le granite principal, les échantillons riches en W sont également riches ou très riches en Cu et apparaissent ainsi inutilisables (180A, 313, 314). Pour le granite ocre, certains échantillons peuvent être considérés comme des liquides non modifiés, mais il faut admettre pour d'autres une muscovitisation, très faible pour (303A), plus importante pour (180B) et (439D). Parmi les aplites, l'échantillon 491, à cordiérite, est sans doute lié au granite noir (cf. supra I.5.) et apparaît très hydrothermalisé. Les échantillons 3 et 4, qui se rattachent vraisemblablement au granite ocre, sont séricitisés mais leurs teneurs en W, Sn, Li et F sont très basses.

Nous pouvons désormais aborder le problème du comportement des éléments « métallo-géniques » lors de l'évolution du granite du Veynazès :

- les teneurs en lithium (et fluor ?), bien que fort sensibles à l'hydrothermalisme et par là fort dispersés, semblent décroître avec la différenciation;
- les teneurs en étain, tungstène et uranium croissent avec la différenciation pour l'ensemble du massif du Veynazès (fig. 13). L'exemple des granites noir et ocre suggère qu'il peut y avoir également un enrichissement à l'intérieur de chaque granite. Ces éléments se comportent

comme des éléments hygromagmatisés (au sens de Treuil [1973]) et se concentrent dans les liquides résiduels. Si l'on admet leur comagmatisme, l'explication la plus vraisemblable de la chute des teneurs en W, Sn, Li, F, ... entre le granite ocre et les aplites doit être interprétée comme résultant de la démixion d'une phase fluide dans laquelle se concentre le tungstène [voir par exemple Manning et Henderson, 1984] à un stade d'évolution très avancé du granite ocre.

Cependant, la faible quantité de granite ocre et d'aplités associées présents à l'affleurement apparaît beaucoup trop faible, au moins d'un ordre de grandeur, pour expliquer le potentiel minier de l'ordre de 7000 t WO₃ du district de Leucamp. Ceci rejoint les conclusions de l'étude géochimique (le granite ocre est formé par une suite d'injections d'un magma évoluant en profondeur et de conglomérats aux données de la géologie (disposition en *cone sheets* du granite ocre) et de la géophysique (anomalie légère au sud ouest de Ladinhac) permet d'émettre l'hypothèse de l'existence d'un apex caché dont les seules manifestations qui nous sont accessibles sont d'une part le cortège filonien

