

# Des xénolites à corindon dans une vaugnérite de l'Ardèche (Massif Central français) : implications pour le métamorphisme ardéchois

C.R. Acad. Sci. Paris,  
t. 321, série II a,  
p. 959 à 966,  
1995

Halima Ait Malek, Dominique Gasquet, Christian Marignac et Jean-Michel Bertrand

H. A. M., D. G., C. M. et J.-M. B. :  
CRPG-CNRS, BP n° 20,  
54501 Vandœuvre-lès-Nancy,  
France ;

D. G. : ENS Géologie,  
BP n° 452, 54001 Nancy Cedex,  
France ;  
Email: gasquet@crpg.cnrs-nancy.fr

C. M. : École des Mines,  
54042 Nancy Cedex, France.

**Résumé** Les xénolites du sill de vaugnérite de Loubaresse représentent des fragments de l'encaissant métapélitique, incorporés dans le magma, dont certains sont partiellement fondus et désilicifiés. La présence de corindon dans la paragenèse restitutive prouve que le magma vaugnéritique s'est mis en place avant la culmination du métamorphisme de basse pression M3 dont le caractère prograde est ainsi confirmé.

**Mots-clés** : Xénolites, Corindon, Vaugnérite, Métamorphisme BP-HT, Velay.

**Abstract** **Corundum-bearing xenoliths in Ardèche vaugnerite (French Massif Central): implications for the Late carboniferous metamorphism**

Xenoliths from the Loubaresse (Ardèche) vaugneritic sill are slivers of the metapelitic country rocks. Some of them are partially melted and experienced desilicification. Corundum that appears in the xenoliths is due to early emplacement of the mafic magma, before the LP-HT M3 metamorphic climax.

**Keywords**: Xenoliths, Corundum, Vaugnerite, LP-HT metamorphism, Velay.

**Abridged  
English  
Version**

## INTRODUCTION

THE southern part of the Velay dome is characterized by LP-HT metamorphism (Weisbrod, 1970; Marignac *et al.*, 1980; Laumonier *et al.*, 1991; Macaudière *et al.*, 1992). More precisely, two successive stages of metamorphism with associated anatexis and deformation were described by Montel *et al.* (1992). The conditions for the M3/D3 stage were:  $P \leq 500$  MPa and  $T \leq 700^\circ\text{C}$ , and for M4/D4:  $P \leq 550$  MPa and  $T \leq 830^\circ\text{C}$ . These events occurred during Late Carboniferous (Respaut *et al.*, 1994). Mafic plutonic rocks with lamprophyric affinities (the so-called vaugnerites) were emplaced during the M3/D3 event. They occur as swarms of sills between the Baume and Ardèche valleys.

This work focuses on corundum-bearing xenoliths contained in a vaugnerite sill, located near Loubaresse (D24 road). Country rocks are metapelitic micaschists with Bt + Sil

+ Pl  $\pm$  Kfs,  $\pm$  Gr,  $\pm$  Crd (mineralogical abbreviations from Kretz, 1983). They suffered a slight degree of melting during M3 anatexis. The 6-m thick vaugnerite sill (fig. 1) consists of two rock-types: a fine-grained foliated vaugnerite at the footwall, and a coarse-grained, more or less foliated, vaugnerite at the hanging wall. Veins and veinlets of pegmatite and leucogranite crosscut the foliation. Layered tabular xenoliths are found near the hanging wall. The schistosity of surrounding micaschists, the walls of the sill, the vaugnerite foliation and the xenolith layering are broadly parallel.

## PETROGRAPHY

### Vaugnerite

Coarse-grained vaugnerite consists of low-Al ferroan phlogopite (Fe# = 0.3), actinolitic Hbl, Pl (An 17-46), Kfs (Or 78-93), Qtz, apatite, allanite, zircon.

## Note

présentée par  
Zdenek Johan.

remise le 10 avril 1995,  
acceptée après révision  
le 12 septembre 1995.

### Xenoliths

Two types of xenoliths are present. Xe1 is a Qtz-Sil-Crd-Bt-Pl micaschist with subordinate Kfs, Hc (Zn-rich), Crn, Grt. Hc and Crn are included in centimetric sillimanite porphyroblasts. Xe2 are layered peraluminous gneissic rocks with alternating dark and light layers. Dark layers consist of Bt-Crn (fig. 2)-Sil-rare Fe-Ti oxides-sulphides (pyrrhotite, chalcopyrite, late pyrite). Biotite is aluminous and magnesian (Fe#: 0.5). Sillimanite is usually included in corundum. Light layers are composed of Pl (An 12-18)-perthitic Kfs (Or 77-82)-Bt-Qtz-Crd-xenomorphous Grt (Alm 73-76)-Sil (included in Kfs). Zircon is ubiquitous with an unusual hairpin-habitus. The dark layers are interpreted as melanosomes and the light layers as leucosomes. The scarcity of quartz is striking.

