

Affinité alcaline des metabasites des séries périphériques du domaine granito-migmatitique du Velay *

*Alkaline affinity of the metabasites in the gneissic series
surrounding the Velay migmatitic domain*

Bernard BRIAND ⁽¹⁾, Jean-Luc BOUCHARDON ⁽²⁾, Danielle SANTALLIER ⁽¹⁾,
Michel PIBOULE ⁽³⁾, Houssa OUALI ⁽¹⁾ et Paul CAPIEZ ⁽¹⁾

Mots-clés : Métabasite, Composition alcaline, Analyse majeurs, Analyse éléments-traces, Terres rares, Formation rift, Cambrien, Ordovicien.
Massif central, Velay.

Résumé

Les metabasites des bordures méridionale, orientale et septentrionale du domaine granito-migmatitique du Velay appartiennent à la nappe dite de l'« unité inférieure des gneiss » dans la pile litho-tectonique du Massif central français. Leurs caractéristiques géochimiques (teneurs en éléments fortement chargés, éléments de transition, Th et Terres Rares) permettent de les rapporter à d'anciens basaltes alcalins. L'association étroite des metabasites avec d'anciens sédiments greywackeux conduit à envisager une mise en place des protolithes dans un environnement intra-continental. En conséquence, au Paléozoïque inférieur, l'« unité inférieure des gneiss » représentait vraisemblablement une marge inactive, témoin du processus de rifting intra-continental précurseur de la distension cambro-ordovicienne.

Abstract

The French Massif Central litho-tectonic pile is composed of five different nappes. In this paper, we deal with the metabasites intercalated in the so-called "Lower Allochthon" or "Lower Gneissic Unit". These metabasites outcrop on the eastern and northern borders of the Velay migmatitic and granitic domain. The geochemical characteristics of the studied rocks (LIL elements, transition elements, Th and Rare Earth Elements contents) show that, prior to the metamorphism, they constituted a suite of alkaline basalts. Because of their systematic association with greywackeous metasediments, the metabasites are interpreted as originally emplaced into intra-continental sites. Consequently, during the Lower Paleozoic, the "Lower Gneissic Unit" was probably a passive margin. Such a rifting process occurred prior to the generalized cambro-ordovician distensive event which affected the whole future Variscan domain.

Cadre géologique

Les ensembles cristallophylliens constituant les bordures septentrionales orientales et méridionales du domaine granito-magmatique du Velay font partie intégrante de la nappe de l'« unité inférieure des gneiss » (Ledru *et al.*, 1989) (fig. 1). Cette unité est largement développée au nord (feuille Saint-Étienne) et surtout

au sud et à l'est de ce domaine (feuilles Annonay, Burzet, Lamastre, Largentière, Saint-Agrève...). Elle est caractérisée dans ce secteur du Massif central par la présence d'un puissant ensemble quartzo-feldspathique méso- à catazonal, de degré de migmatisation très variable et de nature essentiellement métavolcanique ou métagranitique (Weisbrod, 1970 a ; Lochon, 1985 ; Ouali, 1990). La partie supérieure de cet horizon est soulignée par un niveau d'extension régionale de 50 à 300 m de puissance, de gneiss greywackeux à intercala-

* Manuscrit reçu le 20 septembre 1991, accepté le 18 septembre 1992.

(1) Université Lyon 1, CST, 27/43, boulevard 11-Novembre, 69622 Villeurbanne cedex.

(2) École des mines de Saint-Étienne, 158 bis, cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne cedex.

(3) Université Grenoble 1, institut Dolomieu, rue Marcel-Gignoux, 38031 Grenoble cedex.

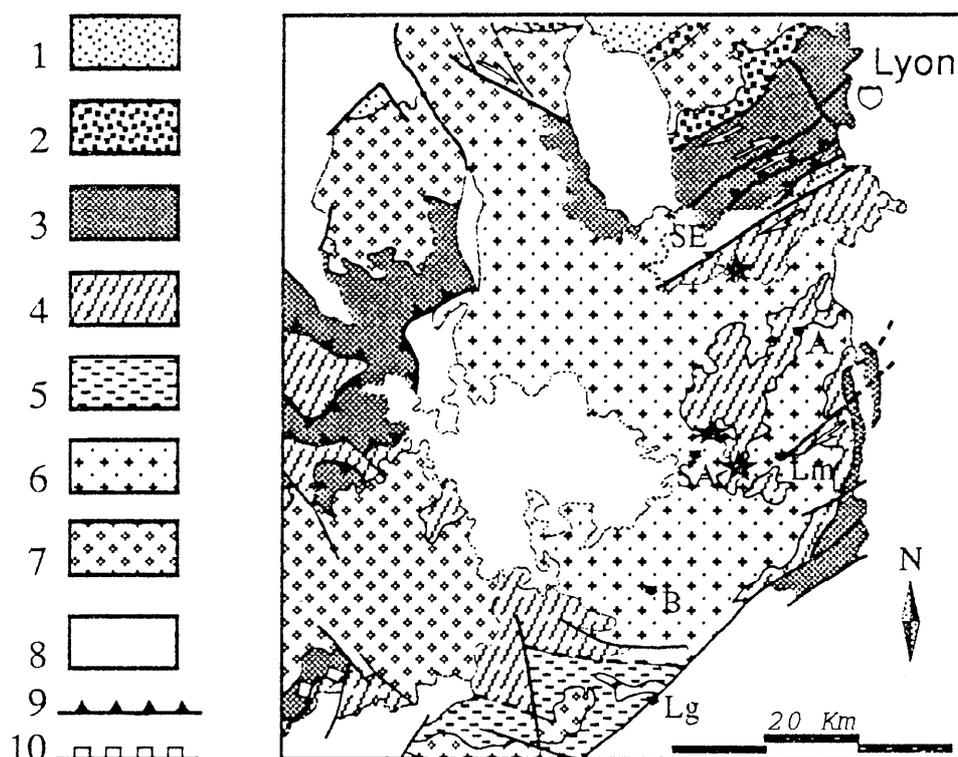


Fig. 1. - Le domaine granito-migmatitique du Velay. Situation des échantillons étudiés. Le fond géologique est issu de la carte des nappes dans le Massif central français (Ledru *et al.*, 1989).

