

Âges stéphaniens des microgranites du Velay (Massif central français)*

Jean-Marc MONTEL (1)
Jacky BOULOTON (2)
Michelle VESCHAMBRE (2)
Cyrille PELLIER (2)
Karine CERET (2)

Stephanian ages of the Velay microgranites (French Massif Central)

Géologie de la France, 2002, n° 1, pp. 15-20, 2 fig., 1 tabl.

Mots-clefs : Microgranite, Datation, U-Th-Pb, Stéphanien, Permien sup., Haute-Loire, Ardèche, Velay.

Key-words: Microgranite, Dating, U-Th-Pb, Stephanian, Upper Permian, Haute-Loire France, Ardèche France, Velay.

Résumé

Les filons de microgranite qui recourent le dôme granitique du Velay sont classiquement considérés comme représentant les ultimes manifestations anatéctiques dans cette partie du Massif central. Deux de ces filons ont été étudiés sur le plan pétrologique et géochronologique. Tous les deux sont peralumineux et potassiques, et présentent de fortes analogies avec les granites tardimigmatitiques, mais montrent des signes de refroidissement rapide et d'altération hydrothermale. Les datations des monazites par microsonde électronique montrent dans les deux cas un âge Stéphanien qui correspondrait à la mise en place, et un âge Permien supérieur (Thuringien), qui daterait l'épisode hydrothermal.

Abridged English version

The Velay granitic dome is characterised by three Late Hercynian anatetic events (Montel et al., 1992). The first, dated at 314 ± 5 Ma (Mougeot et al., 1997), was responsible for a major development of layered migmatites. The second, dated at 300 Ma (Mougeot et al., 1997; Williamson et al., 1992), caused major fluid-absent melting that produced the various Velay granites. The third and final event was an emplacement of dykes of porphyritic granite and granite porphyry. The age of

the end of this major thermal event is poorly constrained; apatite U-Pb dating suggests a general cooling at about 290 Ma (Mougeot et al., 1997), whereas Rb-Sr whole-rock isochrons on late granites yield Permian ages. The present paper provides new data for two microgranites - the Montasset and Charron microgranites.

The Montasset microgranite, which is described in detail elsewhere (Boulton et al., 2000), is situated in the southern part of the dome (Fig. 1). It displays a typical porphyritic texture, with phenocrysts of corroded quartz, altered plagioclase and K-feldspar, chloritized biotite, pinitized cordierite, and large garnets. The matrix is mainly aphyric, with spherulitic and granophyric textures in places. Secondary minerals include muscovite, calcite, and fluorite.

The Charron microgranite, situated in the core of the Velay granite (Fig. 1), has a porphyritic texture with phenocrysts of centimetre-long K-feldspar, corroded quartz, plagioclase, biotite, and cordierite. Skeletal K-feldspar and acicular biotite form microphenocrysts and the matrix is aphyric with numerous spherulitic structures, indicating a fast cooling rate for this facies.

Geochemically, both facies are peraluminous, leucocratic, and K-rich and

are very similar to other late granites in the Velay dome (Montel and Abdelghaffar, 1993). The source temperature estimated by monazite and zircon thermometry (Montel, 1993; Harrison and Watson, 1983) is $820-850^\circ\text{C}$, which is identical to source temperatures of other late granites in this area. Electron-probe dating of monazite was carried out using the method described in Montel et al. (1996). The results, which are presented in Table 1 and Figure 2, are identical for the two studied samples. The age population is complex, and the statistical analysis shows that a double-age model must be considered for both samples. The ages of the two events are 257 ± 8 Ma and 306 ± 12 Ma (MSWD=1.55) for the Montasset sample, and 252 ± 11 Ma and 291 ± 9 Ma for the Charron sample. We consider that the Permian ages represent a hydrothermal event and that the Stephanian ages reflect melting and emplacement.

Introduction

Le Dôme du Velay est une structure majeure de la chaîne varisque d'Europe de l'Ouest. Il forme un massif de $6\,000\text{ km}^2$, limité au nord par les Monts du Lyonnais et le Forez, au sud par les Cévennes, à l'est par la Vallée du Rhône, et à l'ouest par le granite de la Margeride et les séries du Haut-Allier. Globalement c'est un

* Manuscrit déposé le 15 octobre 2000, accepté le 9 avril 2001.

(1) Université Paul Sabatier, LMTG UMR CNRS 5563, 39 allées Jules Guesde, 31000 Toulouse.

(2) Université Blaise Pascal, LMV UMR CNRS 6524, 5 rue Kessler, 63000 Clermont-Ferrand.

