

Géochimie des micaschistes du sondage d'Échassières

P. Piantone * et L. Burnol *

Mots-clés : Micaschiste, Analyse majeurs, Analyse élément trace, Analyse composante principale, Roche encaissante, Coefficient de corrélation
Allier (Échassières)

Résumé

L'étude par statistique multivariable A.C.P. des micaschistes du sondage d'Échassières, permet de distinguer au niveau du comportement des éléments, deux tendances marquées qui s'individualisent par deux axes majeurs :
— l'image de la minéralogie antérieure avec MgO, Cr, La, Ce, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, V, dont se démarquent, malgré un comportement similaire, le Be et le Sr ;
— l'image des apports hydrothermaux avec Rb, Li, Sn auxquels il faut ajouter W et U qui se démarquent légèrement.

Le Be, malgré son appartenance aux éléments hygromagnétophiles caractéristiques des intrusions leucogranitiques, montre un comportement peu contrasté et assez indépendant vis-à-vis du groupe précédent. Du fait, des faibles teneurs généralement enregistrées pour le Be, de sa minéralogie complexe, par les nombreuses espèces possibles et, somme toute banale par les éléments communs associés dans ses expressions minéralogiques, aucun élément caractéristique d'un minéral donné ne s'accorde avec le Be.

Les éléments chalcophiles des schistes ont été remaniés au cours des épisodes hydrothermaux, ainsi que le Be et le Sr.

La présentation d'un log géochimique à partir des éléments caractérisés comme mobiles appartenant à l'hydrothermalisme périgranitaire, confirme les données obtenues par l'analyse statistique. De grandes tendances entre les panneaux du haut et du bas sont mises en évidence. En fond de trou, dans les dix derniers mètres, une baisse dans les valeurs des éléments liées à l'hydrothermalisme périgranitaire a été notée.

L'étude comparative des signatures géochimiques à partir des mêmes éléments (Rb, Li, W, Sn, Be, Sr, As) dans les micaschistes des éponges des filons du stockwerk de la Bosse et des éponges des corps granitiques, ne permet pas de discrimination.

Les arguments minéralogiques déjà avancés au cours de précédentes études et ces données, laissent supposer une reprise complète des systèmes hydrothermaux préexistants par les fluides accompagnant la mise en place du granite albitique de Beauvoir.

Abstract

Geochemical behaviour of the micaschists in Échassières GPF borehole

The multivariate statistical treatment of chemical data on micaschists of Échassières drill hole (Principal component analysis), has distinguished two marked trends in the behaviour of elements characterized by two main axes :

— the image of the former mineralogy with MgO, Cr, La, Ce, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ and V from which B and Sr differ despite an identical behaviour ;
— the image of hydrothermal enrichments with Rb, Li, F and Sn to which should be added W and U although they show slight differences.

Despite its close correlation with hygromagnaphile elements, typical of leucogranite intrusions, Be shows a relatively independent, poorly contrasted behaviour in the micaschists, with respect to Rb, Li, F, Sn.

Due to the weak values generally obtained for Be, complex mineralogy of this element with its numerous species and the fact that associated elements are widely distributed in rocks, Be does not coincide with any typical mineralogical association.

* BRGM, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2.

The chalcophile elements in the micaschists as well as B and Sr have been reworked during hydrothermal processes.

The geochemical log based on mobile elements typical of the perigranitic hydrothermal system confirms the data obtained from the statistical analysis. Major trends have been brought out between the upper and lower blocks. A drop in the content of the elements related to the perigranitic hydrothermal system was observed in the last 10 m.

The comparative study of the geochemical signatures based on the same elements (Rb, Li, W, Sn, Be, Sr, As) in the micaschists, at the walls of the veins in the La Bosse stockwork and the walls of the granite bodies does not allow any discrimination.

The mineralogic arguments evidenced in previous studies and our data suggest a complete remobilization of the preexisting hydrothermal systems by the fluids related to the emplacement of the Beauvoir albitic granite.

1. — Introduction

1.1. — Résumé des travaux antérieurs

La campagne de géochimie en roches réalisée par G. Aubert (1969) avait donné de remarquables résultats en montrant l'importance des auréoles de dispersion des éléments qui avaient été alors analysés : F, Li et Be dosés sur tous les prélèvements, Sn, W, As et P dosés sur tous les prélève-

vements des zones centrales et Sud, et sur un prélèvement sur deux à l'extrême Nord et à l'extrême Sud du secteur étudié (10 km du Nord au Sud et 8 km d'Est en Ouest).

Cet auteur concluait en soulignant que le massif granitique d'Échassières développe autour de lui de larges auréoles de dispersion. Par ordre décroissant d'intensité seront citées celles du F, du Li, du W, de l'As, du Sn, du Be et du P ; leurs influences respectives se font sentir à des distances, à partir des limites du massif, qui varient de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres et probablement plus limitées verticalement.

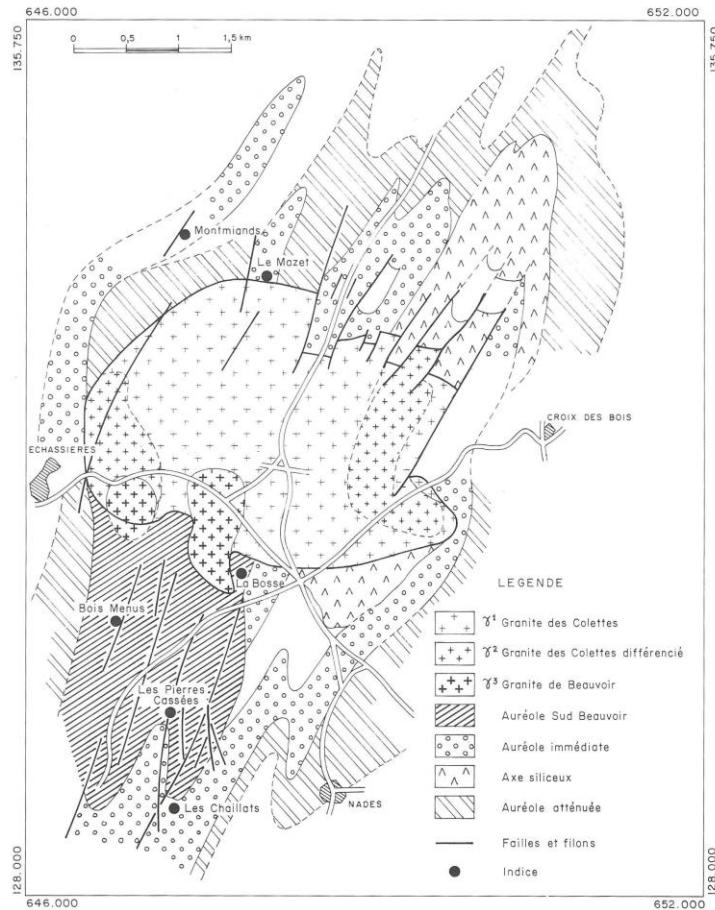


Fig. 1. - Cartographie des classes géochimiques définies par la C.A.H. (d'après Viallefond, 1985).
Geochemical cluster analysis distribution map of the Échassières area.

GR	OBS	TITRE	SiO ₂	Al ₂ X	Fe ₂ X	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Li	Bi
1	40	Auréole atténueée	52,29	24,60	7,48	1,01	1,00	6,44	1,36	0,13	200	1,0
2	20	Stérile	58,77	20,11	5,25	0,95	1,00	5,26	1,20	0,08	122	1,0
3	20	Granite	60,25	20,25	3,38	0,59	1,00	5,00	0,78	0,03	431	1,0
4	33	Auréole immédiate	55,68	21,67	6,11	1,10	1,00	5,63	1,14	0,13	242	1,1
5	17	Stérile	55,46	23,92	7,90	1,66	1,00	6,12	1,29	0,16	145	1,1
6	14	Axe siliceux	58,80	18,11	5,01	1,73	1,00	6,05	1,07	0,14	219	1,1
7	17	Auréole Sud-Beauvoir	53,98	22,16	6,91	0,98	1,00	5,61	1,15	0,02	472	10,1
8	3	Traces de CaO	56,51	21,02	6,18	1,53	1,13	5,78	1,12	0,16	205	2,2
9	9	Colette différencié	52,53	30,15	2,20	0,38	1,00	4,42	0,29	0,03	579	1,0
10	5	Granite de Beauvoir	56,98	28,50	1,91	0,32	1,00	3,96	0,15	0,09	5340	2,3
GR	OBS		B	V	Cr	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	As	Sr
1	40		71	120	91	12	32	45	47	124	195	93
2	20		28	94	73	9	28	26	45	94	83	98
3	20		20	46	39	1	14	16	76	95	34	111
4	33		50	98	74	10	26	90	72	198	327	116
5	17		16	117	95	13	42	50	44	132	40	106
6	14		5	81	46	6	19	37	90	204	140	112
7	17		56	100	79	1	18	151	37	128	1087	144
8	3		14	98	71	12	30	49	81	171	64	133
9	9		20	21	20	1	11	32	215	118	67	280
10	5		15	23	25	1	13	88	134	139	129	855
GR	OBS		Y	Nb	Mo	Ag	Sn	Sb	Ba	La	Ce	W
1	40		40	45	1,1	0,5	22	9	989	75	171	18
2	20		42	41	1,0	0,1	11	9	887	68	163	13
3	20		17	50	1,9	0,4	76	7	692	24	68	34
4	33		39	41	1,2	0,7	69	11	1028	64	146	41
5	17		53	45	1,3	0,1	10	11	928	89	216	3
6	14		35	38	1,0	0,4	37	8	1001	41	105	26
7	17		33	40	5,2	1,9	190	13	987	71	153	189
8	3		54	43	1,4	0,2	19	11	1054	79	183	23
9	9		28	44	4,6	0,9	133	8	2045	28	62	42
10	5		18	140	5,1	1,8	861	14	1398	18	36	185
GR	OBS		Cd	Be	Zr	P205	F					
1	40		1	6	270	1620	1251					
2	20		1	3	320	1091	742					
3	20		1	8	196	2327	2404					
4	33		1	5	279	1938	2022					
5	17		1	3	332	1955	325					
6	14		1	6	287	1364	1925					
7	17		1	4	245	1575	5404					
8	3		1	4	313	2717	1318					
9	9		1	8	106	3299	3245					
10	5		1	35	100	4671	9596					

Tabl. I. — Comparaison des moyennes géométriques par classes (C.A.H.) cartographiées.
Comparison of geometric means per mapped groups (cluster analysis).