1 - Dépôts viséens. 2 - Unité épizonale. 3 - Unité supérieure des gneiss. 4 - Unité inférieure des gneiss. 5 - Autochtone relatif. 6 - Granites et migmatites du Velay. 7 - Autres granites. 8 - Roches volcaniques et sédimentaires. 9 - Chevauchements dévoniens. 10 - Chevauchements carbonifère inférieur.

Étoiles : localisation des échantillons étudiés.

A : Annonay, B : Burzet, Lg : Largentière, Lm : Lamastre, SA : Saint-Agrève, SE : Saint-Étienne.

Fig. 1. - Velay granito-migmatitic domain. Location of the studied samples. The geological background is derived from the structural map of the French Massif Central by Ledru *et al.* (1989).

1 - Visean deposits. 2 - Epizonal Unit. 3 - Upper Gneissic Unit. 4 - Lower Gneissic Unit. 5 - Relative Autochthon. 6 - Velay granites and associated migmatites. 7 - Other granites. 8 - Volcanics and sedimentary rocks. 9 - Devonian thrusts. 10 - Lower Carboniferous thrusts.

Stars: location of the studied samples.

A: Annonay. B: Burzet. Lg: Largentière. Lm: Lamastre. SA: Saint-Agrève. SE: Saint-Etienne.

tions de bancs, lentilles ou petits massifs circonscrits (Chenevoy *et al.*, 1970, 1979, sous presse ; Weisbrod *et al.*, 1974, 1985 ; Lochon, 1985 ; Masméjean, 1987), constitués d'une étroite association de pyroxénites, amphibolites rubanées, amphibolo-pyroxénites, amphibolites feldspathiques et amphibolites feldspathiques massives.

Caractéristiques pétrographiques

Les amphibolites feldspathiques sont le plus souvent des roches finement litées, présentant une alternance millimétrique de lits amphiboliques et de lits plagioclasiques : les termes massifs, en lentilles indépendantes ou intercalées dans les amphibolites litées, demeurent subordonnés (Youssif, 1980). Les textures sont le plus souvent granulaires, parfois porphyroblastiques. Des textures gabbroïques relictuelles ont été localement observées dans les termes massifs (Chenevoy *et al.*, 1970 ; Youssif, 1980 ; Lochon, 1985). Les deux types de roches présentent les mêmes caractéristiques minéralogiques. L'amphibole est une hornblende édenitique ou magnésio-hastingsitique de rapport $Mg/(Mg + Fe)$ 0,6 à 0,25. Elle se présente en cristaux millimétriques d'habitus très variés ne corres-

pondant qu'à des différences mineures de composition. Elle peut présenter de fines ponctuations de magnétite ou de discrètes inclusions quartzeuses attestant du remplacement d'une olivine ou d'un pyroxène magmatique (Piboule, 1979), ceci en particulier dans les amphibolites massives. Le plagioclase, de basicité variable d'un échantillon à l'autre (An 30-55), apparaît le plus souvent en cristaux millimétriques sub-automorphes, parfois groupés en amas centimétriques ; localement s'individualisent de discrètes lattes millimétriques polycristallines évoquant une ancienne texture doléritique. Le clinopyroxène se présente en rares mégacristaux plurimillimétriques xénomorphes et poecilites, schillerisés et fréquemment amphibolitisés ou, le plus souvent, en petits cristaux sub-automorphes, dispersés dans la trame amphibolique ou groupés au sein des lits plagioclasiques. La composition, indépendante de l'habitus, est celle d'une salite plus ou moins ferreuse. La biotite, parfois légèrement chloritisée, est souvent présente en quantité variable, en cristaux millimétriques xénomorphes à sub-automorphes dispersés ou regroupés en amas, et se développe localement aux dépens de l'amphibole. Elle demeure rare dans les échantillons sélectionnés. Le quartz est souvent présent mais toujours peu abondant. L'épidote est fréquente, de même que le sphène, l'apatite et les minéraux opaques, en inclusions dans les divers minéraux précédents.

Caractéristiques géochimiques

Les études préliminaires ont permis de rapporter les amphibolites feldspathiques à des basaltes alcalins à transitionnels (Youssif, 1980 ; Chenevoy *et al.*, 1986) et les divers matériaux rubanés à d'anciens tufs volcaniques remaniés ou à des matériaux mixtes d'origine volcano-sédimentaire (Weisbrod, 1970 a ; Youssif, 1980).

Les échantillons, homogènes et exempts de traces de mylonitisation, ont été prélevés au cœur des lentilles ou bancs d'amphibolites afin de limiter les effets d'une possible contamination par l'encaissant lors de la mise en place du protolithe basique (Stoch et Lugmair,

1990) ou lors de l'évolution tectono-métamorphique ultérieure (Dostal *et al.*, 1980 ; Von Raumer *et al.*, 1990). Les échantillons considérés ici (tabl. I) sont extraits d'une population d'une cinquantaine d'individus représentatifs de l'ensemble des matériaux basiques prélevés sur le territoire des feuilles Saint-Étienne, Saint-Agrève et Lamastre (Youssif, 1980). Les caractéristiques des metabasites seront essentiellement discutées sur la base de leur teneur en éléments fortement chargés (Ti, Y, Zr, Nb, Hf), éléments de transition (V), Th et Terres Rares, généralement considérés comme immobiles lors des évolutions post-magmatiques et métamorphiques. L'examen des teneurs en Al_2O_3 , CaO, MgO a permis la reconnaissance du caractère cumulatif de certains échantillons. Les faibles valeurs de l'indice [mg] (42 à 60) des terres considérées