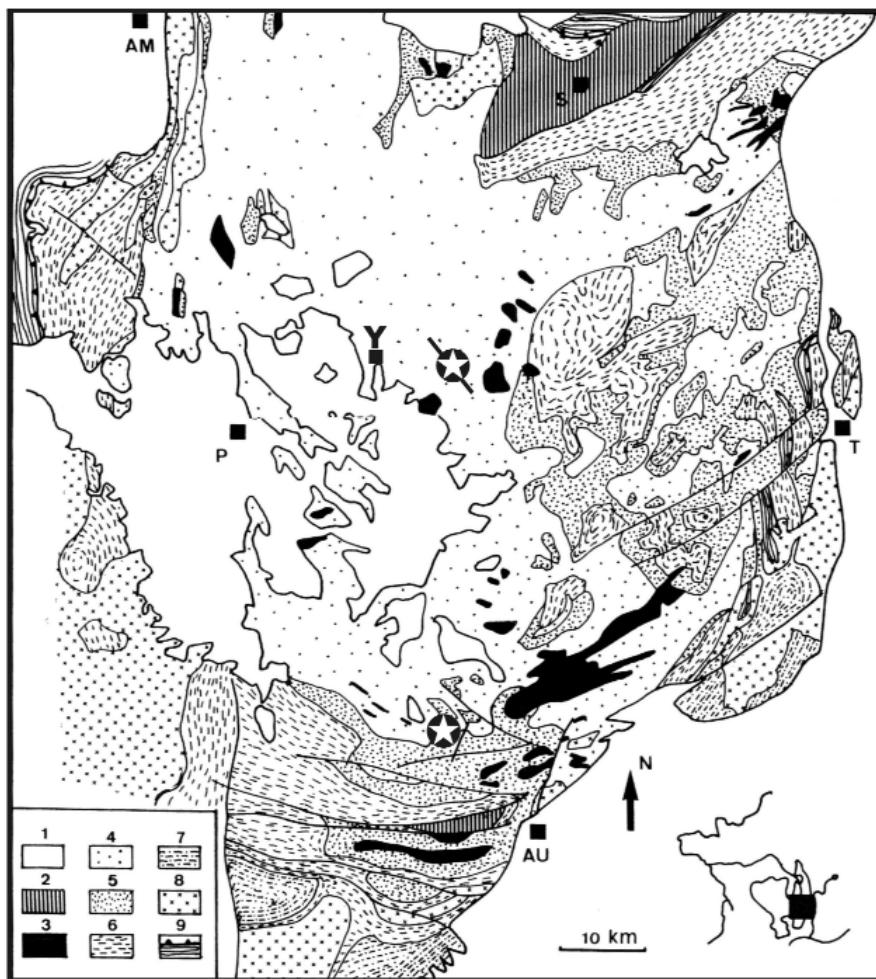


Fig. 1.- Schéma géologique du Velay avec la localisation des microgranites étudiés : Charron au centre, Montasset au Sud. Am = Ambert, P = Le Puy, Au = Aubenas, S = Saint-Etienne, Y = Yssingeaux, T = Tournon. (1) sédiments et volcanisme récents, (2) bassins stéphaniens, (3) granite tardimigmatitique, (4) granite du Velay, (5) Migmatites, (6) roches métamorphiques de degré moyen à haut, (7) roches métamorphiques de bas degré, (8) autres granites, (9) unité supérieure des gneiss.

Fig. 1.- Geological sketch map of Velay showing the location of the studied samples: Charron microgranite in the core, Montasset microgranite in the south. Am=Ambert, P=Le Puy, Au=Aubenas, S=Saint-Etienne, Y=Yssingeaux, T=Tournon. (1) Recent sediments and volcanic rocks, (2) Stephanian basins, (3) late granite, (4) Velay granite, (5) migmatite, (6) medium- to high-grade metamorphic rocks, (7) low-grade metamorphic rocks, (8) other granites, (9) gneiss upper units.

ensemble granito-migmatitique tardihercynien, pourvu d'une écorce métamorphique de type basse pression-haute température (Dupraz et Didier, 1988 ; Montel *et al.*, 1992 ; Lagarde *et al.*, 1994).

Dans le détail, on peut reconnaître trois épisodes de production de magmas granitiques. Le premier épisode conduit essentiellement à des migmatites rubanées. Le second épisode culmine dans la mise en place des divers faciès du granite à cordiérite du Velay, et correspond au stade majeur de fusion. Le dernier épisode est marqué par la mise en place des granites dits « tardimigmatitiques », et des filons de microgranite qui font l'objet de cette note.