Des auréoles de dispersion particulières, de haute intensité enveloppent le stock de Beauvoir et se prolongent largement vers le Sud :

- les unes celles du W et peut être celle de l'As sont en liaison probable avec le « granite de la Bosse »;
- les autres, celles du F, du Li et de Sn, semblent directement issues du granite à lépidolite de Beauvoir.

Depuis les travaux de géochimie en roche de G. Aubert (1969), une campagne complémentaire de géochimie en sol (187 échantillons) a été réalisée en 1984 dans le cadre du projet GPF, et a montré la compatibilité des valeurs mesurées en sol avec celles précédemment obtenues en roches, permettant de préciser la structure des anomalies et de les définir dans une gamme d'éléments chimiques plus étendue.

Les différentes approches, cartographie des valeurs isoanomales (Burnol et Viallefond, 1984), traitement statistique CAH (classification ascendante hiérarchisée, Viallefond, 1985), ont permis d'affiner les travaux antérieurs en précisant mieux la géométrie et les rapports des zones anomalies, de caractériser des faciès géochimiques types liés aux influences des corps granitiques.

De ces travaux (fig. 1 et tabl. 1), nous retiendrons la caractérisation dans l'encaissant par la CAH de grands types de signatures :

— au Sud du granite de Beauvoir, une auréole dont l'extension est contrôlée par la fracturation Nord 20, caractérisée par des éléments typiques de la phase Beauvoir, F, Sn, Li présentant des niveaux de valeurs très élevés et accompagnés par As, Cu et Ag;

— une seconde auréole, se subdivisant en deux pôles majeurs entoure le massif des Colettes, un pôle siliceux caractérisé par la forte participation de Be : 6 ppm (en sol) et un pôle enrichi en Cu, Zn, As qui inclut les minéralisations du Mazet, des Montmins et une partie des anomalies à l'Ouest de la Bosse.

A ces deux signatures bien typées, il faut ajouter la présence de fortes anomalies en Bi et Mo correspondant à la forte anomalie en W du stockwerk de la Bosse, soulignant une association déjà connue dans les gisements dits de « départ acide » (Routhier, 1963) recoupées, comme le montre la figure 2, par les valeurs maximales en Sn, F et Li typique de la phase Beauvoir.

En conclusion, concernant les auréoles géochimiques, deux épisodes majeurs étaient démontrés par ces travaux :

— un épisode à Be, F, Li, Sn et W lié à la mise en place du batholite de la Bosse-Colette auquel est rattachée la formation du stockwerk à ferbérite de la Bosse entouré d'une auréole plus proche à Bi-Mo et plus tardivement et sans certitude les minéralisations à hubnérite du Mazet ;

— un épisode à F, Sn, Li, As, très forts, Cu et Ag, celui de Beauvoir, auquel on peut rattacher la mise en place, dans les micaschistes, des filonnets à quartz topaze et cassiterite des Bois Menus et les petits filons polymétalliques à W, Sn, et sulfures des Chaillats, ainsi que le développement de topaze tardive dans les filons à quartz-ferbérite du stockwerk antérieur au granite de Beauvoir (Aïssa et al., ce volume).

1.2. — Objet de l'étude

L'étude présentée dans ce rapport basée sur la réalisation d'un log géochimique fait sur des échantillons ponctuels de la série encaissant du granite de Beauvoir a été menée selon deux directions majeures :

- essayer, par des échantillonnages sélectifs, de caractériser les différents messages géochimiques apportés par les divers stades de la mise en place du système granitique de la région d'Échassières ;
- étudier à l'aide de méthodes statistiques le comportement des éléments en traces dans un environnement hydrothermal pélagranitique.

Elle était conçue comme une première étape d'analyse des possibilités de discriminer les empreintes métasomatiques laissées par les différents fluides qui ont percolé l'encaissant des granites qui se sont succédés lors de la mise en place du complexe d'Échassières.

2. — Caractéristiques minéralogiques des micaschistes étudiés

Sans revenir sur la minéralogie des schistes étudiée par Monier et Tegyey (1985), lors de l'étude préliminaire nous résumerons les résultats déjà obtenus.

Trois paragenèses minéralogiques majeures ont été mises en évidence en liaison avec trois événements géologiques successifs bien caractérisés (tabl. 2) :

- 1) Une phase de métamorphisme régional mésozonal (de type barrovien) caractérisée par l'association staurotide-almandin-biotite-muscovite et localement sillimanite ;
- 2) Une phase de métamorphisme thermique qui provoque la blastèse d'andalousite qui blinde le staurotide et une recristallisation de phyllites non orientées, exemple : les fins cristaux de biotite ;
- 3) Une ou plusieurs phases hydrothermales qui induisent l'apparition de petits minéraux phyllitiques qui prennent un développement d'intensité variable selon l'échantillon et sa proximité des filons ou des corps intrusifs granitiques.

Près des filonnets et surtout au contact immédiat des granites les transformations de la minéralogie primaire sont très fortes, elles se manifestent par :

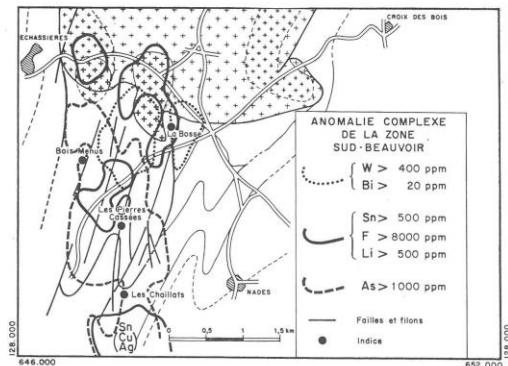


Fig. 2. — Répartition des anomalies de forte intensité relatives à quelques éléments dans l'aurore Sud Beauvoir.
(d'après Viallefond, 1985).
High intensity geochemical anomalies in the area South of Beauvoir

- a) un développement de micas blancs, ou une chloritisation de biotite aux épontes des filons à quartz ferbérite ;
- b) une décoloration des biotites surtout visible au contact des granites qui marque une profonde transformation des micas en zinnwaldite (Tegyey, 1985) ;
- c) parfois une disparition des textures métamorphiques qui se manifeste par une recristallisation intense de la mésostase et une silicification du milieu ;
- d) un développement de topaze ;
- e) l'apparition sporadique de tourmaline.

Les données sur l'évolution pétrographique établies à ce jour, font état de deux générations d'apatite et topaze appartenant à l'intrusion granitique de Beauvoir qui recoupe les schistes et les filons. Elles se distinguent par leur contenu en fluor et se surimposent au système hydrothermal à ferbérite (Rossi et al., ce volume).

Les premiers résultats obtenus sur les inclusions fluides des topazes développées sur les filons à ferbérite montrent des caractéristiques physicochimiques comparables à celles du granite de Beauvoir (Aïssa, 1987), et le caractère secondaire des topazes vis-à-vis des filons à wolframite dont les inclusions carboniques primaires ont généralement éclaté lors du métamorphisme thermique du granite des Colettes (Aïssa et al., ce volume).

De tels faits laissent supposer une reprise générale du système hydrothermal antérieur associée au granite de la Bosse (?), par les fluides issus du granite de Beauvoir.

3. — Géochimie des micaschistes

3.1. — Échantillonnage — Préparation des poudres

L'échantillonnage a été effectué :

- sur le sondage, micaschistes hors de toute influence de percolations visibles et loin de filons et granites, épontes de filons

N° Ech.	Côte en m.	Caractères macroscopiques	Minéraux du métamorphisme général	Minéraux du métamorphisme de contact	Minéralogie hydrothermale	Minéralogie des filons et nature des granites
ES 2	69,85	MSN	Aucune texture relique	Biot. blast., And. blast., tour	-	-
ES 4	76,00	FWA	Conservés	Biot. blast., And. blast.	F.c.h. (Mb, Biot.d,f)	Qtz, Ferb., Aplité
ES 7	84,50	MSN	Conservés	Biot. blast., And. blast.	Mph	-
EW 4	91,50	FWN	Chimérite	And. blint.	F.c.h. (Biot.d., Mb), Mph	Qtz, Ap., Top., Wo
ES 13	97,35	MSG	Texture conservée minéralogie oblitérée	-	Mph, Pyr.	Bi supérieure
ES 15	799,10	MSG	Conservée	Biot. blast., And. blast.	F.c.h. (Biot.d., Mph), Top., Mo, Pyr., Chalc.	82
EW 6	813	FWN	Conservés	M.b. (?), And. blast.	-	Qtz, Ferb.
EW 7	813,40	FCW	Conservée (sill. pres.)	Biot. blast., M.b. (?), And. blast.	F.c.h. (Biot.d., Chalc)	Cas, Cbt, Mo, Ferb, Phos, Top
EW 7b	813,40	Filonnet à sulfures	Conservés	And. blast.	Mph	Pyr, Chalc, Blen.
ES 28	852	MSN	Conservés	Biot. blast., And. blast.	F.c.h. (Biot.d.), Mph	-
EW 10	854	FWG	-	Biot. blast.	F.c.h. (Biot.d.)	Qtz, Ferb, 82
ES 32b	854,20	MSG	-	Reliques And.	Biot.d., Top	82
ES 34	877,30	MSG	Texture conservée minéralogie oblitérée	-	Biot.d., Mph	82
EW 11	879,40	FWN	Texture conservée minéralogie oblitérée	Biot. blast.	-	Qtz, Ferb, Top, F
EW 12	880,50	FWN	Conservés	Reliques And.	-	Qtz, Ferb.
ES 38	882,60	MSG	Conservés	Reliques And.	Biot.d.	82
ES 41	883,20	MSG	Conservés	And. blast.	F.c.h. (Biot.d.) Mph	82
EW 14	889,45	FWN	Conservés	Reliques And.	Mph, Top	Qtz, Ferb.
EW 16	898,60	FWN	Conservés	Reliques And.	Mph, Top	Qtz, Ferb.