### GEOCHEMISTRY

Representative analyses are given in table. Vaugnerite chemistry is quite typical (Sabatier, 1984). Consideration of whole-rock chemistry (fig. 3) and REE patterns (fig. 4) indicate that the xenolith compositions are consistent with derivation from the surrounding metapelitic rocks. Compared to Xe1, Xe2 displays desilification and restitic features.

### DISCUSSION AND CONCLUSION

The corundum-bearing xenoliths (Xe2) are interpreted as partially melted rock slivers of the surrounding rocks incorporated in the

vaugneritic magma. The reaction  $Fe\text{-}Std = Crn + Als + Mgt$  is theoretically possible (Schreyer, 1976), but cannot be involved here, due to the lack of significant magnetite in the xenoliths. For the same reason, biotite destabilization (Montel, 1985) is not tenable. Therefore, corundum resulted from the quartz-absent reaction:  $Ms = Kfs + Als + Crn$  (Chatterjee and Johannes, 1974; Haselton *et al.*, 1995). The Xe2 could not be desilicated due to interaction with vaugneritic magma, unlike the metamorphosed emeries from the Cortland complex (Tracy and McLellan, 1985). Desilication is thought to result from early combination of the reaction:  $Qtz + Ms = Kfs + Als + w$  with melting in the Qtz-Kfs-Pl system, thus allowing early formation of a partial melt which could be extracted from the xenoliths. That such a process is not recorded in Xe1 is attributed to the reaction:  $Ms\ ss + Crd = Bt + Als + Qtz + w$ , which occurred in the M3 mesozone.

Muscovite is absent from the catazonal surrounding micaschists. However, the prograde character of the M3 metamorphism was demonstrated, with transition from andalusite to sillimanite stability fields (Weisbrod, 1969). Thus, it appears that the vaugnerite was emplaced prior to the M3 climax. From the petrological evolution of the xenoliths, a semi-quantitative estimation of the prograde P-T-t path is possible (fig. 5). Such a path is characteristic for orogens exhibiting "both crustal-thickening and erosion (thinning) of the mantle lithosphere" (Loosveld and Etheridge, 1990).

### INTRODUCTION

Les xérolites sont généralement rares dans les vaugnérites, magmas basiques à intermédiaires d'affinité lamprophyrique (Sabatier, 1991). Cependant, dans le Massif Central français, Sabatier (1984) décrit dans la vaugnérite incluse dans le granite de Largentière des xérolites très riches en corindon qu'il interprète comme d'anciens micaschistes et Montel (1985) signale dans les « dolérites » à affinité vaugnéritique du Peyron des xérolites à corindon interprétés comme issus d'un socle granulitique. La

découverte de xérolites dans une vaugnérite précoce de la région de Loubaresse est ici l'occasion d'étudier en détail les effets thermiques sur le matériel incorporé et ouvre des perspectives sur le métamorphisme prograde de la bordure sud du dôme du Velay.

Un métamorphisme de BP, accompagné de déformations et d'anatexie, caractérise cette bordure sud (Weisbrod, 1970 ; Marnagnac *et al.*, 1980 ; Laumonier *et al.*, 1991 ; Macaudière *et al.*, 1992). Plus précisément, deux phases successives de métamorphisme, accompagnées d'anatexie dans la catazone, ont été décrites par Montel *et al.* (1992). La

première, M3, culminant à  $P \leq 500$  MPa et  $T \leq 700^\circ\text{C}$ , débute avant le déclenchement de la tectonique D3, qu'elle accompagne ; la biotite est stable pendant cet épisode ; la deuxième, M4, culminant à  $P \leq 550$  MPa et  $T \leq 830^\circ\text{C}$  est synchrone de la mise en place du granite du Velay. Ces phénomènes sont datés du Carbonifère supérieur (Respaut *et al.*, 1994).

Un important épisode de mise en place de vaugnérites accompagne le métamorphisme M3 et la déformation D3 (Weisbrod *et al.*, 1980). Sur une trentaine de kilomètres du Nord au Sud, entre les vallées de la Baume et de l'Ardèche, un vaste complexe de sills vaugnéritiques caractérise cet épisode. Les xénolites étudiés dans ce travail proviennent d'un sill de vaugnérite situé près de la frontière entre la mésozone et la catazone.

## CADRE GÉOLOGIQUE

Près de Loubaresse (Ardèche), sur la D24, un bord de route, récemment décapé, donne une bonne coupe d'un sill de vaugnérite contenant des xénolites à corindon, dans un encaissant de gneiss métapélitiques catazonaux (à quartz, biotite, sillimanite, plagioclase, cordiérite et plus rarement : orthose, grenat) appartenant à la série cévenole (Marignac *et al.*, 1980). A quelques dizaines de mètres au-dessus du sill, les métapélites, montrant un début d'anatexie, sont en contact avec une puissante masse d'ortho-gneiss œillés de la série ardéchoise.