L'âge du premier épisode de fusion a été estimé par datations U-Pb sur les monazites des migmatites à 314 ± 5 Ma dans la partie sud du Velay (Mougeot *et al.*, 1997). Le stade principal d'anatexie correspondant à la formation du granite du Velay est bien calé à 300 Ma à la fois par U-Pb sur monazite (301 ± 5 Ma, Mougeot *et al.*, 1997), Rb-Sr sur roches totales (298 ± 8 Ma, Caen-Vachette *et al.*, 1982), Rb-Sr sur paires biotite-roche totale (Williamson *et al.*, 1992), K-Ar sur amphiboles (Cantagrel, 1973). La durée de l'anomalie thermique, en revanche, est pour l'instant mal contrainte car les âges sur les faciès tardifs sont dispersés et contradictoires. Les âges de refroidisse-

ment U-Pb sur apatite donnent 289 ± 5 Ma (Mougeot *et al.*, 1997), ce qui indique que l'ensemble du bâti, au moins dans la partie sud du Velay, était à moins de 550°C avant la fin du Stéphanien. Ceci n'est pas compatible avec des datations Rb/Sr roches totales qui indiquent une activité magmatique continue jusqu'au Saxonien : granites tardimigmatitiques du Pont de Chervil à 274 ± 7 Ma (Rb-Sr roches totales, Caen Vachette *et al.*, 1982), leucoxénites du nord du Velay à 284 ± 7 Ma et 267 ± 11 Ma (Rb-Sr roches totales, Gay *et al.*, 1992). Les microgranites seraient eux encore plus tardifs, puisque l'un d'entre eux a donné un âge K-Ar à 259 ± 5 Ma (Vitel *et al.*, 1994).

Cet article présente des données géochronologiques nouvelles sur deux faciès de microgranite du centre et du sud du Velay, et discute la signification des âges post-stéphaniens dans le Velay.

Les microgranites

Les cartes géologiques au 1/50 000 existantes (Burzet, Bambier *et al.*, 1985 ; Yssingeaux, Feybesse *et al.*, 1998) font apparaître une famille de microgranites (« porphyres à quartz » des anciens auteurs Bertucat, 1956 ; Sanitas et Lapadu-Hargues, 1958) qui forment des filons peu épais (< 100 m) d'extension kilométrique, parallèles au bord du dôme. Leur âge exact n'est pas connu, mais on admet qu'ils correspondent aux manifestations magmatiques ultimes de l'anatexie Vellave (Bambier *et al.*, 1985 ; Montel et Abdelghaffar, 1993).

Le microgranite du Montasset forme un filon quasi-continu sur le flanc sud du Suc du Montasset, immédiatement au nord de Montpezat-sous-Bauzon (fig. 1 ; feuille de Burzet). Faiblement penté vers le nord, il est bien visible dans le paysage et peut être échantillonné dans une carrière ouverte à l'occasion des travaux hydroélectriques ($x = 750,4$; $y = 3 270,25$). La roche, parsemée de miaroles, est de couleur beige à rose plus ou moins foncé, en fonction du degré d'altération. Le contact avec l'encaissant de gneiss migmatitiques est franc, souligné par un faciès de bordure aphyrique, montrant une ébauche d'organisation en structures fibroradiées (sphérolites). Au cœur du filon, la texture est microgrenue porphyrique, avec une

tendance granophyrique nette. À côté des phénocristaux habituels des microgranites - quartz corrodé, plagioclase albitesé, feldspath potassique altéré et biotite chloritisée – la roche contient également de la cordiérite pinnitisée et de gros cristaux de grenat, dont la signification est discutée par ailleurs (Boulton *et al.*, 2000). La muscovite secondaire en rosettes est abondante dans la mésostase, et témoigne de l'importance des phénomènes deutériques. Les autres minéraux secondaires sont la fluorine et la calcite.