N.B. : le zircon est ominiprésent.

Tabl. II. — Résumé des observations minéralogiques faites sur les échantillons analysés. Légende des symboles employés : micaschistes hors de tout contact visible avec filon au corps granitique (MSN), en contact avec un corps granitique (MSG), avec un filon à ferberite et quartz (FWN), avec un filon à ferberite quartz et aplite (FWA), avec un filon à quartz cassiterite et wolframite (FCW), avec un filon de quartz et ferberite et un corps granitique (FWG).

And. : andalousite ; Blast. : blastique ; Biot. : biotite ; Biot. d. : biotite décolorée ; Blend. : blonde ; Cas. : cassiterite ; Cbt : columbo-tantalite ; Chalc. : chalcopyrite ; F. : fluorine ; F.c.h. : frange de contact hydrothermalisée ; Ferb. : ferberite ; Mb : mica blanc ; Mo : molybdénite ; Mph : minéral phylliteux ; Phos. : phosphate ; Pyr. : pyrite ; Qtz. : quartz ; Sill. : sillimanite ; Top. : topaze ; Tour. : tourmaline.

Synthesis of thin section studies performed on analysed samples.

Key : micaschist without contact with veins or granite bodies (MSN), with contact with granite bodies (MSG), with ferberite and quartz vein (FWN), with ferberite quartz and aplite vein (FWA), with quartz cassiterite and ferberite vein (FCW), with ferberite-quartz and granite body (FWG). For the key see the french text.

du système de la Bosse, épontes de corps granitiques ;

— en surface dans l'auréole du granite des Colettes (auréole immédiate L. Viallefond, 1985) et dans la région de Lalizolle, hors de l'auréole hydrothermale la plus distale (As).

Il devait permettre une première étude comparative des influences granitiques sur les micaschistes encaissants. La taille de l'échantillon varie en fonction du problème abordé, de quelques cm³ pour les épontes à plusieurs dizaines de cm³ pour les zones de micaschistes homogènes. Lors de l'échantillonage seuls des échantillons relativement homogènes ont été prélevés, caractérisés par l'absence de lentilles de quartz d'exsudation et l'absence de tout système microfilonien séquent... Les broyages ont été effectués au BRGM avec des concasseurs à mâchoires de fer pur, la porphyrisation étant traitée au mortier d'agate.

3.2. — Méthode d'analyses chimiques

Pour cette phase exploratoire, les analyses ont été faites au BRGM :

- les majeurs et traces dosés par spectrométrie d'émission avec source de plasma induit (ICP) ;
- U, Th, Rb dosés par fluorescence X ;

— F dosé par potentiométrie avec électrode spécifique sur solution d'attaque.

Au cours de ces travaux, 77 échantillons ont été étudiés : aux 61 échantillons analysés nouveaux ont été ajoutés 16 échantillons analysés par Burnol et Cuney en 1985 au cours de l'étude préliminaire. Les données analytiques sont disponibles dans le document BRGM n° 124, 1987.

3.3 — Techniques de traitement

L'étude proposée ici, est conçue comme une première phase d'analyse permettant de déterminer, de la manière la plus exhaustive possible, les éléments présentant les variations de concentration les plus importantes dans ce type d'environnement et de mettre en évidence, rapidement et sans idée a priori, les associations d'éléments fondamentales marquant des processus pétrogénétiques majeurs. La méthode utilisée est celle de la statistique multidimensionnelle : l'analyse en composante principale (ACP) après rotation des axes selon le critère varimax. Les valeurs utilisées sont les logarithmes des concentrations. À partir des marqueurs sélectionnés par cette étude comme étant liés à l'image du, ou des processus hydrothermaux majeurs, des spectres normés et un log géochimique ont été établis permettant la visualisation des variations des éléments impliqués par type d'échantillon et, globalement, le long du sondage.

SCHISTES ECHASSIERES MAJEURS TRACES									
Élément	Nombre	Valeur	Moyenne	Ecart	Coeff.	Varian-	Corrélation	Corrélation	Corrélation
F	77	0.03	4.60	1.05	0.88	0.84			
SiO ₂	77	38.70	91.00	61.33	8.27	0.13			
Al ₂ X	77	7.40	33.50	20.20	4.27	0.21			
Fe ₂ X	77	2.00	16.80	4.45	2.39	0.37			
MgO	77	0.40	4.00	1.83	0.65	0.36			
K ₂ O	77	0.40	11.50	6.12	1.93	0.32			
MnO	77	0.01	0.41	0.09	0.07	0.83			
TiO ₂	77	0.05	1.64	0.88	0.22	0.25			
P ₂ O ₅	77	320.00	9419.00	2192.06	1420.54	0.65			
Li	77	11.00	8847.00	1502.36	1807.75	1.20			
Be	77	2.00	277.00	12.10	32.28	2.67			
B	77	13.00	365.00	70.21	50.22	0.72			
U	77	7.00	214.00	106.75	32.94	0.31			
Cr	77	10.00	170.00	94.83	28.12	0.30			
Co	77	4.00	142.00	18.16	19.99	1.10			
Ni	77	8.00	315.00	50.51	45.51	0.90			
Cu	77	5.00	3444.00	181.13	411.64	2.27			
Zn	77	23.00	1469.00	263.26	264.24	1.00			
As	77	12.00	4868.00	245.75	597.86	2.43			
Br	77	31.00	821.00	99.16	112.96	1.14			
Y	77	10.00	48.00	27.90	6.77	0.24			
Sn	77	6.00	836.00	91.56	115.83	1.27			
Sb	77	10.00	24.00	12.68	4.30	0.34			
Ba	77	118.00	1576.00	687.68	221.24	0.32			
La	77	10.00	86.00	30.04	14.02	0.47			
Ce	77	10.00	191.00	90.94	27.65	0.30			
W	77	1.00	683.00	74.30	102.19	1.38			
Pb	77	1.00	73.00	24.57	13.65	0.56			
Zr	77	65.00	846.00	256.79	101.68	0.40			
Rb	77	25.00	5000.00	1072.53	1056.07	0.98			

Tabl. III. — Paramètres statistiques élémentaires.
Elementary statistical parameters.

3.4. — Études statistiques

3.4.1. — Caractéristiques des variables retenues pour le traitement ACP

Plusieurs variables ont été écartées du traitement à cause de la faiblesse des teneurs enregistrées qui ne dépassaient que trop rarement le seuil de détection.

Ainsi ont été rejetées CaO, Nb, Mo, Cd, Ag, Bi, Ta.

Les caractéristiques des variables retenues ; moyenne, écart type, maximum, minimum et coefficient de variation sont données dans le tableau 3.

On remarque que si certaines variables comme SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, U, Cr, Y, Sb, La, Ce, Zr montrent de faibles coefficients de variation (< 0,5) d'autres au contraire peuvent varier de façon considérable (> 1), Li, Be, Co, Cu, Zn, As, Sr, Rb, Sn, W et peuvent donc jouer un rôle important dans l'étude statistique.

L'étude de la matrice de corrélation (tabl. 4), calculée à partir du logarithme des concentrations, montre que les meilleurs coefficients de corrélation (> 0,70) se trouvent :

- d'une part entre : MgO, Cr, La, Ce, Al₂O₃, TiO₂, V;
- d'autre part entre : Li, Rb, F.

Et que SiO₂ en général se corrèle négativement avec les autres éléments.

Matrice de corrélation									
77 échantillons									
F	-0.14								
SiO ₂	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Al ₂ X	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Fe ₂ X	0.81	-0.61	0.48	1.00					
MgO	0.81	-0.61	0.48	1.00					
K ₂ O	0.81	-0.61	0.48	1.00					
MnO	0.81	-0.61	0.48	1.00					
TiO ₂	0.81	-0.61	0.48	1.00					
P ₂ O ₅	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Li	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Be	0.81	-0.61	0.48	1.00					
B	0.81	-0.61	0.48	1.00					
U	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Cr	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Co	0.81	-0.61	0.48	1.00					
NI	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Cu	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Zn	0.81	-0.61	0.48	1.00					
As	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Br	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Y	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Sn	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Sb	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Rb	0.81	-0.61	0.48	1.00					
La	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Ce	0.81	-0.61	0.48	1.00					
W	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Pb	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Zr	0.81	-0.61	0.48	1.00					
Rb	0.81	-0.61	0.48	1.00					

Tabl. IV. — Matrice des corrélations (valeurs logarithmiques)
Les valeurs encadrées ou soulignées sont concernées par le texte.

Correlation matrix (logarithmic values)
Framed or underlined values are discussed in the text.

3.4.2. — Analyse du comportement des éléments majeurs et en traces

a) Échantillonnage global et 30 variables (tabl. 5)

Le tableau des données utilisées comprend 77 échantillons décrits par 30 variables. L'ACP réalisée sur la matrice variance-covariance (après rotation) permet d'extraire 64% de la variance sur les 4 facteurs les plus significatifs : F1, F2, F6, F4. Les autres axes n'expriment unitairement que des valeurs inférieures à 6%.