Le sill (**fig. 1**), d'une puissance de 6 m, est constitué de deux faciès : un faciès à grain fin, au mur apparent, et un faciès à gros grain, au toit. Une foliation magmatique, parallèle à la schistosité de l'encaissant, particulièrement développée dans le

faciès fin, plus discrète au toit, est absente du centre très grenu du dispositif. Cette foliation est recoupée par un lacs de filons et filonnets constitués (i) de pegmatites à apatite et (ii) de leucogranites plus ou moins foliés, recoupant les précédents. De rares veinules à quartz-tourmaline recoupent l'ensemble. Dans l'encaissant, au toit apparent du sill sur une dizaine de mètres, des filons de leucogranites, de quelques centimètres à 20 ou 30 cm d'épaisseur et semblables à (ii), sont injectés dans la schistosité. Des xénolites, au nombre d'une dizaine, sont présents à proximité du toit. Ils sont de forme le plus souvent tabulaire, de longueur et d'épaisseur variables, depuis 10 cm jusqu'à 3 à 4 m de long, pour 15 à 40 cm d'épaisseur. Certains sont remarquables par leur couleur gris clair et leur structure rubanée, parallèlement à leur allongement et à la foliation de la vaugnérite encaissante.

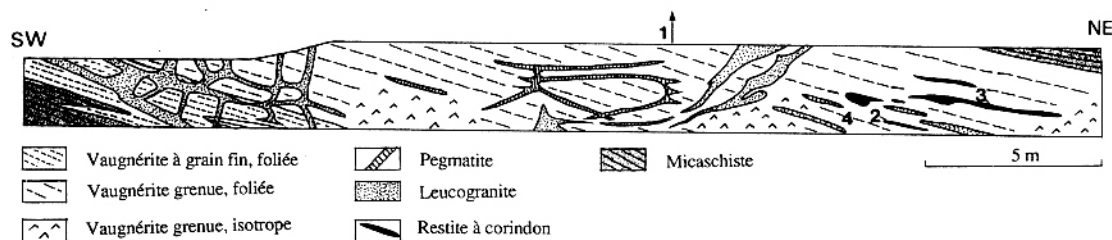
## PÉTROGRAPHIE ET MINÉRALOGIE

### Les xénolites

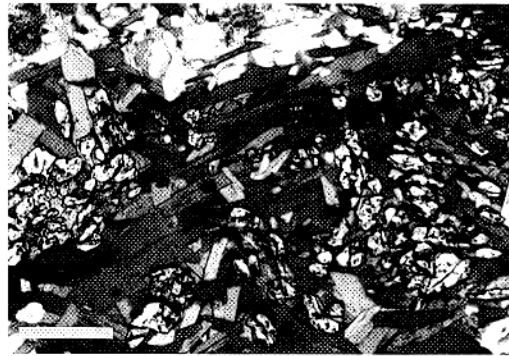
Deux types de xénolites ont été identifiés dans le sill (les abréviations minéralogiques sont conformes à Kretz, 1983).

Le premier type (Xé1) correspond à un micaschiste à quartz, sillimanite, cordiérite, biotite, plagioclase et rares feldspath potassique, spinelle, corindon, grenat. La cordiérite, entièrement pinitisée, forme des amas lenticulaires dans la schistosité, soulignée par la biotite intimement associée à de la sillimanite fibreuse. Cette schistosité enveloppe de grandes sillimanites centimétriques, dans lesquelles sont incluses biotite et sillimanite fibreuse. Le grenat xénomorphe (Alm73-76, Prp9, Sps12-15, Grs2-3) a une allure résiduelle dans la schistosité. Le

**Fig. 1** Coupe schématique du sill de vaugnérite de Loubaresse. Les numéros renvoient aux échantillons du tableau. 1 : HA 94-3, 2 : HA 94-4, 3 : DG 93-26, 4 : DG 93-27.



**Fig. 2** Association corindon-biotite dans un lit sombre d'un xénolite de type Xé2. Barre d'échelle : 0,5 mm.



Corundum-biotite assemblage in a dark layer of a Xe2 xenolith. Scale bar: 0.5 mm.

spinelle, zincifère (Hc74, Ga15, Spl11), est en inclusions exceptionnelles dans les grandes sillimanites où l'on trouve également de très rares corindons en petits grains. Le plagioclase des lits quartzo-feldspathiques est séricitisé. En revanche, un pla-

gioclase limpide (An 20) forme des plages interstitielles dans les clivages des grandes sillimanites.