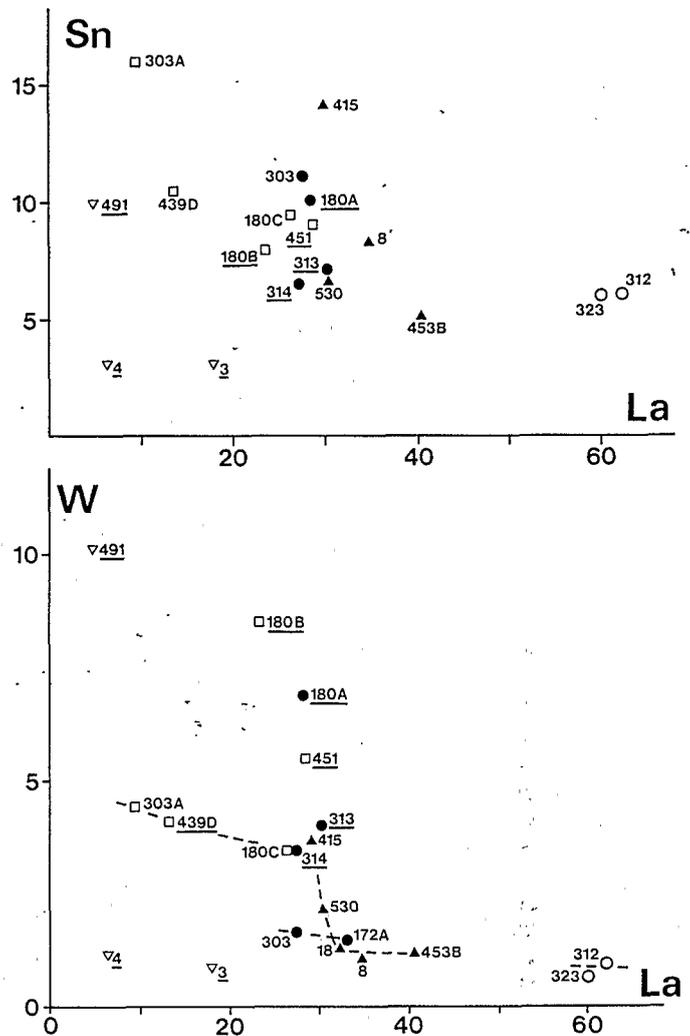


FIG. 13. — Diagrammes La/Sn et La/W (mêmes figurés avec la figure 5). Les numéros soulignés correspondent aux échantillons ayant subi des transformations hydrothermales.

FIG. 13. — La/Sn and La/W diagrams (same symbols as in figure 5). Underlined numbers refer to samples that are modified by hydrothermal alteration.

que constitue le granite ocre et les aplites associées et d'autre part les minéralisations en wolfram de Leucamp.

CONCLUSIONS.

Les méthodes utilisées dans cette étude, en particulier le couplage entre une discussion et une modélisation des compositions en éléments majeurs et l'utilisation des teneurs en certains éléments traces, permettent de mieux cerner les parts respectives de l'accumulation et de la cristallisation fractionnée dans l'évolution d'un batholite composite.

Phénomènes cumulatifs puisque les granites n'apparaissent pas comme des liquides magmatiques mais généralement comme des mélanges entre liquide magmatique et produits de cristallisation restés sur place ou faiblement triés.

Dans les phénomènes de cristallisation fractionnée nous avons pu distinguer, en ce qui concerne la partie NE du massif du Veynazès, une évolution, d'ailleurs faible, au niveau de mise en place, sous l'influence des minéraux effectivement observés dans les granites et une évolution en profondeur, beaucoup plus importante et rendant compte des faciès granitiques observés. Cette évolution en profondeur est beaucoup plus difficile à quantifier puisqu'elle fait intervenir des minéraux qui pour la plupart échappent à l'observation; les données disponibles apparaissent compatibles plus avec l'hypothèse d'une évolution par cristallisation fractionnée qu'avec l'hypothèse de fusions crustales plus ou moins poussées.

Cette discussion de l'évolution du massif du Veynazès permet d'appréhender son importance métallogénique. Le tungstène (comme l'étain, l'uranium, ...) se comporte en

élément hygromagmaphile se concentrant dans les liquides magmatiques les plus évolués pour finalement être libéré en profondeur lors de la différenciation ultime du granite ocre.

Remerciements. — Cette étude a bénéficié d'un financement de l'Action Concertée DGRST « Métallogénie de l'étain et du tungstène dans le Massif central » (A.C. 81 D 1190). Nous remercions la division minière Massif central du BRGM en la personne de MM. L. Renaud, chef de division, J.C. Delille, J.R. Le Chapelain et J. Pépin pour leur accueil à Leucamp et les nombreux documents aimablement communiqués. Les critiques et suggestions que MM. B. Bonin et Ch. Marignac sont apportées à la première version du présent article ont été grandement appréciées et utilisées par les auteurs.