NOM TYPE	IYF6 FD-PY	IY14 FD	IYF3 FD	IYL1 FD	IYW3 FD	IYD FD-MA	IYF12 FD-MA	IYB FD-MA	1. B-VIV	2. B-VIV
SiO ₂	49.04	50.78	49.07	49.38	50.62	47.95	47.55	51.58	46.30	47.50
Al ₂ O ₃	14.81	14.75	14.25	15.22	14.20	13.65	15.85	15.76	12.25	13.60
Fe ₂ O ₃	1.98	2.24	2.36	1.35	1.46	1.36	2.91	0.87	3.21	4.92
FeO	9.77	9.36	10.15	9.18	9.72	10.58	7.62	9.23	10.40	9.67
MgO	5.26	4.38	5.70	5.66	6.70	8.67	4.36	5.46	6.70	11.10
CaO	9.88	8.67	8.92	9.60	9.77	8.16	11.24	7.57	9.95	9.95
Na ₂ O	4.29	4.95	4.50	3.83	3.43	3.65	4.11	4.35	3.20	1.90
K ₂ O	0.73	0.54	0.63	1.02	0.73	1.17	0.48	0.98	1.00	0.65
TiO ₂	2.95	2.86	2.91	1.99	1.76	2.43	2.94	2.15	3.40	2.80
MnO	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13	0.19	0.12	0.15	0.16	0.21
P ₂ O ₅	0.45	0.50	0.40	0.22	0.20	0.32	0.31	0.20	n.d.	n.d.
LOI	1.67	1.80	1.76	1.89	1.78	1.97	1.90	1.96	0.60	0.42
Total	100.97	100.96	100.79	99.48	100.50	100.10	99.39	100.20	99.72	100.17
Sr	544	421	484	578	497	523	829	270	710	261
Rb	10	9	7	24	18	48	13	32	n.d.	n.d.
V	171	168	175	179	185	244	302	189	n.d.	n.d.
Sc	24	20	21	23	30	31	22	23	n.d.	n.d.
Ga	24	23	23	20	19	20	22	22	n.d.	n.d.
Zr	252	250	246	138	119	176	142	163	255	206
Nb	37	38	35	20	15	28	26	24	46	32
Y	29	29	27	21	21	25	23	25	26	23
La	27.68	29.32	27.69	16.12	11	20	17.72	19.37	46.26	24.90
Ce	61.43	65.83	63.01	35.92	26.01	47.78	37.81	43.07	102.60	57.54
Nd	31.96	35.24	36.43	21.35	15.12	24.23	25.19	25.20	37.80	30.80
Sm	8.17	8.59	8.43	5.02	3.84	6.34	6.17	5.51	8.48	6.62
Eu	2.79	2.86	2.76	1.73	1.44	2.61	1.87	1.56	4.11	2.02
Gd	8.17	7.73	7.83	4.03	4.32	6.77	5.50	5.43	8.63	5.14
Tb	1.22	1.16	1.04	0.55	0.67	1.21	0.76	n.d.	n.d.	n.d.
Dy	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.68	4.07
Er	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.18	1.70
Yb	1.50	1.45	1.32	1.22	1.40	1.37	1.30	1.37	1.71	1.40
Lu	0.20	0.19	0.18	0.16	0.19	0.19	0.17	0.19	0.31	0.20
U	1.39	1.41	1.30	0.86	1.12	1.53	1.31	0.63	n.d.	n.d.
Th	2.91	3.13	2.80	2.21	1.28	1.91	1.71	2.30	3.93	2.56
Hf	6.56	6.87	6.74	3.91	3.17	4.31	4.10	4.57	n.d.	n.d.

Tabl. I. - Analyses représentatives des divers types d'amphibolites (liste complète des analyses sur demande au premier auteur). FD-PY : amphibolite feldspathique litée associée à des pyroxénites et amphibolo-pyroxénites. FD : amphibolites feldspathiques litées : FD-MA : amphibolites feldspathiques massives : B-VIV : amphibolites des Cévennes Médiannes (Pin, 1989). Les éléments majeurs ont été déterminés par voie humide (méthode décrite in Piboule, 1979). Les teneurs en éléments traces ont été déterminées par fluorescence X (Germanique et Briand, 1985) avec une précision analytique de 2 % pour Nb, Zr, Sr, Y et V ; 5 % pour Rb et Ga ; 13 % pour Sc. Th, Hf et les terres rares ont été dosées par activation neutronique (Institut Laue Langevin, Grenoble, Analystes R.A. Oliver, J. Keller avec une précision analytique de +/- 5 % pour Hf, La, Ce, Sm, Yb : +/- 10 % pour Th, Eu, Tb, Lu : +/- 15 % pour Nd.

Table I. - Representative analyses of various amphibolite types (list of other analyses on request: first author adress). FD-PY: Striped feldspathic amphibolite associated with pyroxenites and amphibolo-pyroxenites. FD: Striped feldspathic amphibolites; FD-MA: Massive feldspathic amphibolites; B-VIV: Amphibolites from Middle Cévennes (Pin, 1989). Major elements contents were determined by wet method (described in Piboule, 1979). Trace elements contents were determined by XRF (Germanique & Briand, 1985) with analytical precision of 2% for Nb, Zr, Sr, Y and V; 5% for Rb, Ga; 13% for Sc. Th, Hf and REE contents were determined by INAA (Laue Langevin Institute in Grenoble, R.A. Oliver and J. Keller analysts). Analytical precision of +/- 5% for Hf, La, Ce, Sm, Yb; +/- 10% for Th, Eu, Tb, Lu; +/- 15% for Nd.

comme non cumulatifs indiquent que les protolithes basaltiques avaient déjà subi les effets d'une différenciation. Les teneurs en alcalins de ces termes les rapportent à des basaltes alcalins et trachy-basaltes dans la classification TAS (Zanettin, 1984 ; Le Bas *et al.*, 1986) (fig. 2). Le caractère alcalin de ce magmatisme est en outre suggéré par la présence locale de très discrètes intercalations de « gneiss alcalins clairs à eckermanite et augite aegyrinique », étroitement associés aux amphibolites (Weisbrod, 1970 b ; Weisbrod *et al.*, 1985).

Les metabasites sont caractérisées par de faibles teneurs en Y (20 à 31 ppm), V (< 300 ppm) et Sc (16 à 31 ppm) et par de relativement fortes teneurs en Nb (15 à 45 ppm), TiO₂ (1,71 à 3,46 %), Zr (120 à 290 ppm) et Th (1,2 à 4,5 ppm) : les fortes valeurs des rapports Nb/Y et Ti/V les situent dans le champ des basaltes alcalins des diagrammes de J.A. Winchester et P.A. Floyd (1977) et J.W. Shervais (1982) (fig. 3 et 4).