** RÉSULTATS APRÈS ROTATION **

Analyse									
F	-0.107	-0.884	0.109	0.218	-0.079	-0.188			
SiO ₂	0.723	0.649	-0.072	0.143	-0.252	-0.265			
Al ₂ X	0.623	0.649	-0.067	-0.095	-0.172	-0.450			
Fe ₂ X	0.545	0.649	-0.155	-0.044	-0.003	-0.202			
MgO	0.193	0.442	0.042	-0.255	-0.093	-0.716			
K ₂ O	0.155	0.562	0.523	-0.155	-0.157	0.019			
TiO ₂	0.155	0.562	0.545	0.026	-0.157	0.019			
P ₂ O ₅	0.033	0.862	0.045	0.175	-0.045	-0.238			
Li	0.033	0.862	0.045	0.175	-0.045	-0.238			
Be	0.330	-0.076	0.016	-0.044	-0.116	0.139			
r _{UV}	0.940	0.095	0.012	0.027	-0.042	-0.126			
r _{ICD}	0.921	0.074	0.020	0.016	-0.077	-0.204			
r _{FCN}	0.517	-0.008	0.017	0.398	0.042	-0.457			
r _{CE}	0.083	0.146	-0.113	0.727	-0.024	-0.008			
r _{AS}	0.062	0.060	0.101	0.084	0.085	-0.358			
r _{CR}	0.310	-0.072	0.673	-0.334	0.098	0.377			
r _{TI}	0.142	0.042	0.137	0.071	0.037	-0.032			
r _{RSN}	-0.037	0.344	0.224	-0.071	0.037	-0.032			
r _{SRB}	-0.030	0.316	-0.249	-0.041	0.633	0.183			
r _{BR}	0.068	0.058	-0.149	-0.232	-0.103	0.368			
r _{TLA}	0.666	-0.058	-0.149	-0.232	-0.000	-0.040			
r _{CL}	0.954	0.115	-0.054	0.029	0.028	-0.171			
r _{TP}	0.041	-0.052	0.380	0.251	0.163	0.181			
r _{FB}	0.159	0.003	0.077	-0.199	0.082	0.030			
r _{TR}	0.062	0.003	0.003	0.079	-0.018	-0.144			

Tabl. V. — Analyse factorielle en composantes principales (traitement sur valeurs logarithmiques).

Principal component factor analysis, varimax rotation, logarithmic values

Dans le plan principal défini par les axes 1 et 2 de l'ACP (fig. 3) 45% de la variance totale est expliquée avec respectivement 28,3% pour l'axe 1 et 16,4% pour l'axe 2.

La majeure partie des éléments sont corrélés positivement avec les axes 1 et 2. Quelques éléments montrent avec ces axes des degrés divers d'anticorrélation dont seul sont significatifs dans l'ordre :

— W, Sb, SiO₂, avec l'axe 1 ;

— SiO_2 avec l'axe 2.

L'opposition existant entre la silice et les autres éléments s'explique par l'effet de dilution qu'exerce le quartz qui ne contient pas d'autres éléments que Si.

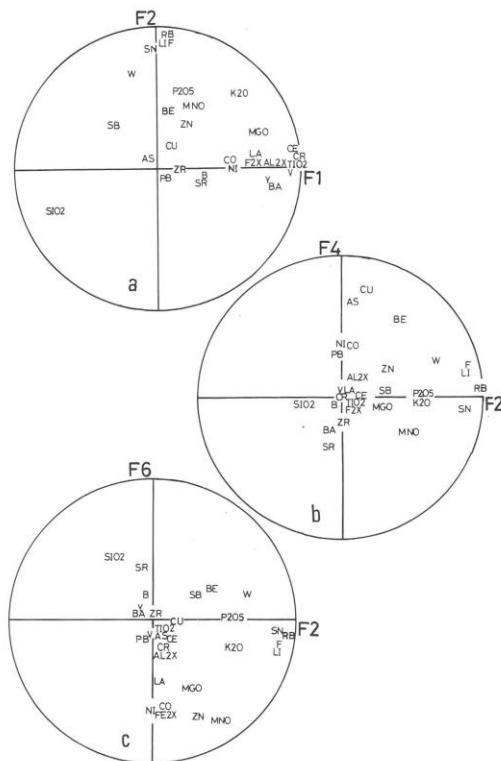


Fig. 3. — Projection des variables dans les plans factoriels 1, 2 et 6 expliquant 63,6 % de la variance.
Projection of variables on F1-F2, F2-F4, F2-F6 planes,
percentage of variante explained 63,6 %

La projection des variables dans le plan F1-F2 (fig. 3a) visualise le comportement des éléments qui rend compte de la minéralogie des échantillons étudiés.

Ainsi, il apparaît deux tendances majeures :

- une première tendance décrite par l'axe 1, où se regroupent par leur forte participation à la fonction discriminante F1, et par ordre décroissant Ce, V, TiO₂, Cr, Ba, Y, Al₂O₃, La, MgO, Fe₂O₃, Ni, Co auxquels on peut ajouter le B et le Sr avec des coefficients de corrélation à cet axe nettement plus faibles.
- une deuxième tendance avec deux groupes dominants, le premier avec, par ordre décroissant de participation à F2, Rb, Li, F, Sn, W, le second avec P₂O₅, Be, MnO, Zn. Ce dernier groupe, trouvant l'explication de ses variations diluées sur des axes de poids moindre.

K₂O et Sb sont, soit par leur participation égale aux deux axes, soit par une anticorrelation plus marquée, écartés de ces groupements. Les autres variables Cu, As, Pb, Zr ne montrent pas dans ce plan de tendances déterminantes.

Les deux axes mis à jour par l'analyse multivariable discriminent deux comportements majeurs :

— le premier, F1, dominé par la minéralogie primaire du micaschiste, les phyllosilicates avec Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, les minéraux accessoires, oxydes de fer et de titane, xénotime, monazite (?), zircon avec Ce, Cr, Y, Ba, La, Co, Ni, Fe₂O₃ ;

— le deuxième, F2, dominé par l'action des fluides hydrothermaux et les éléments les plus mobiles en phase fluide F, Li, Rb, Sn, W auxquels il faut ajouter un second groupe avec Be, P₂O₅, MnO, Zn.

L'étude de ce plan majeur (F1, F2) fait apparaître quelques anomalies sur lesquelles il sera revenu ultérieurement :

— une certaine indépendance du Be vis-à-vis des éléments issus du granite (*s.l.*) ;

— une faible dépendance, vis-à-vis de l'image des micaschistes, du Sr et surtout du B qui d'habitude est un marqueur des séries quartzo-micasées d'origine sédimentaire ;

— un comportement assez aberrant du Zr vis-à-vis de cette image si on suppose une forte abondance des zircons dans la biotite, et c'est le cas, dans le micaschiste.

Une remarque doit être faite au sujet de cet élément : le fait que le frittage des échantillons se fasse dans un creuset au zirconium doit avoir des implications sur les teneurs des échantillons étudiés.

Les projections faites dans d'autres plans ; F2/F4 et F2/F5 (fig. 3b et c) ont pour but de compléter les observations, en éliminant l'axe expliquant le plus de variations (F1) surtout marqué par l'image originelle. Elles permettent d'affirmer les liaisons fortes et faire apparaître d'autres plus faibles.

Les liaisons fortes déjà remarquées subsistent telles que :

- Rb, Sn, Li, F et à un moindre degré W ;
- Ni, Co et à un moindre degré Fe (axes 4 et 6).
- D'autres subsistent, MnO-Zn (axe 6).
- D'autres apparaissent, As, Cu et à un moindre degré avec Be (axe 4).

Le cas du P₂O₅ qui appartient au deuxième groupement est démonstratif d'un élément probablement distribué entre plusieurs phases minérales. Ainsi, il est expliqué de manière dominante par deux axes, l'axe F2 avec lequel il reste toujours lié quelles que soient les projections où il est en position intermédiaire entre deux phosphates possibles (Be la herdrite et Li l'amblygonite) et F3 où la forte corrélation P et Sr apparaît nettement (phosphates de strontium).

Une troisième contribution pour P est probablement l'apatite originelle des micaschistes expliquant la faible dérive de P₂O₅ vers F1 dans la projection F1/F2.

b) Échantillonnage global et 23 traces

Cette étude a pour but de tester l'effet de la suppression des majeurs, médiocrement dosés par ICP, sur la distribution de la population. Les projections des variables dans les plans F1, F2 et F5 (fig. 4a et b) qui expliquent environ 54 % de la

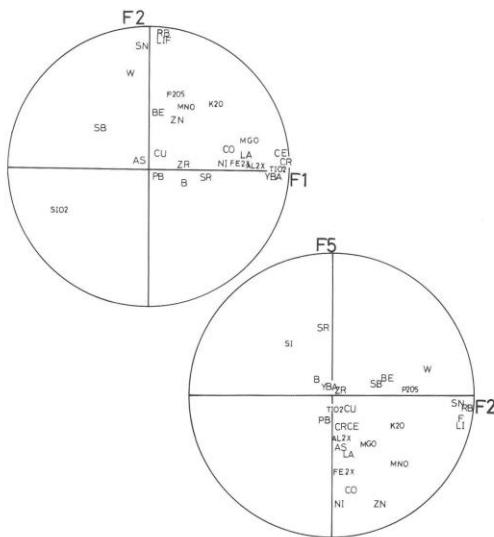


Fig. 4. — Projection des traces et des majeurs en variables supplémentaires (caractères plus petits) dans les plans factoriels F1/F2 et F2/F5 (54 % de la variance, ACP 77 individus et 23 traces).