Le second faciès étudié affleure le long de la RN 500, environ 2 km au nord de Tence (fig. 1, x = 753,9, y = 3 317, feuille d'Yssingeaux). Il forme un filon de 20 m d'épaisseur orienté SE-NW, à fort pendage nord. À cet endroit il est intrusif dans un granite du Velay hétérogène, au contact duquel il prend un faciès de bordure aphyrique. Des faciès identiques, peuvent être retrouvés dans la région en divers endroits (x = 752,4, y = 3 318,25 ; x = 750,7, y = 3 319,3 ; x = 746,85, y = 3 320,3). Suivant la carte au 1/50 000 feuille d'Yssingeaux, ils forment un faisceau de filons orientés NW-SE. La roche est de teinte ocre, la texture est microgrenue porphyrique, constituée de phénocristaux, de microphénocristaux, et d'une matrice très altérée et très riche en sphérolites (50 % du volume). Les phénocristaux sont des feldspaths potassiques en tablette atteignant 15 mm de long, des quartz « corrodés », des plagioclases trapus damouritisés, des biotites faiblement altérées, et des cordiérites prismatiques totalement pinnitissées. Les microphénocristaux sont des biotites aciculaires, et de petits feldspaths potassiques à faciès squelettique. La paragenèse accessoire est constituée d'apatites trapues, de zircons automorphes et de quelques monazites. La matrice est très altérée, constituée d'une pâte aphyrique parsemée de sphérolites de quelques microns de diamètre, constitués de fibres rayonnantes de quartz et de feldspaths, parfois, mais pas systématiquement, organisées autour d'un nucleus de nature variable (quartz, zircon, biotite).

La présence de biotite aciculaire et les feldspaths squelettiques montrent sans ambiguïté que le magma a été refroidi très rapidement. La signification exacte des sphérolites est plus difficile à préciser car ce type de structure peut se

	Th	±	U	±	Pb	±	T	±
Montasset								
G	39020	540	1720	163	610	70	305	42
G	47830	582	4990	175	860	72	300	30
G	36590	528	2030	165	630	70	326	43
G	34660	518	2380	167	620	70	326	44
M	114100	836	2390	170	1460	77	267	17
M	87200	744	1590	166	1100	74	265	21
M	69920	676	2140	164	940	74	273	25
M	77380	708	2010	166	1010	72	268	23
M	77320	706	2160	167	980	73	259	23
G	44800	564	9140	189	1010	73	302	26
G	46230	572	5110	176	630	69	224	28
G	39350	538	5370	176	580	69	228	31
G	40850	547	8490	189	1000	72	326	28
M	13700	385	1080	159	170	68	221	99
M	23780	452	910	158	300	67	250	65
G	45810	571	5050	175	660	70	237	29
G	43870	558	9460	190	950	72	284	25
Charron								
M	32240	503	4130	172	610	70	298	41
M	87630	748	7730	188	1410	77	279	18
M	40180	545	3960	172	620	70	261	35
M	34710	515	3580	170	480	69	231	38
M	29890	490	3390	170	460	70	252	44
M	43270	558	5150	177	780	71	290	31
M	70470	679	4160	174	1040	74	277	23
M	50240	593	5010	175	730	71	245	28
M	38220	532	3050	168	490	70	227	37
M	35770	520	2410	165	460	69	235	41
M	84890	736	7620	188	1450	77	295	19
M	57640	627	11010	198	1230	75	294	21
M	53460	603	11180	190	1030	69	257	20
M	62480	644	5380	178	920	73	257	24
M	68670	674	5740	180	1110	74	283	22
M	30470	493	2920	168	460	69	257	45
M	66590	666	22500	234	1930	81	308	15
M	82060	726	7450	186	1360	76	286	19
M	58870	631	5610	178	920	72	266	24

U, Th, Pb en ppm ; T en Ma ; G : monazite incluse dans un grenat, M, monazite de la mésostase. U, Th, Pb in ppm ; T in Ma; G: monazite included in garnet; M: monazite in matrix.

Tabl. 1.- Résultats analytiques des datations. U, Th, Pb en ppm ; T en Ma ; G : monazite incluse dans un grenat, M, monazite de la mésostase.

Table 1.- Analytical results of the dating. U, Th, Pb in ppm; T in Ma; G: monazite included in garnet; M: monazite in matrix.

développer soit par cristallisation à partir d'un liquide brutalement refroidi (Lofgren, 1971a ; McArthur *et al.*, 1998), soit par dévitrification d'une matrice vitreuse (Lofgren, 1971b).

Sur le plan géochimique, ces deux faciès ont une composition de leucogranite peralumineux à caractère potassique marqué. Ils s'intègrent bien dans la famille des granites tardimigmatitiques qui définit une lignée peralumineuse alumino-potassique de type « Guéret » (Montel et Abdelghaffar, 1993). La température de la source des microgranites peut être estimée par thermométrie chimique, en supposant une saturation en monazite (Montel, 1993) et en zircon (Harrison et Watson, 1983). Les deux

thermomètres donnent des résultats identiques, 820 °C pour le microgranite de Charron et 840 °C pour celui du Montasset, en accord avec les résultats obtenus par thermométrie classique (850 °C) sur les granites tardimigmatitiques (Montel *et al.*, 1992).