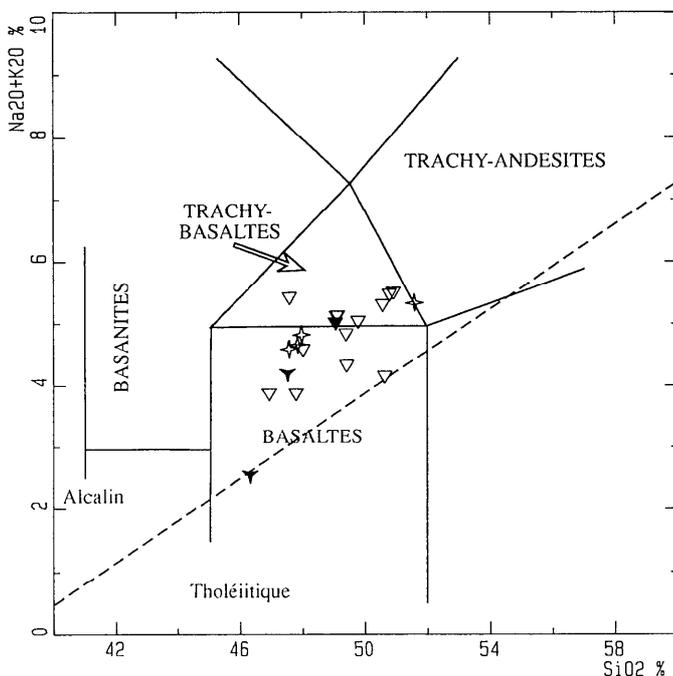


Fig. 2. - Distribution des points représentatifs des metabasites dans le diagramme TAS (Zanettin, 1984 ; Le Bas *et al.*, 1986). La droite séparant le champ tholéiitique du domaine alcalin est empruntée à A. MacDonald et T. Katsura (1964). Amphibolites feldspathiques litées (triangles vides) ; amphibolites feldspathiques litées associées à des pyroxénites et amphibolites feldspathiques massives (étoiles vides).

A titre de comparaison ont été reportés deux échantillons d'amphibolites des Cévennes Médiannes (Pin, 1989) (étoiles pleines). Les mêmes symboles seront utilisés pour les figures 3 et 4.

Fig. 2. - Distribution of the studied metabasites in the TAS diagram (Zanettin, 1984 ; Le Bas *et al.*, 1986). The boundary line between the tholeiitic and alkaline fields is from MacDonald and Katsura (1964). Comparison with two amphibolite samples from the middle Cévennes area (Pin, 1989).

Empty triangles: striped feldspathic amphibolites. Filled triangles: striped feldspathic amphibolites associated with pyroxenites. Empty stars: massive feldspathic amphibolites. Filled stars: amphibolites collected in the middle Cévennes area (Pin, 1989). The same symbols are used in subsequent figures 3 and 4.

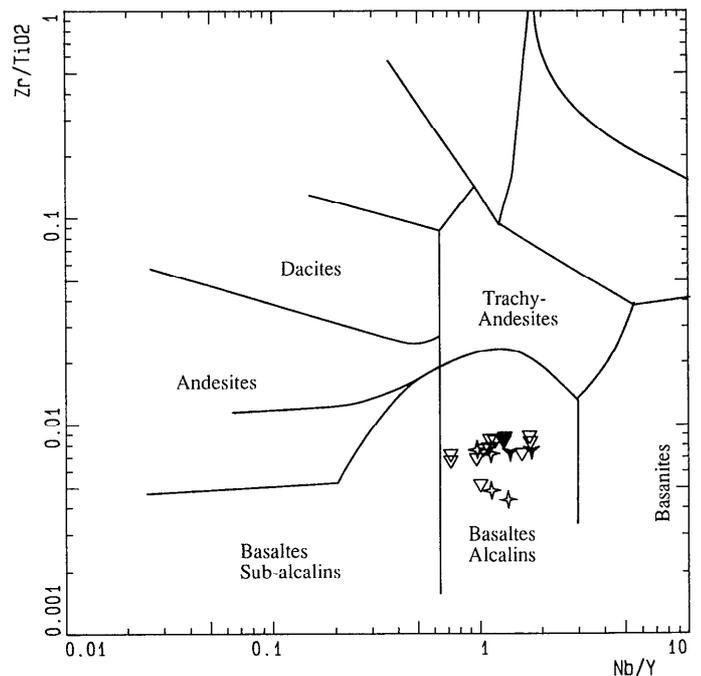


Fig. 3. - Distribution des points représentatifs des metabasites dans le diagramme Zr/TiO₂ - Nb/Y (Winchester et Floyd, 1977).

Fig. 3. - Distribution of the studied metabasites in the Zr/TiO₂ - Nb/Y diagram (Winchester & Floyd, 1977).

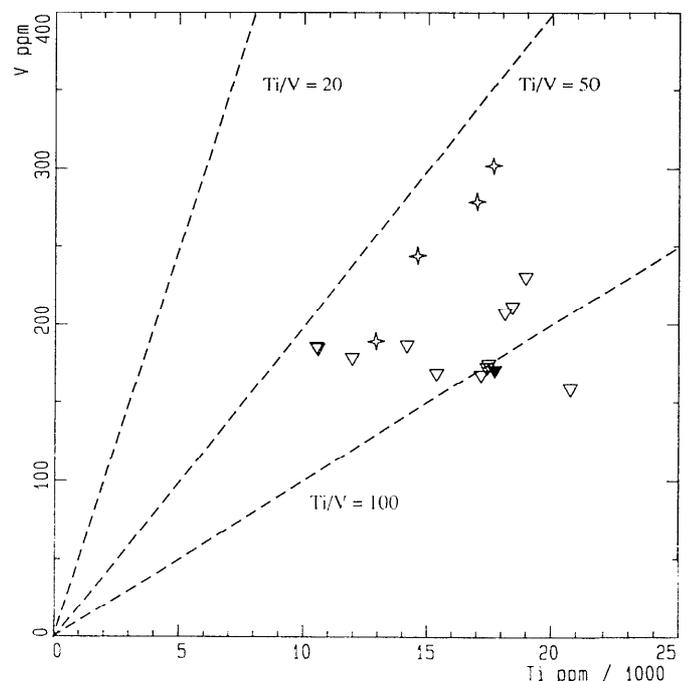


Fig. 4. - Valeurs des rapports Ti/V des metabasites considérées. Ti/V < 20 : tholéiites d'arc insulaire ; 20 < Ti/V < 50 : MORB ; Ti/V > 50 : tholéiites enrichies et basaltes alcalins (Shervais, 1982).