Projection of trace elements major elements are plotted as additional variables (small characters) on plane F1/F2 and F2/F5 (percentage of variance explained : 54 %, PCA 77 samples and 23 traces elements).

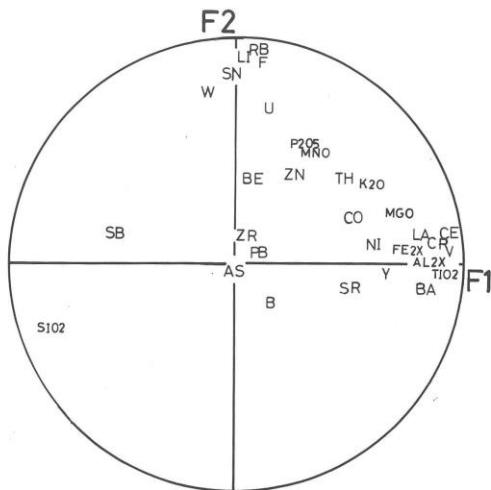


Fig. 5. — Projection des traces et des majeurs en variables supplémentaires dans les plans factoriels F1/F2 (44,5 % de la variance, ACP 61 individus et 25 traces).

Projection of traces elements, major element are plotted as additional variables (small characters) in eigenvector plane F1/F2. (percentage of variance explained : 44,5 % PCA 61 samples and 25 traces elements).

variance montrent une distribution assez semblable aux diagrammes précédents. Ainsi, les majeurs jouent un rôle secondaire dans la distribution des variables justifiant l'emploi des traces seules pour la poursuite de l'étude.

c) Comportement de l'uranium et du thorium (échantillonnage restreint, 61 individus et 25 traces)

Sans revenir sur les caractères de la population, déjà décrits, il sera remarqué, sur le plan F1/F2 (44,5 % de la variance expliquée) (fig. 5) que : 1) l'uranium semble avoir un comportement dépendant des fluides hydrothermaux contrôlé par le fluor ; 2) le thorium ne présente aucune tendance significative vis-à-vis des deux signatures minéralogiques dominantes mais sa bonne corrélation avec K₂O qui devrait être confirmée par des mesures complémentaires serait à mettre en liaison avec la signature originelle des schistes.

3.4.3. — Étude du comportement de la population échantillonnée vis-à-vis de l'image de l'activité hydrothermale

Le traitement par ACP nous fournit un espace vectoriel permettant, par la projection des individus, une visualisation globale de la population analysée et des tendances qui la composent.

Pour cette étude, outre Rb, Li, F, Sn, W et Be ont été retenus As et Sr qui marquent (Burnol *et al.*, 1984 ; Viallefond, 1985) les auréoles hydrothermales du complexe granitique d'Échassières.

Quelques variables comme P₂O₅ et Al₂O₃ possibles expressions des phosphates ou des aluminosilicates ont été ajoutés en variables supplémentaires ainsi que les éléments chalcophiles, Pb, Zn, Sb, Cu. L'analyse porte sur 70 individus les valeurs extrêmes étant écartées. L'observation des résultats (tabl. 6) montre l'existence d'un axe majeur (env. 38 % de la variance) dominé par la forte participation, par ordre de Li, F, Rb, Sn auquel s'oppose des axes mineurs dominés par la forte participation d'un seul élément : F2 avec As (12,8 % de la variance), F3 avec Sr (12,8 % de la variance), F4 avec Be

** RESULTATS APRES ROTATION **									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U	0.919 *	-0.055 *	-0.079 *	0.139 *	-0.272 *	0.132 *	-0.087 *	-0.164 *	
Rb	0.919 *	-0.054 *	-0.132 *	0.239 *	-0.279 *	0.110 *	-0.038 *	0.165 *	
Li	0.919 *	-0.053 *	-0.131 *	0.238 *	-0.278 *	0.111 *	-0.037 *	0.166 *	
As	-0.013 *	-0.075 *	-0.154 *	0.130 *	-0.092 *	-0.023 *	-0.007 *	-0.002 *	
Sr	-0.129 *	0.155 *	0.172 *	-0.112 *	0.040 *	-0.013 *	-0.001 *	-0.001 *	
Sn	0.392 *	-0.117 *	0.055 *	0.093 *	-0.902 *	0.113 *	0.016 *	0.001 *	
W	0.392 *	-0.117 *	0.055 *	0.093 *	-0.902 *	0.113 *	0.016 *	0.001 *	
Be	0.348 *	0.021 *	0.386 *	0.289 *	-0.219 *	0.146 *	0.284 *	-0.078 *	
Pb	0.348 *	0.021 *	0.386 *	0.289 *	-0.219 *	0.146 *	0.284 *	-0.078 *	
Zn	0.049 *	-0.226 *	0.069 *	-0.177 *	0.105 *	-0.097 *	0.007 *	-0.155 *	
Mn	0.414 *	-0.164 *	-0.221 *	-0.092 *	0.112 *	0.097 *	-0.072 *	0.140 *	
Ti	0.414 *	-0.164 *	-0.221 *	-0.092 *	0.112 *	0.097 *	-0.072 *	0.140 *	
Cu	0.028 *	-0.156 *	-0.355 *	0.243 *	-0.119 *	-0.063 *	-0.270 *	-0.022 *	

Tabl. VI. — Analyse factorielle en composantes principales (traitement sur valeurs logarithmiques).

Principal component factor analysis, varimax rotation, logarithmic values (calculated from logarithmic data).

(13,4 % de la variance), F5 avec W (12,8 % de la variance), F6 avec Sn (8,2 % de la variance). La projection des variables supplémentaires sur ces axes ne donnent pas de corrélation notable avec les variables du calcul statistique.

— **Plan F1/F2** (fig. 6a) : On note une bonne discrimination des échantillons vis-à-vis de l'axe 1 avec apparition de trois tendances dominantes en fonction de la nature de l'échantillon :

- 1) Les micaschistes hors de l'influence de Beauvoir, $F1 < -1$, MLN et MCN en partie champ (I) ;

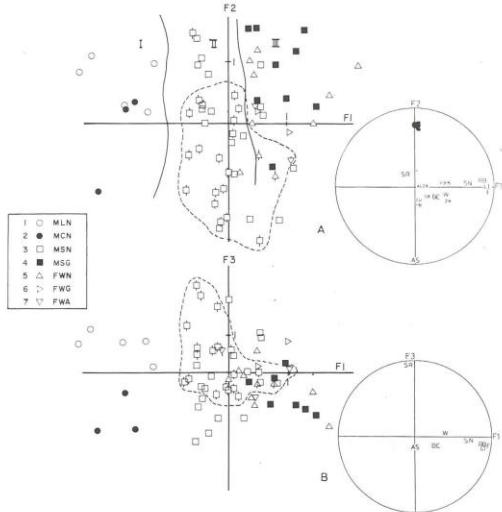


Fig. 6. — Projection des individus sur les plans factoriels (a) F1/F2 (50,8 % de la variance) et (b) F1/F3 (50,8 % de la variance).

Le cercle à droite de la projection présente le plan factoriel dans lequel sont projetées les variables.

Échantillons de micaschistes des Colettes (MCN), de Lalizolle (MLN), pour les échantillons du sondage

les symboles sont les mêmes que ceux du tableau 2.

Les échantillons du toit sont barrés d'un trait.

Pour les chiffres romains voir le texte.

Plot for canonical variables (a) F1/F2 (cumulative percent 50,8) and (b) F1/F3 (cumulative percent 50,8).

The circle on right correspond to eigenvector biplot of chemical variable. Colettes samples (MCN), Lalizolle (MLN), for drill core samples the labels are the same than those of table 2.

Samples of the roof are overprinted by vertical line.

For roman numbers see the text.

- 2) Les micaschistes du sondage de Beauvoir, $-1 < F1 < 0,2$, champ (II) ;

3) Les micaschistes des épontes des filons à quartz ferberite et en contact avec les corps granitiques, $0,2 < F1$, champ (III). Ainsi, on peut tout de suite remarquer qu'il n'existe pas de discrimination très marquée entre les micaschistes des épontes des filons à quartz-ferberite et les micaschistes proches des corps granitiques et que même des micaschistes sans contacts visibles se répartissent selon la tendance trois. La dispersion des points sur la partie négative de l'axe 2 montre un enrichissement notable des micaschistes en As au niveau de l'auréole Beauvoir indépendant de F, Li, Rb, Sn. La tendance des micaschistes situés au-dessus de la lame granitique du Beauvoir à être en majorité plus riche en As doit être remarquée.

— **Plan F1/F3** (fig. 6b) : Les micaschistes de Beauvoir montrent une forte dispersion le long de l'axe 3 et quelques valeurs plus élevées que les micaschistes de Lalizolle et ceux

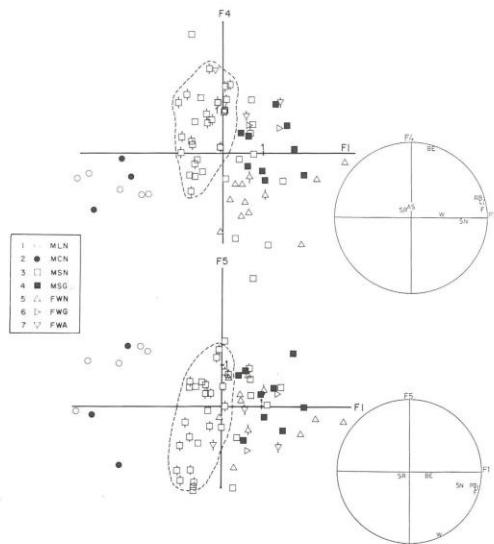


Fig. 7. — Projection des individus sur les plans factoriels (a) F1/F4 (51,4 % de la variance) et (b) F1/F5 (50,8 % de la variance).