Le deuxième type (Xé2) correspond aux roches rubanées et présente l'association : biotite, sillimanite prismatique, corindon, feldspath potassique, plagioclase, quartz. Le rubanement est formé par l'alternance de lits centimétriques alternativement sombres et clairs.

Les lits sombres, les plus épais et à grain plus fin (1 à 2 mm), contiennent par ordre d'abondance : biotite automorphe, atteignant 2 mm, marquant la foliation, alumineuse, modérément magnésienne (Fe/Fe+Mg : 0,5) ; corindon, en granules de 0,2 à 1 mm, abondants, inclus dans les biotites ou isolés (**fig. 2**) ; sillimanite prismatique, en petites inclusions dans les corindons ; rares oxydes de fer-titane, plus ou moins pyritisés ; sulfures (pyrrhotite et chalcopirite).

Les lits clairs, surtout feldspathiques et à grain plus grossier (3 à 5 mm), contiennent par ordre d'abondance : oligoclase (An 12-18) altéré en mica blanc et quartz ; grandes (2 à 5 mm) orthoses à perthites flammées (Or 77-82, Ab 18-23) ; biotite dessinant la foliation ; rare quartz interstitiel ; cordiérite pinitisée ; sillimanite en inclusion dans les feldspaths alcalins.

Les deux types de lits contiennent, en outre, des zircons à morphologie très particulière (formes de trombones ou d'épingles à cheveux) en inclusions dans les feldspaths ou les biotites et, plus rarement, de l'apatite.

### La vaugnérite

La vaugnérite encaissante à gros grain (jusqu'à 5 mm) contient : phlogopite ferri-fère (Fe/Fe+Mg : 0,3) et peu alumineuse, amphibole subautomorphe (actinote à hornblende actinolitique), plagioclase xénomorphe à automorphe (An 17-46) ; feldspath alcalin (Or 78-93, Ab 6-22), souvent perthitique et interstitiel ; quartz interstitiel ; apatite, en inclusion dans toutes les phases minérales ; leucoxène dans les clivages des micas ; allanite ; zircons en petits cristaux (100 à 200 µm) inclus dans la phlogopite.

**Tableau** Analyses chimiques représentatives du gneiss encaissant, des deux types de xénolites et de la vaugnérite. Les échantillons sont localisés sur la figure 1.

Selected analyses of the surrounding gneiss, the two types of xenoliths and the vaugnérite. Samples are located in figure 1.

Roche N°	Encaissant HA.94-3	Xé1 HA.94-4	Xé2 DG.93-26	Vaugnérite DG.93-27
SiO <sub>2</sub> .....	61,61	49,54	42,52	55,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	17,24	23,86	27,74	14,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	6,57	9,28	11,44	7,20
MnO .....	0,10	0,11	0,22	0,09
MgO .....	2,51	2,09	4,39	7,69
CaO .....	0,84	0,22	1,09	4,20
Na <sub>2</sub> O .....	2,54	0,45	2,96	3,01
K <sub>2</sub> O .....	4,10	6,66	6,14	4,10
TiO <sub>2</sub> .....	0,78	1,19	1,02	1,42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	0,19	0,17	0,18	0,56
PF .....	3,06	6,18	2,05	1,37
TOTAL .....	99,54	99,75	99,75	99,55
Ba .....	564	442	503	1239
Be .....	13,9	5,18	4,16	2,63
Co .....	17,3	18,1	31,1	28,5
Cr .....	88,7	120	192	418
Cu .....	39,9	29,1	29,1	41,6
Nb .....	16,1	20,4	14,9	25,1
Ni .....	33,3	33,4	85,1	202
Rb .....	257	492	224	164
Sc .....	9,1	13,3	12	11,8
Sr .....	150	36,2	155	488
V .....	111	131	207	108
Y .....	32,4	40	25,7	20,9
Zn .....	109	127	179	88,2

## GÉOCHIMIE

Des analyses représentatives de l'encaissant métapélitique (prélevé au toit de l'intrusion), des deux types de xénolites et de la vaugnérinite de l'intrusion sont données dans le tableau.