Fig. 4. - Values of the Ti/V ratios in the studied metabasites. Ti/V < 20: island arc tholeiites; 20 < Ti/V < 50: MORB; Ti/V > 50: enriched tholeiites and alkaline basalts (Shervais, 1982).

La normalisation par rapport au manteau primitif (Sun et McDonough, 1989) (fig. 5) montre un net enrichissement en Nb et en terres rares légères ($La_N = 40$ à 170) et un discret enrichissement en Nb vis-à-vis de Th et La, caractéristique des basaltes alcalins (Clague et Frey, 1982 ; Dostal *et al.*, 1988 ; Zhi *et al.*, 1990). Elle distingue en outre ces metabasites des E-type MORBs (Sun et McDonough, 1989). Par ailleurs, la distribution du Nb (absence d'anomalie négative dans la figure 5) exclut un environnement d'arc pour ces basaltes alcalins (Clague et Frey, 1982 ; Pearce, 1982 ; Nakamura *et al.*, 1985 ; Smellie, 1987).

Les basaltes alcalins d'environnements océaniques ou continentaux ne sont pas géochimiquement distinguables (Allègre *et al.*, 1981 ; Fitton et Dunlop, 1985 ; Zhi *et al.*, 1990 ; Stern *et al.*, 1990), mais pour les metabasites considérées ici, la très large prédominance des termes greywackeux indique le caractère continental du site de mise en place.

Discussion et conclusion

Il n'existe, à l'heure actuelle, aucune donnée géochronologique concernant les metabasites considérées ici. Cependant, la persistance locale de textures éclogiques relictuelles (Weisbrod *et al.*, 1985) souligne l'existence d'une phase de métamorphisme de haute pression qui permet d'attribuer aux protolithes un âge anté-Silurien (Pin et Peucat, 1986). Dans ces conditions, on peut très vraisemblablement rapporter la mise en place des magmas basiques à l'épisode distensif cambro-ordovicien, largement reconnu par ailleurs dans le Massif central et dans l'ensemble de la chaîne varisque européenne (Gebauer *et al.*, 1981 ; Pin et Lancelot, 1982 ; Pin, 1989, 1990). La présence d'éclogitoïdes permet, de plus, d'attribuer à l'« unité inférieure des gneiss » la même évolution polyphasée en Cévennes médianes qu'en Limousin (Santallier *et al.*, sous presse).

En se référant au modèle d'organisation du Massif central en unités lithotectoniques superposées (Ledru *et al.*, 1989), on peut remarquer que le caractère subordonné des termes basiques est l'un des traits lithologiques marquants de l'« unité inférieure des gneiss » (Ledru *et al.*, sous presse). Les metabasites considérées ici sont, avec le massif de Sauviat, les principaux témoins du magmatisme basique dans cet ensemble. Les métagabbros de Sauviat se distinguent des amphibolites vivaroises par leur nature tholéiitique. Cependant, leurs caractéristiques géochimiques ont permis, ici aussi, de proposer un site de mise en place intra-plaque (Bernard-Griffiths et Jahn, 1981). L'absence de tholéiites océaniques dans l'ensemble de cette « unité inférieure des gneiss » conforte l'hypothèse d'une situation intracontinentale.

La plupart des metabasites des unités sous-jacentes (Ledru *et al.*, 1989) traduisent des environnements géodynamiques comparables. On y note en effet la présence de :

— basaltes alcalins (Lépine *et al.*, 1988), dans les nappes du flanc sud de la Montagne noire (« unités paléozoïques méridionales » de Ledru *et al.*, 1989) ;

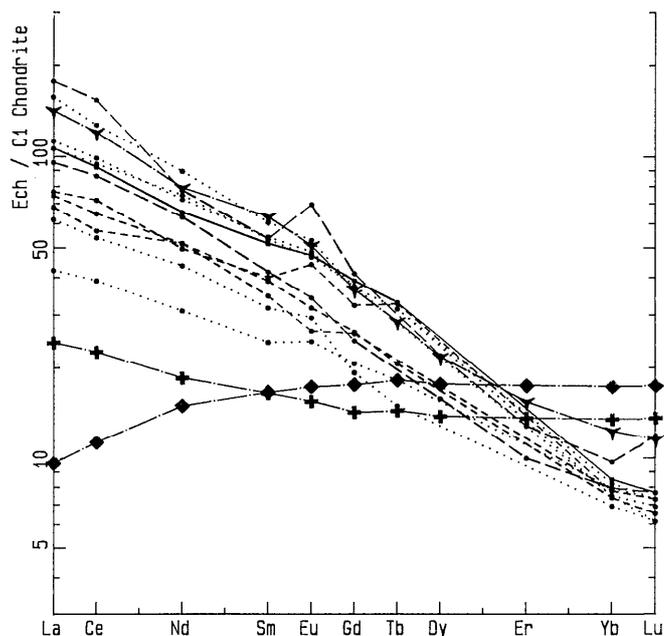


Fig. 5. - Distribution des terres rares et éléments traces normalisés au manteau primitif (Sun et McDonough, 1989). Amphibolite feldspathique litée associée à des pyroxénites et amphibolo-pyroxénites (trait continu), amphibolites feldspathiques litées (pointillés), amphibolites feldspathiques massives (tirets courts) et amphibolites des Cévennes Médianes (tirets longs). Comparaison avec un N-type MORB (losange), un E-type MORB (croix) et un basalte alcalin (étoile pleine) d'après SS. Sun et W.F. McDonough (1989).