(mêmes symboles que la fig. 6).

Plot for canonical variables (a) F1/F4 (cumulative percent 51,4) and (b) F1/F5 (cumulative percent 50,8). (same labels than fig. 6).

de l'auréole des Colettes. Les plus faibles valeurs en moyenne de F3 enregistrées pour les échantillons en contact avec des granites, laissent supposer une remobilisation du Sr. La tendance remarquée pour As, à l'enrichissement dans les micaschistes supérieurs semble se confirmer pour Sr, pour la majorité de ce groupe, mais moins nettement, toutefois.

— **Plan F1/F4** (fig. 7a) : L'axe 4 montre un net enrichissement en Be pour les micaschistes du sondage. Les épontes des filons à quartz/ferberite montrent en général des valeurs plus faibles que le reste de la population. Les micaschistes supérieurs sont en moyenne plus riches en Be que les micaschistes inférieurs.

— **Plan F1/F5** (fig. 7b) : L'axe 5 montre un net enrichissement en W pour les micaschistes du sondage mais pas de distribution préférentielle marquée entre le panneau supérieur et les panneaux inférieurs.

— **Conclusions** : Li, F, Rb, Sn comme cela a été déjà souligné précédemment sont les éléments qui marquent le mieux l'activité hydrothermale péligranitique et discriminent le mieux les grandes familles, à savoir : les micaschistes pas ou peu touchés par les apports (Lalizolle, Colettes), les micaschistes de l'auréole de dispersion hydrothermale du granite de Beauvoir, les micaschistes des épontes des filons à quartz ferberite ou aplite et les micaschistes au contact des corps granitiques.

Aucune limite précise n'existe entre ces deux derniers types d'échantillons. Pour les micaschistes du sondage des enrichissements sont notés pour As, Be, W et à degré moindre pour Sr. Il semblerait qu'il existe pour As, Be, Sr des enrichissements plus marqués pour le panneau supérieur que pour les panneaux inférieurs, sauf pour le W dont la distribution des teneurs semble plus quelconque.

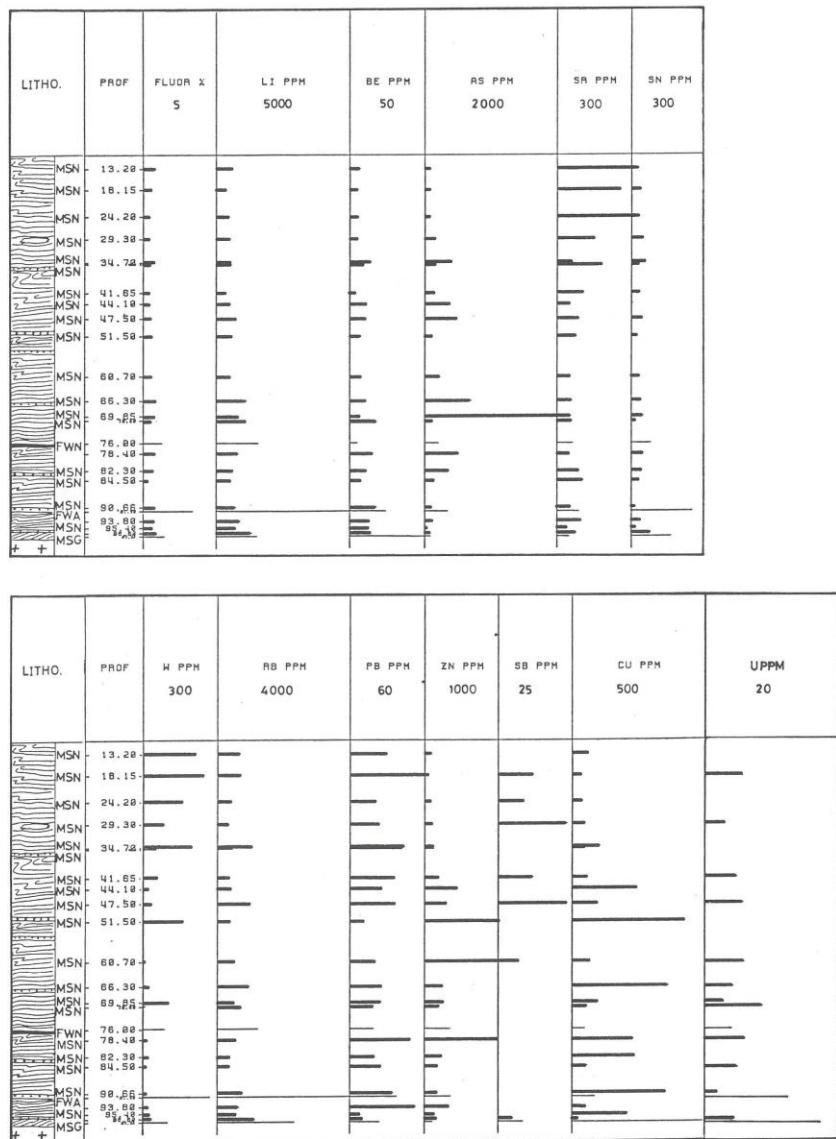


Fig. 8a. - Log géochimique des micaschistes du panneau supérieur (13 à 98m)

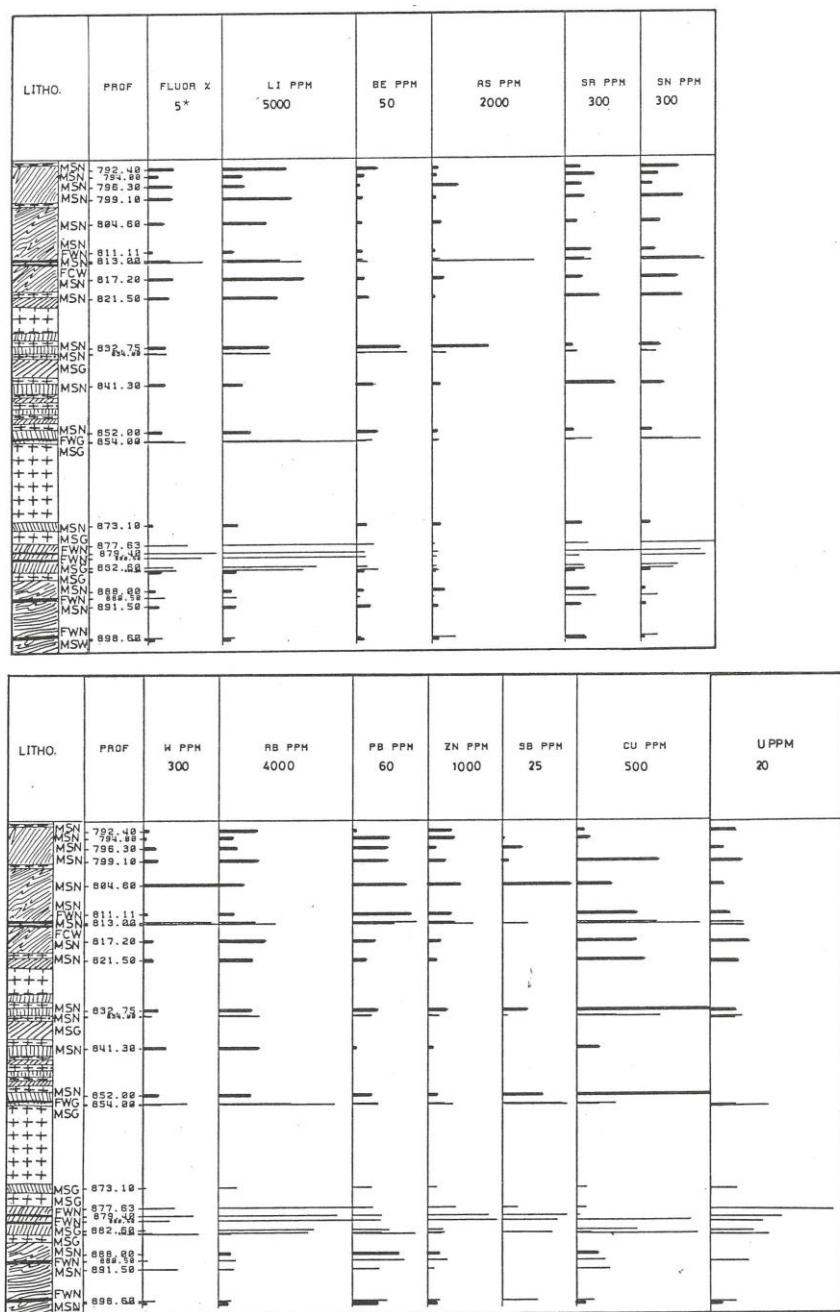


Fig. 8b. — Log géochimique des micaschistes des panneaux inférieurs (790 à 900 m) pour les éléments liés à l'environnement périgranitique et les éléments chalcophiles.

Les micaschistes hors de tout contact visible (MSN) sont surchargés.

Les abréviations sont les mêmes que pour le tableau 2.

* Valeur correspondant à la borne supérieure choisie pour les teneurs.

Geochimical log for selected elements (perigranitic environment and chalcophile elements).

Micaschists without visible contact with intrusive bodies or veins are showed by heavyline.

The labels are the same as those of table 2.

*Figure corresponding to selected maximum value of diagram.