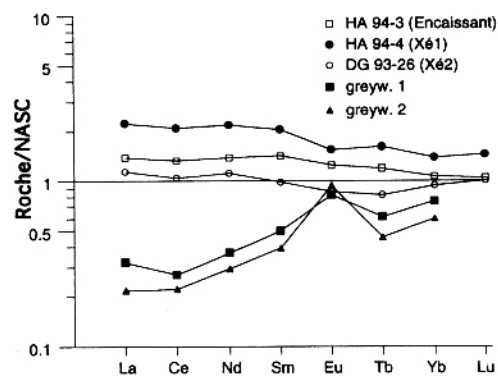
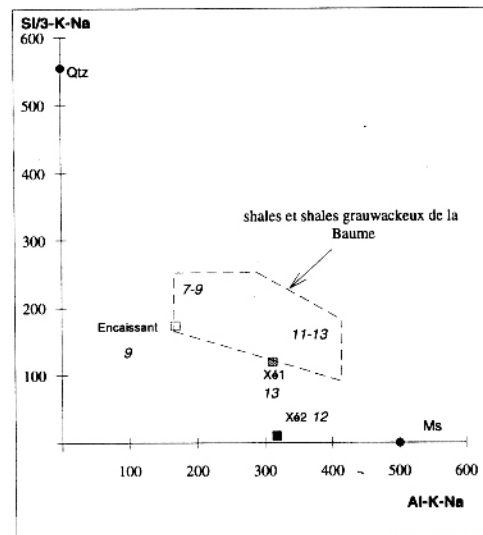
La composition de la vaugnérinite est typique de cette classe de roche (Sabatier, 1980). Le spectre des terres rares est celui de roches magmatiques alcalines (richesse en terres rares, enrichissement en terres rares légères, très faible anomalie négative en Eu).

La composition des xénolites est sensiblement différente de celle de l'échantillon d'encaissant. Cependant, Xé1 et cet échantillon se projettent dans le champ des métashales de la série cévenole dans le diagramme Si/3-K-Na vs Al-K-Na (fig. 3), bien adapté à l'étude des métasédiments détritiques (Deschamps, 1980). Dans le même diagramme, Xé2 apparaît comme un échantillon désilicifié de la même série. Malgré ses teneurs élevées en  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  et MgO, Xé2 ne peut, en effet, être considéré comme une grauwaque pauvre en quartz : son spectre de terres rares est celui d'un métashale par ailleurs voisin de Xé1 et de l'encaissant (fig. 4). L'homogénéité des teneurs en scandium de ces différentes roches va également dans ce sens (fig. 3). Au total, la composition chimique du xénolite Xé2 s'apparente à celle d'une restite peralumineuse.

## DISCUSSION ET CONCLUSION

### Origine des xénolites

Le mode de gisement des xénolites, en panneaux parallèles à la foliation de la vaugnérinite et de l'encaissant, suggère qu'ils représentent des fragments de cet encaissant incorporés dans le magma lors de la mise en place du sill. Cette interprétation est cohérente avec la composition des xénolites. L'hypothèse d'une origine profonde se heurte d'autre part à une objection mécanique : les dimensions des xénolites sont telles que leur ascension sur une grande hauteur n'est pas concevable ; elles posent, par ailleurs, le problème de leur passage dans le conduit d'ac-



**Fig. 3** Diagramme Si/3-K-Na vs Al-K-Na. Ont été reportés les analyses des xénolites et de l'encaissant tirées du tableau et le champ des roches de la série cévenole (analyses Marignac non publiées). Les nombres en italiques représentent les teneurs en Sc (ppm).

Si/3-K-Na vs Al-K-Na diagram for the xenoliths and the country rocks from table. The compositional field of Cevennes metasediments is given for reference. The italic numbers are Sc content (ppm).

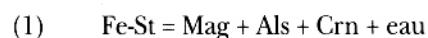
**Fig. 4** Profils de terres rares normalisés au « North American Shale Composite » de Taylor et McLennan, 1985 pour les xénolites Xé1 (HA 94-4), Xé2 (DG-93-26) et le gneiss encaissant (HA 94-3). Deux grauwaques pauvres en Qtz (greyw. 1 et 2), également tirées de Taylor et McLennan, sont données pour comparaison.

Rare earth element patterns, normalized to the Taylor and McLennan's (1985) North American Shale Composite, for Xé1, Xé2, the surrounding gneiss and two quartz-poor greywackes from Taylor et McLennan (1985).

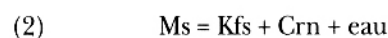
cès au sill (rien dans la géologie régionale ne permettant d'envisager des cheminées d'un diamètre suffisant). Enfin, l'absence de paragenèse précoce de haute pression différencie radicalement les xénolites étudiés des enclaves granulitiques décrites par Montel (1985) et Montel *et al.* (1986) dans la diorite du Peyron.