Fig. 5. - Primitive Mantle-normalized REE and trace elements distribution (Sun & McDonough, 1989). Striped feldspathic amphibolite associated with pyroxenites and amphibolo-pyroxenites (continuous line), striped feldspathic amphibolites (dotted lines), massive feldspathic amphibolites (short-dashed lines) and middle Cévennes amphibolites (long-dashed lines). Comparison with N-MORB (diamond), E-MORB (cross) and an alkaline basalt (triangle) after SS. Sun and W.F. McDonough (1989).

— tholéiites continentales (Pin, 1989), dans les Cévennes méridionales (« autochtone relatif » de Ledru *et al.*, 1989) ;

— tholéiites continentales (Alsac *et al.*, 1987 ; Marini, 1988) des nappes de l'Albigeois (« unités paléozoïques méridionales » de Ledru *et al.*, in Costa, 1990).

Les metabasites tholéiitiques des écaillures des monts de Lacaune (« unités paléozoïques méridionales » de Ledru *et al.*, in Costa, 1990) présentent cependant des caractères différents qui ont permis de les rapporter à un arc insulaire intra-océanique (Pin, 1989).

L'ensemble des unités précédentes diffère de l'« unité supérieure des gneiss », caractérisée par l'abondance et la variété de ses intercalations tholéiitiques et par l'absence de termes alcalins (Santallier *et al.*, 1988). En effet, outre des tholéiites continentales (Lyonnais : Blanc, 1981 ; Dufour, 1985) et des tholéiites de bassin marginal et/ou de rift ensialique (Haut-Allier, Lot, Rouergue : Piboule, 1979 ; Briand et Piboule, 1979 ; Giraud *et al.*, 1984 ; Bodinier *et al.*, 1988 ; Briand *et al.*, 1988, 1991 ; Pin et Vielzeuf, 1988 ; Pin, 1989 ; Downes *et al.*, 1989), il y a été reconnu des tholéiites de

type N à E-MORB en Limousin (Cabanis *et al.*, 1983), en Rouergue oriental (Piboule et Briand, 1985 ; Bodinier *et al.*, 1986 ; Bouchardon, résultats inédits), et en sondage dans le Sancerrois (Costa, 1990). Ces dernières confirment dans le domaine occidental l'existence d'un stade d'océanisation souligné par la présence de témoins ophiolitiques localisés au voisinage immédiat du contact entre les deux unités gneissiques (Mercier *et al.*, 1985 ; Maillet, 1987).