Références

- BELLON H. & GIBERT J.P. (1981). — Analyses radiométriques (K-Ar) des associations plutoniques et hypovolcaniques hercyniennes de la région nord-Margeride (Massif central, France). — *Bull. Soc. géol. France*, Paris, (7), XXIII, pp. 429-437.
- BOESSE J.M. (1980). — Lithologie, structure et métamorphisme de la Châtaigneraie septentrionale (Cantal), Massif central français. — Thèse 3^e cycle, Univ. Paris Sud-Orsay, 129 p.
- BOGDANOFF S., CIRODDE J.L., PLOQUIN A., RAMBOZ C., LE CHAPELAIN J.R. & MIGNON R. (1987). — Recherche du tungstène dans le district de la Châtaigneraie (Cantal, Aveyron, Massif central français). Géochimie des schistes de la Châtaigneraie. Une décennie de recherche minière dans la Châtaigneraie. — *Chron. Rech. Min.*, Orléans, 487, pp. 11-30.
- CHÈZE Y. (1975). — Etude géologique de la Châtaigneraie au nord d'Entraygues (Aveyron). Pétrographie, structure et métallogénie. — Thèse 3^e cycle, Univ. Clermont-Ferrand, 143 p.
- COCHERIE A. (1985). — Interaction manteau — croûte : son rôle dans la genèse d'associations plutoniques calco-alkalines, contraintes géochimiques (éléments en traces et isotopes du strontium et de l'oxygène). — *Doc. BRGM*, Orléans, 90, 246 p.
- DEMANGE M. (1982). — Etude géologique du massif de l'Agout, Montagne Noire-France. — Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Paris VI, 1 tome 407 p. + 1 tome (annexes) 647 p.
- DEMANGE M. & NICOLAS Y.A. (1983). — La tectonique en Châtaigneraie aux abords du district wolframifère de Leucamp (Massif central, France). Contrôle structural des minéralisations filoniennes. — *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 297, II, pp. 807-810.
- DEMANGE M., NICOLAS Y.A., SOLER P. & GIOUSE H., (1988). — Le gisement tungstifère de Leucamp (Cantal, France). Contrôles géologiques et minéralisations. — *Bull. Soc. géol. France*, Paris, (8), IV, 4, pp. 559-570.
- DEER W.A., HOWIE R.A. & ZUSSMAN J. (1982). — Rock forming minerals. — Longman, Londres.
- DUTHOU J.L., BOGDANOFF S., CIRODDE J.L. & NICOLAS V.A. (1986). — Chronologie Rb-Sr du granite du Veynazès environnant le gisement wolframifère de Leucamp (Cantal, Massif central français). — 11^e R.S.T., Clermont-Ferrand, p. 58.
- FERRY J.M. & SPEAR F.S. (1978). — Experimental calibration of Fe and Mg between biotite and garnet. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, Berlin, 66, p. 113-117.
- FOURCADE S. & ALLEGRE C.J. (1981). — Trace element behaviour in granite genesis : a case study. The calc-alkaline plutonic association from the querigut complex (Pyénées, France). — *Contrib. Mineral. Petrol.*, Berlin, 76, pp. 177-195.
- GIOUSE H. (1984). — Etude géologique, pétrographique, et géochimique de la partie NE du granite du Veynazès, en relation avec le district tungstifère de Leucamp (Cantal, France). — Rapport d'option (inédit), E.N.S. des Mines, Paris, 94 p.
- HENDERSON P. Ed. (1984). — Rare earth element geochemistry. — *Development in Geochemistry 2*, Amsterdam, 510 p.
- JOUBERT E. (1978). — Etude pétrographique, structurale et métallogénique de la Châtaigneraie (secteur du Veynazès, Cantal), Massif central français. — Thèse 3^e cycle, Univ. Clermont Ferrand, 242 p.
- MANNING D.A.C. & HENDERSON P. (1984). — The behaviour of tungsten in granitic vapour-melt system. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, Berlin, 86, pp. 286-293.
- NICOLAS V.A. (1985). — Le gisement wolframifère de Leucamp dans son environnement géologique (Châtaigneraie du Cantal, France). — Thèse 3^e cycle, E.N.S. des Mines, Paris, 384 p.
- RAIMBAULT L. (1984). — Géologie, pétrographie et géochimie des granites et minéralisations associées de la région de Meymac (Haute Corrèze, France). — Thèse Docteur Ingénieur, E.N.S. des Mines, Paris, 482 p.
- THOMPSON A.B. (1976). — Mineral relations in pelitic rocks. Vol. 2 : calculations of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. — *Amer. J. Sci.*, New Haven (Connecticut), 276, pp. 435-454.
- TREUIL M. (1973). — Critères pétrologiques, géochimiques et structuraux de la genèse et de l'évolution des magmas basaltiques : exemple de l'Afar. — Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Orléans, 284 p.
- WEPPE M. (1951). — Contribution à l'étude des gîtes de tungstène français. Puy-les-Vignes (Haute-Vienne). La Châtaigneraie (Cantal). — *Geol. Appl. et Prosp. Min.*, Paris, III, 1-2-3, 228 p.