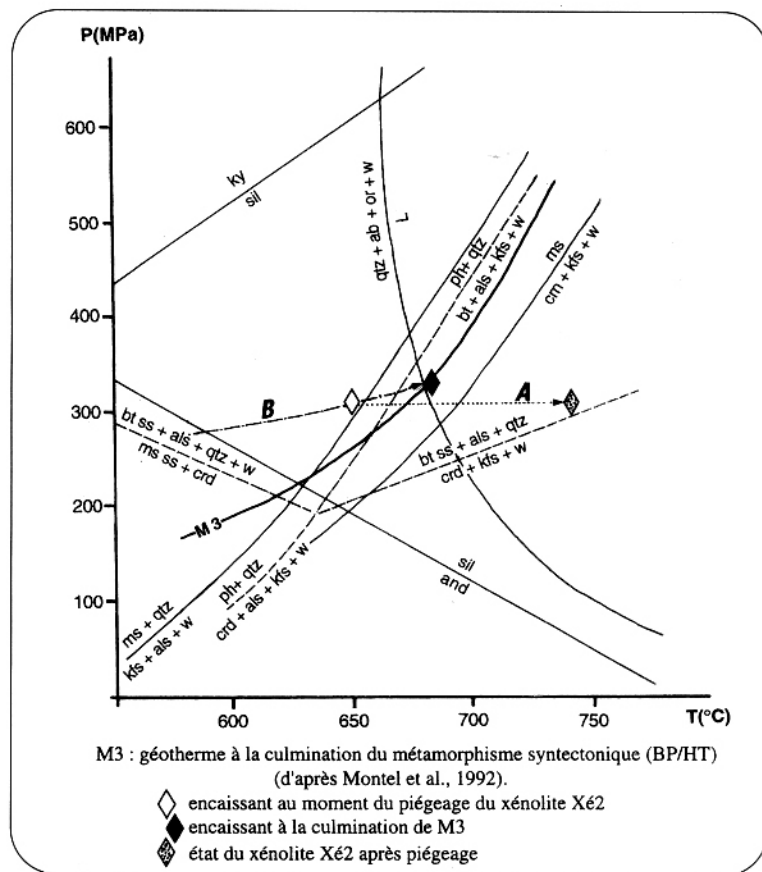
### Origine du corindon

La présence du corindon parmi les minéraux restitiques de Xé2 peut être expliquée par la déstabilisation soit de la staurotide selon la réaction :



(Schreyer, 1976) ; soit de la muscovite selon la réaction :





**Fig. 5** Diagramme P-T-t montrant d'une part l'évolution de Xé2 à partir de son incorporation dans le magma vaugnéritique (chemin A) et, d'autre part, le chemin prograde de M3 (B). Position du point triple des silicates d'alumine de Holdaway (1971) ; courbes de déstabilisation de la muscovite : Haselton *et al.* (1995) ; stabilité de l'association Bt + Als + Qtz et de Ms ss + Qtz : courbes indicatives d'après Montel *et al.* (1992) et Vielzeuf et Holloway (1988). La position de Xé2 au moment de son piégeage et le tracé du chemin B ne sont qu'approximativement estimés (voir texte).

P-T-t diagram showing the evolution of Xé2 since its incorporation into the vaugnéritic magma (A) and the prograde M3 path (B). The position of Xé2 at the time of the inclusion and the B path are only roughly estimated (see text).

(Chatterjee et Johannes, 1974 ; Haselton *et al.*, 1995). L'absence de magnétite interdit d'envisager la déstabilisation d'une staurotite. De façon générale, l'absence d'une phase purement ferro-magnésienne associée au corindon interdit d'en rechercher l'origine dans la déstabilisation d'un minéral alumineux et ferromagnésien comme par exemple la biotite invoquée par Montel (1985) pour le corindon des enclaves de la diorite du Peyron. Par conséquent, l'existence du corindon implique que les roches incorporées dans le magma aient contenu de la muscovite. Dans les xénolites Xé2, la surchauffe, provoquée par l'immersion dans le magma vaugnéritique, aurait permis le franchissement de la réaction (2).

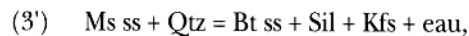
### Désilicification de Xé2

Le magma vaugnéritique étant sursaturé en silice, on ne peut ici envisager un méca-

nisme de désilicification sous l'influence du magma basique comme dans le cas des émeris métamorphisés dans le complexe de Cortland (Tracy et McLellan, 1985). La solution proposée consiste à admettre, d'une part, que le protolite de Xé2 ait été relativement pauvre en quartz (comme Xé1, **fig. 3**) et, d'autre part, que la réaction :



ou :



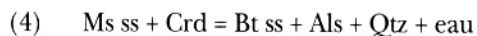
Vielzeuf et Holloway, 1988) ait eu lieu quoique sa cinétique soit lente (Evans, 1965). Dans ces conditions, il y aurait eu production de liquide de fusion partielle dans le système Qtz-Ab-Or-An en présence de l'eau issue de (3) ou (3'). L'expulsion de ce liquide précoce (par exemple en liaison avec l'aplatissement synmagmatique subi par la vaugnérite encaissante) expliquerait alors la pauvreté en quartz de Xé2 ainsi que son caractère restitique.

### Signification des lits feldspathiques de Xé2

L'alternance de lits aluino-ferro-magnésiens et de lits feldspathiques évoque une structure migmatitique en leucosome/mélanosome. Il est proposé ici que le Kfs issu de la réaction (2) et le plagioclase en excès aient fondu en présence de l'eau produite par la même réaction.