Références bibliographiques

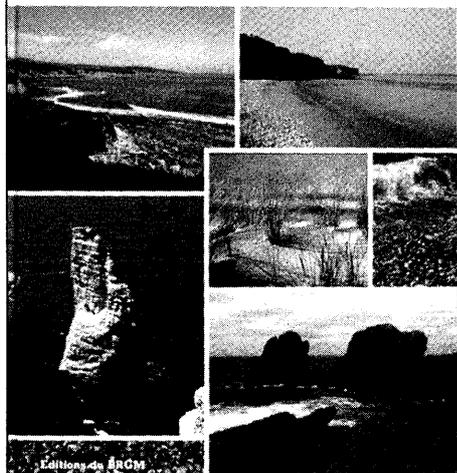
- ALLÈGRE C.J., DUPRÉ B., LAMBERT B., RICHARD P. (1981). - The subcontinental versus suboceanic debate, I. Lead - Neodymium - Strontium isotopes in primary alkali basalts from a shield area. The Ahaggar volcanic suite. *Earth planet. Sci. Lett.*, **50**, pp. 85-92.
- ALSAC C., CABANIS B., GUÉRANGÉ-LOZES J., BÉZIAT D. (1987). - Caractères magmatiques du volcanisme basique ordovicien de la nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès dans l'Albigeois cristallin (Tarn-Aveyron, France). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, (2), **305**, pp. 1199-1205.
- BERNARD-GRIFFITHS J., JAHN B.M. (1981). - REE geochemistry of eclogites and associated rocks from Sauviat-sur-Vige, Massif Central, France. *Lithos*, **14**, pp. 263-274.
- BLANC D. (1981). - Les roches basiques et ultrabasiques des Monts du Lyonnais. Thèse, Lyon, 1981, 140 p.
- BODINIER J.L., GIRAUD A., DUPUY C., LEYRELOUP A., DOSTAL J. (1986). - Caractérisation géochimique des metabasites associées à la suture méridionale hercynienne. Massif Central français et Chamrousse (Alpes). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **2**, pp. 115-123.
- BODINIER J.L., BURG J.P., LEYRELOUP A., VIDAL H. (1988). - Reliques d'un bassin d'arrière-arc subducté puis obducté dans la région de Marvejols (Massif Central). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **2**, pp. 21-33.
- BRIAND B., PIBOULE M. (1979). - Les metabasites de la série de Marvejols (Massif Central : témoins d'un magmatisme tholéiitique d'arrière-arc cambro-ordovicien, *Bull. BRGM Fr.*, 2, Section I, pp. 131-171.
- BRIAND B., PIBOULE M., BOUCHARDON J.L. (1988). - Diversité géochimique des metabasites des groupes leptyno-amphiboliques du Rouergue et de Marvejols (Massif Central) : origine et implications. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **4**, pp. 489-498.
- BRIAND B., PIBOULE M., SANTALLIER D., BOUCHARDON J.L. (1991). - Geochemistry and tectonic implications of two Ordovician bimodal Complexes, southern french Massif Central. *J. geol. Soc. London*, **148**, pp. 959-971.
- CABANIS B., GUILLOT P.L., SANTALLIER D., JAFFREZIC H., MEYER G., TREUIL M. (1983). - Apport des éléments en traces à l'étude géochimique des metabasites du Bas-Limousin. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), **4**, pp. 563-574.
- CHENEVOY M., PETERLONGO J., BONTE A., WATRELOT G., COMTE P., DE MONTJAMONT M. (1970). - Carte géologique de Saint-Étienne à 1/50 000.
- CHENEVOY M., DURAND G., BEURRIER M., PASSERON J.P., MERGOIL J., MICHON M., BRIAND B., FÉRAUD J. (1979). - Carte géologique de Lamastre à 1/50 000.
- CHENEVOY M., GAY M., LOCHON P. (1986). - Métabasites alcalines et métaleucogranites de la série métamorphique du Vivarais occidental (Massif Central français) : marqueurs successifs de processus paléozoïques de distension et de collision. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, (2), **303**, pp. 725-730.
- CHENEVOY M., LOCHON P., MASMEJEAN B. (sous presse). - Carte géologique de Saint-Agrève à 1/50 000 (sous presse).
- CLAGUE D.A., FREY F.A. (1982). - Petrology and trace element geochemistry of the Honolulu volcanics, Oahu: Implications on the oceanic mantle below Hawai'i. *J. Petrol.*, **23**, pp. 447-504.
- COSTA S. (1990). - De la collision continentale à l'extension tardi-orogénique : 100 millions d'années d'histoire varisque dans le Massif Central français. Une étude chronologique par la méthode ⁴⁰Ar-³⁹Ar. Thèse, Montpellier, 441 p.
- Les metabasites des « unités inférieures » apparaissent donc comme les témoins du processus de rifting qui a affecté la croûte continentale au Paléozoïque inférieur (Pin et Lancelot, 1982 ; Pin, 1990). Lors de l'océanisation ultérieure dont témoignent MORBs et ophiolites, les « unités inférieures » ont été reléguées en position de marge inactive.
- DOSTAL J., STRONG D.F., JAMIESON R.A. (1980). - Trace element mobility in the mylonite zone within the ophiolite aureole, St Anthony complex, Newfoundland. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **49**, pp. 188-192.
- DOSTAL J., DUPUY C., ZHAI M., ZHI X. (1988). - Geochemistry and origin of Pliocene alkali basaltic lavas from Anhui-jiangsu, eastern China. *Geochemical J.*, **22**, pp. 165-176.
- DOWNES H., BODINIER J.L., DUPUY C., LEYRELOUP A., DOSTAL J. (1989). - Isotope and trace-element heterogeneities in high-grade basic metamorphic rocks of Marvejols: Tectonic implications for the Hercynian suture zone of the French Massif Central. *Lithos*, Amsterdam, **24**, pp. 37-54.
- DUFOUR E. (1985). - Granulite facies metamorphism and retrogressive evolution of the Mont du Lyonnais metabasites (Massif Central, France). *Lithos*, **18**, pp. 57-113.
- FITTON J.G., DUNLOP H.M. (1985). - The Cameron line, West Africa, and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. *Earth planet. Sci. Lett.*, **72**, pp. 23-38.
- GEBAUER D., BERNARD-GRIFFITHS J., GRÜNENFELDER M. (1981). - U-Pb zircon and monazite dating of a mafic-ultramafic complex and its country-rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **76**, pp. 292-300.
- GERMANIQUE J.C., BRIAND B. (1985). - XRF determination of Zr, Nb, Y, Sr, Rb, Zn, Pb in fifteen international geochemical reference samples. *Geostandards Newsletter*, **9**, 1, pp. 31-34.
- GIRAUD A., MARCHAND J., DUPUY C., DOSTAL J. (1984). - Geochemistry of Leptyno-amphibolite complex from Haut-Allier (French Massif Central). *Lithos*, **17**, pp. 203-214.
- LE BAS M.J., LE MAÎTRE R.W., STREIKESEN A., ZANETTIN B. (1986). - A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *J. Petrol.*, **27**, 3, pp. 745-750.
- LEDRU P., LARDEAUX J.M., SANTALLIER D., AUTRAN A., QUENARDEL J.M., FLOCH J.P., LEROUGE G., MAILLET N., MARCHAND J., PLOQUIN A. (1989). - Où sont les nappes dans le Massif central français ? *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **5**, n° 3, pp. 605-618.
- LEDRU P., AUTRAN A., BRIAND B., DUFOR J., DEMANGE M., DUTHOU J.L., FEYBESSE J.L., FLOCH J.P., GUÉRANGÉ-LOZES J., LARDEAUX J.M., MARIIGNAC C., QUENARDEL J.M., SANTALLIER D. - Lithostratigraphy of variscan terranes in the French Massif Central. A basis for paleogeographical reconstruction. In: "Pre-Mesozoic Terranes in France and related areas" J.D. Keppie ed. Springer Verlag. (sous presse).
- LÉPINE J., AYAD M.A.B., BÉZIAT D. (1988). - Mise en évidence de metabasites alcalines Cambrien inférieur dans le district aurifère de Salsigne (Versant sud-ouest de la Montagne Noire). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, (2), **306**, pp. 1087-1092.
- LOCHON P. (1985). - Les métaleucogranites du Haut Vivarais et leur environnement. Évolution et implications géodynamiques. Thèse 3^e cycle, Univ. Cl.-Bernard, Lyon, 1985, 221 p.
- MACDONALD A., KATSURA T. (1964). - Chemical composition of Hawaiian Lavas. *J. Petrol.*, **5**, pp. 267-318.
- MAILLET N. (1987). - Dualité d'origine des massifs ultrabasiques limousins. Implications géodynamiques. Thèse, Lyon, 149 p.
- MARINI F. (1988). - « Phase » sarde et distension ordovicienne du domaine sud-varisque, effets de point chaud ? Une hypothèse fondée sur les données nouvelles du volcanisme albigeois. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **306**, (2) pp. 443-450.
- MASMEJEAN B. (1987). - Le complexe granito-anatexique sombre du Vivarais (MCF) et les granites intrusifs associés : pétrologie et signification géodynamique. Thèse, Lyon, 215 p.
- MERCIER J.C.C., GIRARDEAU J., PRINZHOFFER A., DUBUISSON G. (1985). - Les complexes ophiolitiques du Limousin : structure, pétrologie et géochimie. *Doc. BRGM Fr.*, n° 95, 3, pp. 35-48.