En définitive, les microgranites ont beaucoup d'affinités avec les granites tardi-migmatitiques : lignée alumino-potassique, minéralogie à cordiérite, mode de mise en place en filons parallèles aux bords du dôme du Velay, et température de genèse identique. Ils appartiennent donc probablement à une famille unique, dont ils formeraient les termes les plus superficiels, comme l'indiquent leurs caractères texturaux.

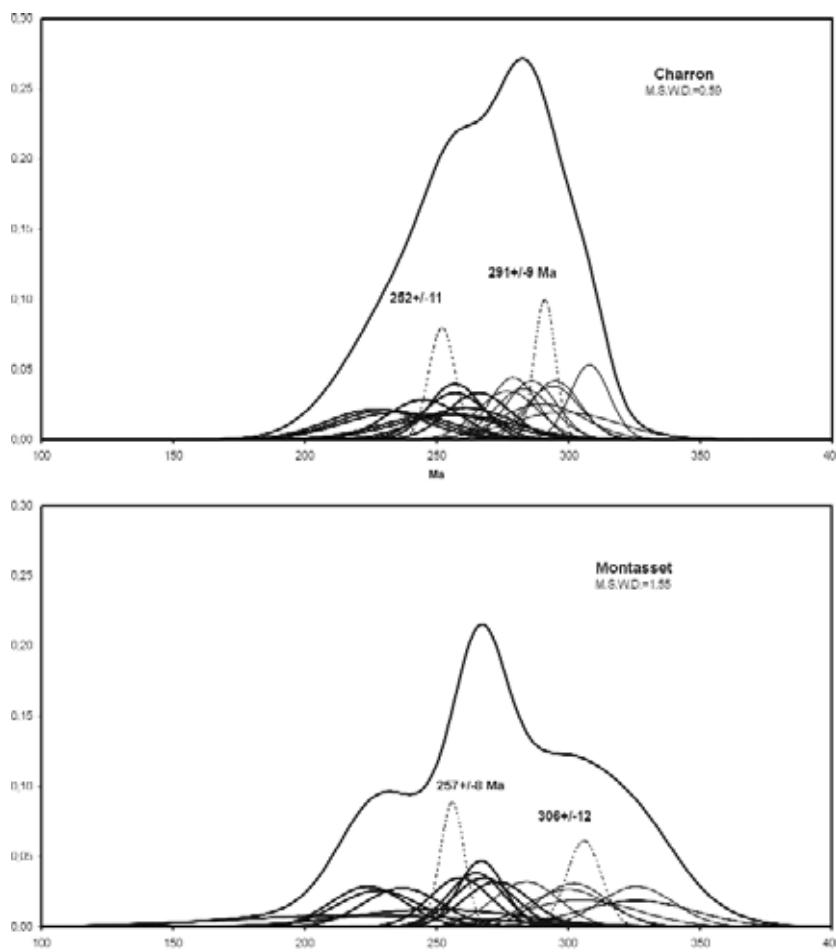


Fig. 2.- Représentation en histogrammes continus des distributions des âges obtenus. Chaque courbe représente une mesure, figurée par sa densité de probabilité. L'histogramme continu est obtenu en faisant la somme des courbes individuelles. Pour chaque échantillon les deux populations d'âges ont été distinguées : les âges permiens sont en trait épais et les âges stéphaniens sont en trait fin. Les courbes en pointillés indiquent les âges moyens pour chaque population. L'axe vertical est une densité de probabilité, il est sans unité.

Fig. 2.- *Weighted-histogram representation of age distribution. Each curve represents a measurement, shown as its probability density function. The weighted histogram is obtained by summing up all the individual curves. The Permian ages are drawn as thick lines and the Stephanian ages as thin lines. The dashed lines indicate the best estimate for each population. There is no scale for the vertical axis.*

La datation

La méthode utilisée est celle de la datation de la monazite à la microsonde électronique. On obtient un âge chimique à partir des teneurs en U, Th, Pb mesurées directement sur lames minces (Montel *et al.*, 1996). Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