### Le cas de Xé1

La rareté du corindon et l'absence de fusion partielle dans Xé1 trouvent une explication facile, si l'on admet que la roche incorporée dans le magma ne contenait pas de phengite. Ceci est possible en faisant appel à la réaction :

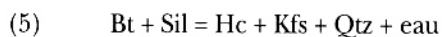


(Vielzeuf et Holloway, 1988), avec cordiérite en excès ; cette réaction s'observe en effet dans la mésozone du métamorphisme M3. La présence de cordiérite en abondance dans Xé1 est en faveur de cette hypothèse, de même que son absence dans Xé2, où la

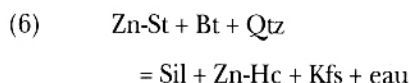


réaction (4) aurait, au contraire, eu lieu avec phengite (Ms ss) en excès.

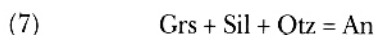
Les seules traces de la surchauffe subie par Xél sont : (i) la formation de spinelle zincifère soit par la réaction :



(Montel *et al.*, 1986) (Kfs quartz et eau participant dans ce cas à une fusion partielle limitée dont le liquide aurait été expulsé) ; soit par la réaction :



(Stoddard, 1979) ; (ii) la formation du plagioclase limpide correspondant vraisemblablement à la réaction :



(Koziol et Newton, 1988) ; (iii) la formation des grandes sillimanites, résultat probable de la pseudomorphose d'anciens porphyroblastes d'andalousite.

### Implications pour le métamorphisme ardéchois

La présence initiale de la muscovite dans les xénolites semble en contradiction avec le caractère catazonal des gneiss encaissants. Cette contradiction peut être levée ; en effet, l'étude détaillée de la mésozone ardéchoise montre que le métamorphisme M3 y est prograde : une première association à andalousite-biotite, précoce par rapport à D3, est

remplacée par une association à biotite-sillimanite fibreuse syn-D3 (Weisbrod, 1969). Il est donc possible de conclure que le magma vaugnéritique ait incorporé ces xénolites avant la culmination de M3. Dans ce cas, la position des xénolites dans le diagramme P-T avant leur incorporation dans le magma serait fixée avec une certaine précision, d'après la discussion qui précède, par la condition d'avoir franchi dans l'ordre : la réaction (3) ou (3'), l'anatexie dans le système quartz-feldspaths et la réaction (2). Par ailleurs, il est possible d'estimer les conditions P/T à la culmination de M3 d'après les données de Montel *et al.* (1992), en remarquant que l'encaissant n'a subi qu'une fusion partielle extrêmement limitée (660°C-320 MPa). La figure 5 résume cette discussion en indiquant de façon semi-quantitative le chemin P-T-t prograde de M3. Il convient de remarquer qu'à ce niveau de la croûte, la transition M3-M4, d'après les données de Montel *et al.* (1992), s'est traduite par une chute de pression et un faible réchauffement ; la biotite étant restée stable, aucune fusion partielle n'a accompagné M4. Le chemin prograde de M3 est caractéristique des métamorphismes de basse pression liés à un épaissement crustal conjugué avec un amincissement (ou une délamination) de la lithosphère (Loosveld et Etheridge, 1990), en accord avec le style de la déformation D3 (Macaudière *et al.*, 1992) et le synchronisme de la mise en place de magmas vaugnéritiques avec le développement de l'anomalie thermique.

**Remerciements** : Les auteurs remercient R. Capdevila dont les critiques constructives ont permis d'améliorer considérablement une première version de ce texte.

CHATTERJEE, N. D. et JOHANNES, W., 1974. Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic 2M-muscovite, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 48, p. 89-114.

DESCHAMPS, Y., 1980. Contribution à l'étude des gisements à pyrite-hématite de Rio Marina (Ile d'Elbe, Italie). Approche pétrographique, géochimique et structurale, *Thèse Doctorat 3<sup>e</sup> cycle*, Univ. Lyon, 491 p., déposée à la Soc. géol. France.

EVANS, B. W., 1965. Application of a reaction-rate method to the breakdown equilibrium of muscovite

and muscovite plus quartz, *Amer. J. Sci.*, 263, p. 647-667.

HASELTON, H. T., Jr, CYGAN, G. L. et JENKINS, D. M., 1995. Experimental study of muscovite stability in pure H<sub>2</sub>O and 1 molal KCl-HCl solutions, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, p. 429-442.

HOLDAWAY, M. J., 1971. Stability of andalusite and the aluminium silicate phase diagrams, *Amer. J. Sci.*, 271, p. 97-131.