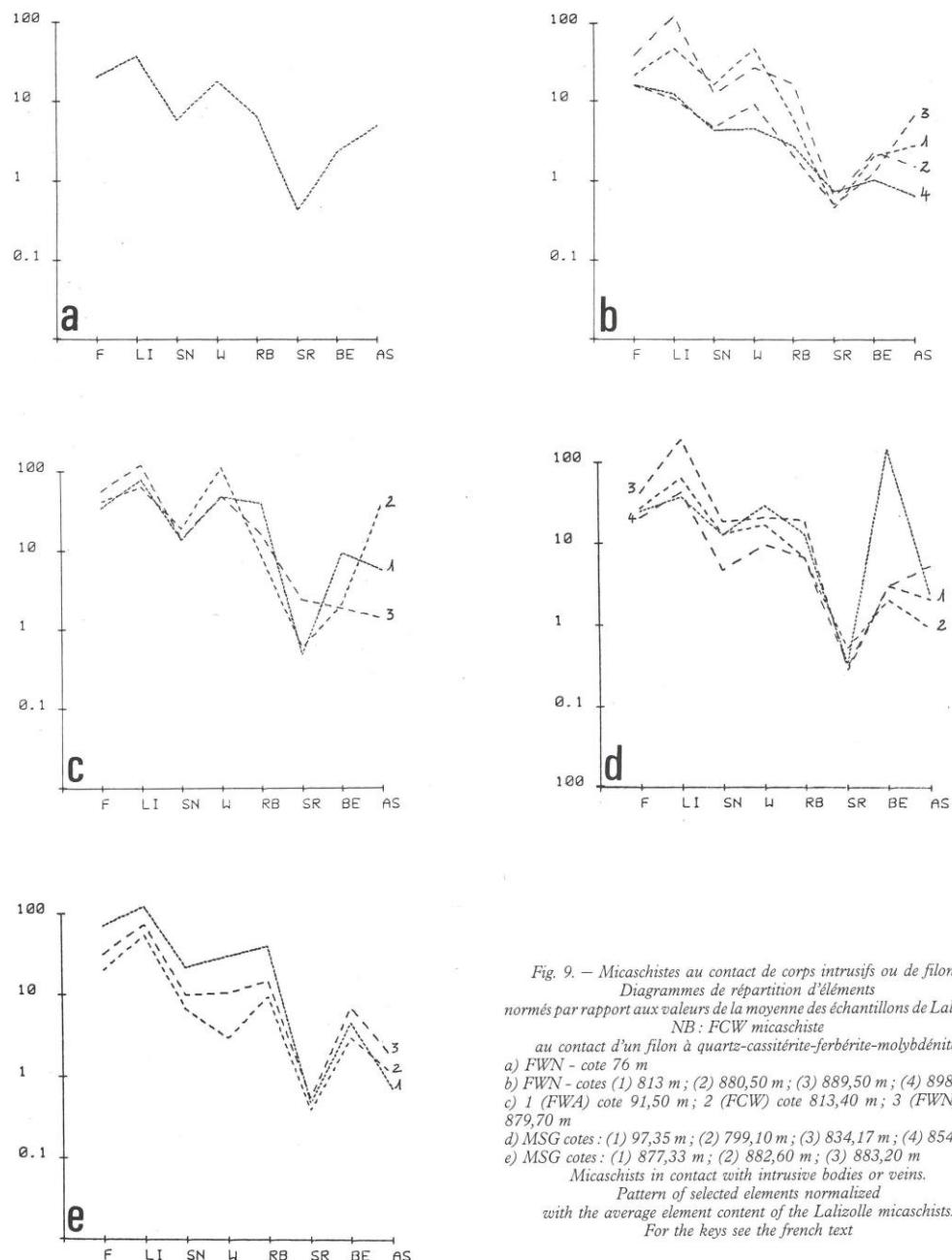


Fig. 9. — Micaschistes au contact de corps intrusifs ou de filons.
Diagrammes de répartition d'éléments
normés par rapport aux valeurs de la moyenne des échantillons de Lalizolle.
NB : FCW micaschiste

au contact d'un filon à quartz-cassiterite-ferbérrite-molybdénite.
 a) FWN - cote 76 m
 b) FWN - cotes (1) 813 m ; (2) 880,50 m ; (3) 889,50 m ; (4) 898,50 m
 c) 1 (FW4) cote 91,50 m ; 2 (FCW) cote 813,40 m ; 3 (FWN) cote 879,70 m
 d) MSG cotes : (1) 97,35 m ; (2) 799,10 m ; (3) 834,17 m ; (4) 854,20 m
 e) MSG cotes : (1) 877,33 m ; (2) 882,60 m ; (3) 883,20 m

Micaschists in contact with intrusive bodies or veins.
Pattern of selected elements normalized
with the average element content of the Lalizolle micaschists.
For the keys see the french text

3.5. – Étude de quelques éléments du log géochimique (fig. 8a et b)

Les variations conjuguées de F, Li, Sn, Rb, mises en évidence par les études statistiques, sont très bien illustrées par l'étude comparative des teneurs dans le sondage. Les valeurs de ces éléments sont en moyenne plus élevées dans les panneaux des micaschistes inférieurs sauf en fond de sondage vers 888 m où les teneurs tendent à baisser. Elles augmentent de façon sensible aux épontes des filons et des corps granitiques. Une croissance modérée des teneurs est toutefois à noter près du contact avec la partie supérieure du granite du Beauvoir. L'U montre des valeurs assez bien corrélées avec les éléments précédents. Le W présente, quant à lui, des teneurs assez contrastées tout au long du sondage avec une valeur très fortement anomale à 804,60 m (683 ppm). Une tendance aux fortes teneurs est à remarquer dans le panneau supérieur entre 0 et 34,70 m. Comme pour les éléments précédents les valeurs de W augmentent aux épontes des filons et des corps granitiques. Au contraire les éléments F, Li, Sn, Rb et Be montrent une tendance aux valeurs plus fortes et plus régulières dans les micaschistes supérieurs. A l'exception d'une très forte anomalie en Be à 277 ppm au contact de la partie supérieure du granite de Beauvoir, anomalie dont il sera important de déterminer le support minéralogique et la liaison éventuelle avec le corps granitique à Be de Beauvoir, le Be ne présente pas de variations très marquées à son approche. Quelques rares valeurs anomalies sont à remarquer aux cotes 832,75 et 834 m. Sauf dans les cinquante premiers mètres où il montre des valeurs élevées et une décroissance régulière, le Sr présente une répartition assez aléatoire de ses teneurs dans le reste du sondage. Les teneurs des éléments chalcophiles, à l'exception du Cu, se répartissent de manière aléatoire tout au long du sondage. Pour le Cu, hormis une très grande variation des teneurs qui se regroupent par passes, par exemple, entre 811,11 et 820,50 m, une croissance des teneurs est à remarquer à l'approche du contact avec le sommet de Beauvoir. As montre des teneurs globalement plus élevées dans le panneau supérieur.

3.6. – Géochimie comparative des micaschistes aux épontes des filons à quartz et des corps granitiques

Seuls les éléments reconnus comme marqueurs déterminants de l'activité hydrothermale granitique au cours de cette étude ou au cours de travaux antérieurs ont été pris en considération. Les spectres établis (fig. 9) permettent de visualiser les analyses et d'apprécier les tendances vis-à-vis de la base choisie : les schistes de Lalizolle. Pour les épontes des filons à ferberite et quartz, l'observation des spectres montre la grande étendue de la variation des éléments étudiés. Les valeurs en F, Li, Sn, W (fig. 9a et b) montrent des variations assez bien conjuguées. La répartition du Be et surtout de As semblent aléatoires. Les valeurs du Sr sont systématiquement inférieures à 1 et plaident en faveur du lessivage de cet élément. Remarquons que les valeurs les plus faibles sont obtenues pour un filon à ferberite pris à la cote 898,50 m non loin de la base du forage (900 m) et qu'il n'existe aucune différence notable entre les échantillons se trouvant au-dessus de la lame de granite et ceux situés au-dessous.

Les échantillons bien typés au cours de l'étude pétrographique ont été mis sur un diagramme à part (fig. 9c). Ils montrent qu'un contrôle évident existe entre la nature de la minéralisation et la géochimie du schiste des épontes. Ainsi, on doit noter : de fortes teneurs en F et Li pour l'échantillon de la cote 879,70 m qui montrait un fort développement de la topaze et de la biotite ; des teneurs remarquables en Rb et Be pour l'échantillon de la cote 91,50 m pris à l'éponte d'un système à aplite ferberite ; des teneurs élevées en W et As pour l'échantillon de la cote 813,40 m pris à l'éponte d'un filon à cassiterite-ferberite-mispickel.

L'observation des spectres de la figure 9d et e, visualisant les analyses des micaschistes pris aux épontes des corps granitiques, montrent les mêmes tendances que précédemment. Les teneurs en W et en As sont en moyenne plus faibles que pour les épontes des filons à ferberite ; au contraire, les teneurs en Be sont en général plus élevées. Le Sr présente toujours une tendance faiblement négative. Un seul échantillon tranche nettement par sa teneur en Be (277 ppm). Il correspond à un échantillon pris à 97,35 m dans les schistes au contact supérieur du granite du Beauvoir. Aucune observation microscopique, si ce n'est le développement d'une altération hydrothermale poussée (minéraux phylliteux) ne permet à présent de justifier cette teneur.

4. – Synthèse des données

Les données pétrographiques rassemblées ne permettent pas, aussi bien au niveau des micaschistes, qu'au niveau des filons, de discriminer des paragenèses tranchées pouvant appartenir à l'un ou à l'autre des événements hydrothermaux possibles : (1) Bosse-Colettes et (2) Beauvoir. L'expression de leur minéralogie est, sur le site de Beauvoir, hormis la wolframite appartenant à un stade antérieur, probablement très voisin. Les premiers résultats obtenus sur les inclusions fluides des topazes associées aux filons à ferberite montrent des caractéristiques physico-chimiques comparables à celles du granite du Beauvoir (Aissa, 1987 et Aissa et al., ce volume). L'étude par statistique multivariable, ACP, permet de distinguer, au niveau du comportement des éléments, deux tendances marquées qui s'individualisent par deux axes majeurs : l'image de la composition minéralogique préhydrothermale soulignée par MgO, Cr, La, Ce, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, V (bien que présentant un comportement voisin, le Be et Sr se démarquent nettement de cette image) ; l'image des apports hydrothermaux soulignée par Rb, Li, F, Sn auxquels il faut ajouter W et U qui se démarquent légèrement.