Dans le microgranite du Montasset 10 mesures ont été faites sur des monazites incluses dans les grenats, et 7 sur des cristaux de la mésostase. Les monazites sont riches en U (0,1-0,9 %, moyenne 0,4 %) et moyennement riches en Th (0,13-11 %, moyenne 5,2 %). De telles compositions

sont typiques de monazites de granites différenciés (Cuney et Friedrich, 1987). Les teneurs en plomb varient de 170 à 1 460 ppm, et les âges correspondants de 221 ± 99 Ma à 326 ± 48 Ma. La répartition de la population d'âge apparaît complexe (fig. 2a), ce qui est confirmé par l'analyse statistique : on obtient pour l'ensemble de la population un âge de 273 ± 7 Ma, mais avec un MSWD de 4,32 qui n'est pas acceptable. La procédure statistique décrite dans Montel *et al.* (1996) aboutit à un modèle à 2 âges avec 10 points dans une population à 257 ± 8 Ma, et 7 points dans une population à 306 ± 12 Ma, pour un MSWD global acceptable de 1,55. Le lien entre

l'âge et la position des monazites est très clair : toutes les monazites de la population la plus vieille sont situées dans les grenats, tous les cristaux de la matrice appartiennent à la population la plus jeune. Il existe toutefois trois cristaux de la population jeune dans les grenats. On peut supposer que ces cristaux sont connectés à la matrice par des fractures, ce qui expliquerait leur remise à zéro lors de l'épisode tardif, comme cela a été observé dans les kinzigites de Beni-Bousera (Montel *et al.*, 2000).

Deux grands cristaux (150 x 150 μm) seulement ont été trouvés dans le microgranite de Charron, et 19 analyses ont été effectuées. Les compositions obtenues sont également typiques des granites différenciés (Th : 0,3-8,7 % ; moyenne 5,4 %, et U : 0,2-2,2 ; moyenne 0,64 %). Les teneurs en plomb varient de 460 à 1 930 ppm, et la gamme d'âges correspondante de 227 ± 37 à 308 ± 15 Ma. De nouveau, la répartition des âges apparaît complexe (fig. 2b), avec un âge global à 275 ± 7 Ma. De nouveau, la solution à une seule population n'est pas acceptable (MSWD = 2,2) alors qu'une solution à deux âges donne 10 mesures dans une population à 252 ± 11 Ma et 9 mesures dans une population à 291 ± 9 Ma, pour un MSWD global de 0,59. À partir des données existantes aucune organisation spatiale des âges au sein des cristaux, de type cœur-bordure, n'est perceptible. Ceci n'est pas surprenant car la répartition des âges dans les monazites peut être très complexe et nécessiterait une étude très détaillée pour être mise en évidence (Cocherie *et al.*, 1998).

Interprétation et discussion

La cohérence des résultats est tout à fait remarquable. Dans les deux faciès, pourtant distants de plusieurs dizaines de kilomètres, on trouve deux âges identiques, l'un Stéphanien (306 ± 12 et 291 ± 7 Ma) et l'autre Permien supérieur (Thuringien, 257 ± 8 et 252 ± 11 Ma). Deux hypothèses sont envisageables pour rendre compte des résultats. La première est d'admettre que l'âge Stéphanien est celui de la mise en place des filons, l'âge Permien traduisant alors une perturbation du système lors d'un épisode hydrothermal. L'autre interprétation consiste à proposer un âge Permien pour les microgranites. Il faut alors voir dans les mona-

zites stéphanienes des reliques de la source, qui auraient résisté à l'anatexie permienne. Pour cela il faudrait que l'épisode de fusion ayant engendré les microgranites soit suffisamment « froid » pour qu'une partie seulement de la monazite soit dissoute. Si l'on imagine que 50 % de la monazite résiste à la fusion (proportion d'âges stéphaniens pour les deux échantillons), cela implique des températures maximales de 750 °C, d'après les données de solubilité de la monazite dans les magmas granitiques (Montel, 1993). Dans ces conditions, la biotite est stable dans les pélites (Vielzeuf et Holloway, 1988) et les grauwackes (Vielzeuf et Montel, 1994), et la cordiérite ne peut se former. Si la biotite est stable, la fusion crustale ne peut se déclencher qu'en présence d'eau et le magma résultant, saturé en eau, qui n'a pas de capacité ascensionnelle, ne peut se mettre en place dans des niveaux superficiels sous forme de microgranites (Holtz et Johannes, 1994). Le deuxième argument qui s'oppose à l'hypothèse d'un âge Permien des microgranites tient à l'origine du grenat du microgranite du Montasset. Dans ce faciès, le grenat se forme par fusion-déshydratation de la biotite, à plus de 850 °C (Boulton et al., 2000). Les inclusions de monazite dans le grenat, dans ces conditions, peuvent difficilement correspondre à des reliques préservées lors de l'anatexie. Plus vraisemblablement, les monazites incluses dans le grenat ont le même âge que leur hôte, et par extension le même âge que l'anatexie.