KOZIOL, A. M. et NEWTON, R. C., 1988. Redetermination of the anorthite breakdown

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- reaction, an improvement of the plagioclase-garnet- $Al_2SiO_5$ -quartz geobarometer, *Amer. Mineral.*, 73, p. 216-223.
- KRETZ, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals, *Amer. Mineral.*, 68, p. 277-279.
- LAUMONIER, B., MARIGNAC, C., CHEILLETZ, A. et MACAUDIÈRE, J., 1991. Relations entre tectoniques superposées, migmatisations et mise en place des granites sur l'exemple de la bordure sud du dôme du Velay (région de Laviolle, Ardèche, France), *C. R. Acad. Sci. Paris*, 313, série II, p. 937-944.
- LOOSVELD, R. J. H. et ETHERIDGE, M. A., 1990. A model for low-pressure facies metamorphism during crustal thickening, *J. metam. Geol.*, 8, p. 257-267.
- MACAUDIÈRE, J., BARBEY, P., JABBORI, J. et MARIGNAC, C., 1992. Le stade initial de fusion dans le développement des dômes anatectiques : le dôme du Velay (Massif Central français), *C. R. Acad. Sci. Paris*, 315, série II, p. 1761-1767.
- MARIGNAC, C., LEROY, J., MACAUDIÈRE, J., PICHAVANT, M. et WEISBROD, A., 1980. Évolution tectonométamorphique d'un segment de l'orogène hercynien : les Cévennes médianes, Massif Central français, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 291, série D, p. 605-608.
- MONTEL, J. M., 1985. Xénolithes peralumineux dans les dolérites du Peyron, Velay (Massif Central, France). Indications sur l'évolution de la croûte profonde tardihercynienne, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 301, série II, p. 615-620.
- MONTEL, J. M., MARIGNAC, C., BARBEY, P. et PICHAVANT, M., 1992. Thermobarometry and granite genesis: the Hercynian low-P, high-T Velay anatectic dome (French Massif Central), *J. metam. Geol.*, 10, p. 1-15.
- MONTEL, J. M., WEBER, C. et PICHAVANT, M., 1986. Biotite-sillimanite-spinelle assemblages in high-grade metamorphic rocks: occurrences, chemographic analysis and thermobarometric interests, *Bull. Minéral.*, 109, p. 555-573.
- RESPAUT, J. P., MOUGEOT, R., LEDRU, P. et MARIGNAC, C., 1994. Géochronologie U-Pb sur minéraux accessoires, applications à la bordure sud du Velay (MCF), *15<sup>e</sup> Réunion. Sci. Terre*, Nancy, p. 99. Livre en dépôt à la Soc. géol. France.
- SABATIER, H., 1980. Vaugnérites et granites : une association particulière de roches grenues acides et basiques, *Bull. Minéral.*, 103, p. 507-522.
- SABATIER, H., 1984. Vaugnérites et granites magnésiens dans le Massif Central français : une association particulière de roches grenues acides et basiques, *Thèse Sc.*, Univ. P.M. Curie, 556 p.
- SABATIER, H., 1991. Vaugnerites: special lamprophyre-derived mafic enclaves in some Hercynian granites from Western and Central Europe, In: DIDIER, J. et BARBARIN, B., éd., *Enclaves and granite petrology*, Elsevier, Amsterdam, p. 63-81.
- SCHREYER, W., 1976. Experimental metamorphic petrology at low pressures and high temperatures, In: BAILEY, D. K. et MACDONALD, R., éd., *The evolution of the crystalline rocks*, Academic Press, London, p. 261-331.
- STODDARD, E. F., 1979. Zinc-rich hercynite in high-grade metamorphic rocks: a product of the dehydration of staurolite, *Amer. Mineral.*, 64, p. 736-741.
- TAYLOR, S. R. et McLENNAN, S. M., 1985. *The continental crust: its composition and evolution*, Blackwell, 312 p.
- TRACY, R. et McLELLAN, E. L., 1985. A natural example of the kinetic controls of compositional and textural equilibration In: THOMPSON, A. B. et RUBIE, D. C., éd., *Metamorphic reactions*, Springer Verlag, New York, p. 118-137.
- VIELZEUF, D. et HOLLOWAY, J. R., 1988. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system. Consequences for crustal differentiation, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98, p. 257-276.
- WEISBROD, A., 1969. Explication sommaire de la carte géologique des Cévennes médianes, *Sciences de la Terre*, Nancy, 12-4, p. 1-301.
- WEISBROD, A., 1970. Pétrologie du socle métamorphique des Cévennes Médianes (Massif Central français), *Thèse Doctorat d'État*, Univ. Nancy, 530 p.
- WEISBROD, A., PICHAVANT, M., MARIGNAC, C., MACAUDIÈRE, J. et LEROY, J., 1980. Relations structurales et chronologiques entre le magmatisme basique, les granitisations et l'évolution tectonométamorphique tardihercynienne dans les Cévennes médianes, Massif Central français, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 291, série D, p. 665-668.