- NAKAMURA E., CAMPBELL I.H., SUN S.S. (1985). - The influence of subduction processes on the geochemistry of Japanese alkaline basalts. *Nature*, **5**, 316, pp. 55-58.
- OUALI H. (1990). - Origine et contenu en Uranium des formations quartzo-feldspathiques de la série métamorphique du Mont Pilat. Dipl. Ass. Rech., 96 p.
- PEARCE J.A. (1982). - Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In Andesites, M.S. Thorpe ed. John Wiley & Son., pp. 525-548.
- PIBOULE M. (1979). - L'origine des amphibolites : approche géochimique et mathématique. Applications aux amphibolites du Massif Central français. Thèse, Lyon, 1003 p.
- PIBOULE M., BRIAND B. (1985). - Geochemistry of eclogites and associated rocks of the southeastern area of the French Massif Central: origin of the protoliths. *Chemical Geology*, **50**, pp. 189-199.
- PIN C. (1989). - Essai sur la géochronologie et l'évolution géodynamique de la Chaîne hercynienne d'Europe. Thèse d'État, Clermont-Ferrand, 1989, 455 p.
- PIN C. (1990). - Variscan oceans: Ages, origins and geodynamic implications inferred from geochemical and radiometric data. *Tectonophysics*, **177**, pp. 215-277.
- PIN C., LANCELOT J.R. (1982). - U-Pb dating of an early Paleozoic bimodal magmatism in the French Massif Central and of its further metamorphic evolution. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **79**, pp. 1-12.
- PIN C., PEUCAT J.J. (1986). - Age des épisodes de métamorphisme paléozoïques dans le Massif Central et le Massif Armoricain. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (2), 3, pp. 461-465.
- PIN C., VIELZEUF D. (1988). - Les granulites de haute pression d'Europe moyenne, témoins d'une subduction éo-hercynienne. Implication sur l'origine des groupes leptyno-amphiboliques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **4**, pp. 13-20.
- SANTALLIER D., BRIAND B., MÉNOT R.P., PIBOULE M. (1988). - Les complexes leptyno-amphiboliques (CLA) : revue critique et suggestions pour un meilleur emploi de ce terme. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), **4**, pp. 3-12.
- SANTALLIER D., LARDEAUX J.M., MARCHAND J., MARIGNAC C. - Metamorphic evolution of the French Massif Central. In Pre-Mesozoic terranes in France and related areas, J.D. Keppie ed. Springer Verlag, sous presse.
- SHERVAIS J.W. (1982). - Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth planet. Sci. Lett.*, **59**, pp. 101-118.
- SMELLIE J.L. (1987). - Geochemistry and tectonic setting of alkaline volcanic rock in the Antarctic Peninsula: a review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **32**, pp. 269-285.
- STERN C.R., FREY F.A., FUTA F., ZARTMAN R.E., PENG Z., KYSER K. (1990). - Trace-element and Sr, Nd, Pb and O isotopic composition of Pliocene and Quaternary alkali basalts of the Patagonian Plateau lavas of southernmost South America. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **104**, pp. 294-308.
- STOCH J.G., LUGMAIR G.W. (1990). - Geochemistry and evolution of MORB-Type eclogites from the Münchberg Massif, southern Germany. *Earth planet. Sci. Lett.*, **99**, pp. 230-249.
- SUN S.S., McDONOUGH W.F. (1989). - Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In Magmatism in the Ocean Basins, Saunders A.D. & Norry M.J. eds. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, **42**, pp. 313-345.
- VON RAUMER J.F., GALETTI G., PFEIFER H.R., OBERHANSLI R. (1990). - Amphibolites from Lake Emosson/Aiguilles Rouges, Switzerland: Tholeiitic basalts of a Paleozoic continental rift zone. *Swiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **70**, pp. 419-435.
- WEISBROD A. (1970 a). - Pétrologie du socle métamorphique des Cévennes médianes. Thèse, Nancy, 359 p.
- WEISBROD A. (1970 b). - Découverte de gneiss alcalins à eckermanite et augite aegyrinique dans la catazone ardéchoise. *C.R. Som. Soc. géol. Fr.*, **2**, p. 31.
- WEISBROD A., SAMAMA J.C., ELMI S., BERGER E. (1974). - Carte géologique de Largentière à 1/50 000.
- WEISBROD A., MERGOIL J., BERGER E., VALADAS B., VEYRET Y., BAMBIER A. (1985). - Carte géologique de Burzet à 1/50 000.
- WINCHESTER J.A., FLOYD P.A. (1977). - Geochemical discriminations of different magma series and their differentiations products using immobile elements. *Chem. geol.*, **20**, pp. 325-343.
- YOUSSIF I.A. (1980). - Les amphibolites de la série métamorphique de basse pression du Vivarais occidental et du Mont Pilat : Étude lithostratigraphique, pétrographique et géochimique. Thèse 3^e cycle, Univ. Cl.-Bernard, Lyon, 132 p.
- ZANETTIN B. (1984). - Proposed new chemical classification of volcanic rocks. *Episodes*, **7**, pp. 19-20.
- ZHI X., SONG Y., FREY F.A., FENG J., ZHAI M. (1990). - Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalts. *Chem. geol.*, **88**, pp. 1-33.

LES CÔTES DE FRANCE

paysages et géologie

françois michel



LES CÔTES DE FRANCE

paysages et géologie

françois michel

Professeur de Sciences naturelles dans la région parisienne et guide de haute montagne, François MICHEL est l'auteur de livres destinés au grand public et le scénariste de plusieurs films, tous axés sur l'Histoire de la Terre.

Pédagogue, il sait faire partager avec enthousiasme sa passion pour la géologie.

5 500 kilomètres de côtes jalonnent la France sur la moitié de son pourtour. A chaque secteur du littoral correspond un paysage caractéristique, souvent marqué d'un cachet pittoresque.

Suivre les rivages procure un dépaysement permanent, parsemé de transitions étonnantes et souvent brutales. En peu de distance, on passe de la plage à la falaise, de cette dernière aux marais ou à la dune.

Chaque paysage correspond à un sous-sol particulier façonné par la nature des roches, l'histoire géologique, l'évolution tectonique, le contexte climatique... et parfois l'action humaine.

Entre Dunkerque et Bonifacio, François MICHEL vous emmène découvrir le littoral de France dans une « balade géologique » à la portée de tous.

Titre déjà paru aux Éditions du BRGM :

Roches et paysages ont une histoire

Ouvrage relié de 160 pages
Nombreuses illustrations en couleurs

Prix : 200 F

+ 35 F de frais de port et d'emballage

ÉDITIONS DU BRGM
Avenue de Concy
45060 ORLÉANS CEDEX 2
FRANCE. Tél. 38 64 30 28
ISBN 2-7159-0516-5