Cette interprétation des données géochronologiques, avec un épisode magmatique au Stéphanien et un épisode

hydrothermal au Permien, est compatible avec les données de la géologie régionale. Tout indique que les microgranites se sont mis en place dans un environnement froid : le mode de gisement, la texture microgrenue et l'existence de cristaux squelettiques. Cela signifie que le domaine du Velay, encore très chaud à 300 Ma, était déjà refroidi à 290 Ma, en accord avec les données géochronologiques sur apatite (Mougeot et al., 1997) et avec les modèles tectoniques qui montrent une dénudation rapide du dôme par failles normales à la fin du stade principal de fusion (Malavieille et al., 1990 ; Lagarde et al., 1994). L'épisode magmatique donnant naissance aux microgranites se situerait ainsi directement dans la foulée de l'épisode majeur de fusion, et le refroidissement général du bâti suivrait immédiatement la mise en place du granite du Velay.

La perturbation au Permien supérieur correspondrait à un épisode hydrothermal. On sait que divers épisodes de minéralisation post-hercyniens, plus ou moins bien datés se sont succédé au sud du Massif central (Bril et al., 1994 ; Marignac et Cuney, 1999), ce qui montre qu'il a existé des épisodes de circulation de fluides chauds. L'examen attentif des données U-Pb sur monazite (Mougeot et al., 1997) montre qu'il y a effectivement une perturbation post-hercynienne des systèmes chronométriques : les 16 lots de monazites étudiées par ces auteurs sont tous fortement ou légèrement discordants, ce qui traduit une perte partielle de plomb radiogénique très inhabituelle pour ce minéral.

Ces résultats permettent de réinterpréter l'âge à 259 Ma obtenu par méthode K-Ar sur un microgranite identique au faciès Charron (Vitel et al., 1994). Cet âge correspondrait à une remise à zéro du chronomètre K-Ar lors de l'épisode hydrothermal Permien.

Nos données remettent également en cause les âges permiens obtenus par isochrones Rb-Sr sur les granites tardimigmatitiques, car on imagine mal qu'une activité magmatique soutenue persiste, après le refroidissement général du Velay, pendant plus de 20 Ma. Il est difficile également d'imaginer, dans un contexte général de refroidissement de la croûte, que ces granites tardimigmatitiques porphyroïdes à grain moyen se mettent en place après des microgranites de même composition chimique et minéralogique. On peut remarquer que les âges moyens obtenus à partir des populations globales de monazites (273 ± 7 , 277 ± 5 Ma), qui, rappelons-le, ne sont pas acceptables d'un point de vue statistique, coïncident avec les âges Rb-Sr sur roches totales obtenues sur les granites tardimigmatitiques. Il est possible que ces isochrones soient en fait des isochrones apparentes, perturbées par les épisodes hydrothermaux post-hercyniens du Massif central, dont l'influence pourrait s'étendre au-delà des zones minéralisées.

Remerciements

Nous tenons à remercier Patrick Ledru et Alain Cocherie pour leurs critiques perspicaces du manuscrit original et Philippe Rossi pour son travail éditorial.

Références

- Bambier A., Berger E.T., Mergoil J., Valadas B., Veyret Y., Weisbrod A. (1985) - Carte géologique de France (1/50 000), feuille de Burzet (840). BRGM, Orléans.
- Bertucat M. (1956) - Etude géologique du Haut Vivarais Occidental. D.G.P. Clermont-Ferrand, 47 p.
- Boulton J., Montel J.M., Pellier C. (2000) - Origine du grenat dans le microgranite du Montasset (Massif du Velay, France). *C.R. Acad. Sci. Paris*, **330**, 241-244.
- Bril H., Marignac C., Cathelineau M., Tolland F., Cuney M., Boiron M.C. (1994) - Metallogenesis of the French Massif Central : time-space relationships between ore deposition and tectono-magmatic events. In Keppie (ed) Pre-mesozoic geology in France and related areas. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 379-407.
- Caen-vachette M., Couturie J.P., Fernandez A. (1982) - Âges radiométriques des granites anatectiques et tardimigmatitiques du Velay (Massif central français). *C.R. Acad. Sci. Paris*, **294**, 135-138.
- Cantagrel J.M. (1973) - Signification des âges à l'argon déterminés sur les amphiboles dans les socles métamorphiques anciens. Application au Massif central français et à l'Aleskod, Sahara algérien. *Annales Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand*, **50**, 282 p.
- Cocherie A., Legendre O., Peucat J.J., Kouamelan A.N. (1998) - Geochronology of polygenetic monazites constrained by in-situ electron microprobe Th-U-total lead determination: implications for lead behaviour in monazite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **62**, 2475-2497.

- Cuney M., Friedrich M. (1987) - Physicochemical and crystal-chemical controls on accessory mineral paragenesis in granitoids: implications for uranium metallogenesis. *Bull. Mineral.*, **110**, 235-247.
- Dupraz J., Didier J. (1988) - Le complexe anatectique du Velay (Massif central français) : structure d'ensemble et évolution géologique. *Géol. Fr.*, **4**, 73-88.
- Feybesse J.L., Turland M., Nehlig P., Alsac C., Mercier-Batard F., Périchaud J.J., Vialaron C., Bayle des Hermens R. (de) (1998) - Carte géologique de France (1/50 000), feuille d'Yssingeaux (792), BRGM, Orléans.
- Gay M., Duthou J.L., Chenevoy M. (1992) - Âges isotopiques Rb-Sr des leucogranites du Nord-Vivarais (Massif central) et conséquences géodynamiques. *Géol. Fr.*, **2**, 3-7.
- Harrison T.M., Watson E.B. (1983) - Kinetics of zircon dissolution and zirconium diffusion in granitic melts of variable water content. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **84**, 66-72.
- Holtz F., Johannes W. (1994) - Maximum and minimum water contents of granitic melts, implications for chemical and physical properties of ascending magmas. *Lithos*, **32**, 149-159.
- Lagarde J.L., Dallain C., Ledru P., Courrioux G. (1994) - Strain pattern within the Variscan granite dome of Velay, French Massif Central. *J. Struct. Geol.*, **16**, 839-852.
- Lofgren G. (1971a) - Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, **76**, 5635-5648.
- Lofgren G. (1971b) - Experimentally produced devitrification textures in natural rhyolitic glass. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**, 111-124.
- Malavieille J., Guihot P., Costa S., Lardeaux J.M., Gardien V. (1990) - Collapse of the thickened Variscan crust in the French Massif Central: Mont Pilat extensional shear zone and St Etienne late Carboniferous basin. *Tectonophysics*, **177**, 139-149.
- Marignac C., Cuney M. (1999) - Ore deposits of the French Massif Central: insight into the metallogenesis of the Variscan collision belt. *Mineral. Deposita*, **34**, 472-504.
- Mc Arthur A.N., Cas R.A.F., Orton G.J. (1998) - Distribution and significance of crystalline, perlitic and vesicular textures in the Ordovician Garth Tuff (Wales). *Bull. Volcanol.*, **60**, 260-285.
- Montel J.M. (1993) - A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas. *Chem. Geol.*, **110**, 127-146.
- Montel J.M., Abdelghaffar R. (1993) - Les granites tardimigmatitiques du Velay (Massif central français) : principales caractéristiques pétrographiques et géochimiques. *Géol. Fr.*, **1**, 15-28.
- Montel J.M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. (1996) - Electron microprobe dating of monazite. *Chem. Geol.*, **131**, 37-53.
- Montel J.M., Kornprobst J., Vielzeuf D. (2000) - Shielding effect of garnet for the U-Th-Pb system in monazite: example from the Beni-Bousera kinzigites (Morocco). *J. Metam. Geol.*, **18**, 335-342.
- Montel J.M., Marignac C., Barbey P., Pichavant M. (1992) - Thermobarometry and granite genesis: the Hercynian low-P, high-T Velay anatetic dome (French Massif Central). *J. Metam. Geol.*, **10**, 1-15.
- Mougeot R., Respaut J.P., Ledru P., Marignac C. (1997) - U-Pb geochronology on accessory minerals of the Velay anatetic Dome (French Massif Central). *Eur. J. Mineral.*, **9**, 141-156.
- Sanitas C., Lapadu-Hargues P. (1958) - Les granites du Vivarais méridional. *Bull. Service carte Géol. Fr.*, **255**, 101-114.
- Vielzeuf D., Holloway J.R. (1988) - Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system. Consequence for crustal differentiation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **98**, 257-276.
- Vielzeuf D., Montel J.M. (1994) - Partial melting of Al-metagreywackes. Part I: fluid-absent melting experiments and phase relationships. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **117**, 375-393.
- Vitel G., Bandet Y., Gonord H. (1994) - Âge saxonien des rhyolites du Velay Central (Massif central). Implications tectoniques. *RST*, 1994, 66.
- Williamson B.J., Downes H., Thirwall M.F. (1992) - The relationships between crustal magmatic underplating and granite genesis: an example from the Velay granite complex, Massif Central, France. *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, **83**, 235-245.