Bien que faisant partie des éléments hydromagmatophiles caractéristiques des intrusions leucogranitiques (L. Burgnol, 1972), le Be montre un comportement indépendant vis-à-vis du groupe : F, Li, Sn, Rb. Du fait de son comportement peu contrasté aucune association caractéristique tranchée avec un élément majeur déterminant d'un minéral précis porteur de Be n'a été mis en évidence. Seules des liaisons faibles sont apparues entre le Be d'une part et P₂O₅, MnO, Zn d'autre part.

L'étude du log géochimique confirme les observations faites sur les plans discriminants, qu'elle complète par une vision spatiale du comportement.

Les teneurs en F, Sn, Li, Rb et U sont fortement dépendantes de la présence des corps intrusifs, granitiques recou-

pés par le sondage, ainsi, elles marquent l'approche du contact avec la partie supérieure du granite de Beauvoir par une légère augmentation de leurs teneurs et des valeurs en moyenne plus élevées pour les panneaux inférieurs sauf à la base du sondage où elles chutent dans le dernier panneau que l'étude structurale montre comme étant en place. Les teneurs en Be sont en moyenne plus élevées et plus régulières dans le panneau de micaschistes supérieurs. Sr et W montrent une distribution aléatoire, dans le sondage, sauf dans les 35 premiers mètres où ils présentent tous deux de fortes teneurs.

Les éléments chalcophiles, à l'exception du cuivre dont la teneur semble indiquer une augmentation à l'approche de la coupole de Beauvoir, ont des distributions aléatoires. L'As montre, malgré tout, des valeurs en moyennes plus élevées pour le panneau de micaschistes supérieurs. En conclusion, des différences se dessinent au sein de la population avec dans les micaschistes du panneau supérieur des teneurs en moyenne plus élevées en As, Be, Sr que dans les panneaux du bas et surtout le panneau le plus basal du forage.

L'étude comparative au niveau des éléments caractéristiques de l'activité granitique, entre les micaschistes des éponges des filons du stockwerk de la Bosse et ceux des corps granitiques ne fait pas apparaître de tendances permettant de discriminer une signature géochimique précise. Pour le Be on retiendra simplement un fond en général plus élevé pour les environnements granitiques et une très forte anomalie (277 ppm) dans des micaschistes présentant une altération hydrothermale bien développée au contact supérieur du granite de Beauvoir.

5. — Discussions

La forte homogénéité de comportement trouvée entre F (particulièrement abondant à Échassières) d'une part, et Rb, Li, Sn, d'autre part souligne l'aptitude de cet halogène à se fractionner dans la phase fluide issue du granite. De tels résultats pour ces éléments laissent supposer des néoformations minérales et des rééquilibrages des minéraux préhydrothermaux sous l'influence hydrothermale. Ainsi, les néoformations de phyllites pour le F, le Rb, la topaze pour F. La décoloration de la biotite assez fréquente au contact des granites et des filons laisse supposer une incorporation de Li, F dans le réseau de la biotite métamorphique conformément à la série sidérophyllite-zinnwaldite (Foster, 1960 et analyses microsonde in Tegley, 1985). Pour Sn l'absence de support identifié laisse supposer son incorporation dans les sulfures, les oxydes comme le rutile et dans le réseau des micas.

Le fait que le W se démarque de ce groupe pourrait s'expliquer : soit par l'intervention d'autres agents susceptibles de former des complexes anions-cations assurant le transport, par exemple le Cl (Weisbrod, 1986), soit par l'existence d'une première dispersion en W liée à la mise en place de la Bosse-Colettes plus ou moins oblitérée dans les échantillons du sondage par l'épisode de reprise et dispersion accompagnant la mise en place du granite de Beauvoir.

Il faut remarquer que dans la région de Panasqueira au Portugal, Oosterom et al. (1984) trouvent au cours de leur étude des auréoles géochimiques liées à la mise en place d'un stockwerk à wolframite et d'un granite à deux micas, une image tout à fait comparable pour ces éléments.

L'U montre une simulation de comportement par l'ACP assez voisine à celle du W. Une plus grande dispersion des résultats doit être mise en relation avec son lessivage différentiel par des solutions oxydantes supergénèses (Cuney et al., 1985), surtout dans les cinquante premiers mètres du sondage.

Le cas de Be qui se démarque nettement des autres éléments liés à l'activité hydrothermale périgranitique de Beauvoir pourrait comme précédemment s'expliquer par une histoire complexe faite de plusieurs épisodes hydrothermaux et par sa moins grande disponibilité au cours des épisodes granitiques ultimes.

Si l'on reprend les travaux de Voncken et al., 1986, sur le granite à Sn et W de Regoufe au Portugal, le Be se corrèle très faiblement avec les autres éléments, le meilleur coefficient est donné par son couple avec F (0,48). Dans notre étude, les meilleurs coefficients sont trouvés pour le Rb, le Li et le F avec respectivement 0,43, 0,37 et 0,35. Cette faible association avec les éléments liés à l'activité hydrothermale périgranitique montre que, comme au sein des corps leucogranitiques, cet élément est mobile très tôt et tout au long de l'évolution du complexe granitique. Ceci est tout à fait en accord avec les résultats analytiques trouvés pour les éponges du système filonien de la Bosse qui montrent des teneurs en Be, en général, plus basses que le reste des micaschistes du site de Beauvoir. Du point de vue minéralogique, aucun élément caractéristique d'une expression minéralogique donnée ne s'accorde avec cet élément, seules quelques faibles liaisons existent avec P_2O_5 , MnO et Zn. Ceci pourrait être le fait d'une minéralogie complexe du Be par le nombre des espèces possibles, mais somme toute, banale au niveau des éléments majeurs associés. De plus remarquons que le rayon ionique du Be : 0,35 Å en coordination IV est comparable à celui de Si : 0,34 Å au même niveau de coordination (Whittaker et Muntus, 1970) et que sa forte ressemblance cristallochimique avec ce dernier (Ross, 1964 ; Krecji, 1966), rend possible des substitutions entre ces deux éléments dans les trames silicatées ; malheureusement le numéro atomique très faible de cet élément rend son dosage à la microsonde impossible et l'hypothèse n'a pu être prouvée, il a été toutefois dosé jusqu'à 200 ppm dans les micas séparés de Beauvoir (Monier et al., ce volume).

La faible liaison du B, qui est souvent un élément caractéristique des séries sédimentaires, avec les variables liées à la minéralogie du schiste conduit à supposer sa remobilisation lors de la mise en place des corps granitiques, eux-mêmes à très faible teneur en B (Rossi et al., ce volume) (plusieurs générations de tourmalines ?). Il en est de même pour le Sr.

De plus les éléments chalcophiles des micaschistes sont probablement, à des degrés divers, remaniés comme le montre l'enrichissement en As sur le site de Beauvoir et l'augmentation globale des teneurs en Cu à l'approche du sommet de la lame de Beauvoir. Les résultats trouvés sur les éléments chalcophiles sont tout à fait cohérents avec les résultats déjà mis à jour par les cartographies géochimiques de surface (Aubert, 1969 ; Burnol, 1972 ; Burnol et Viallefond, 1984 ; Viallefond, 1985).

Les augmentations notables et corrélées constatées pour les teneurs en W et Sr dans les 35 premiers mètres peuvent s'expliquer d'une manière simple en termes de mobilisation et de dispersion de métaux, depuis la zone chaude interne de l'auréole thermique où les éléments sont mobilisés et disper-

sés, vers la partie externe où la chute des températures favorise la précipitation.

Un fait remarquable est à souligner dans le cas de Beauvoir, contrairement à de nombreuses auréoles périgranitiques décrites (Beer et Ball, 1986), le Sn ne montre aucune variation conjuguée avec le W ce qui conduit à admettre une évolution polyphasée, ou une mobilité limitée de Sn au stade subsolidus du granite de Beauvoir apical, par suite de l'augmentation décelée de $f\text{O}_2$ à ce stade (Cuney et Brouand; Cuney et Autran, ce volume).

Aussi bien la grande diversité des phases hydrothermales présentes dans les micaschistes et dans les filons du stockwerk de la Bosse, confirmée par l'étude des inclusions fluides (Aïssa, 1987), que la grande variabilité des éléments caractéristiques des phases minéralisantes laissent supposer une reprise générale du système hydrothermal antérieur par les fluides issus du granite de Beauvoir (s.l.).

6. — Conclusions

Cette étude a permis de mettre en évidence dans les micaschistes du sondage du Beauvoir :

- 1) Le comportement très contrasté de Be vis-à-vis des autres éléments caractéristiques d'un environnement péri-granitique (F, Li, Rb, W); ce comportement pourrait s'expliquer par son extrême mobilité au cours de l'histoire hydrothermale et les variations possibles dans son mode de transport, une minéralogie complexe répondant à des facteurs physico-chimiques variés, un rayon ionique et une cristallochimie voisine de celle de Si.
- 2) L'absence de signature géochimique spécifique précise dans les micaschistes des épontes des passées granitiques recoupées par le sondage par rapport aux filons du système de la Bosse; ce phénomène semble découler de la reprise générale du système hydrothermal antérieur, la Bosse-Colettes, par les fluides issus de l'épisode Beauvoir.
- 3) La chute des teneurs en F, Li, Rb, Sn dans les dix derniers mètres du sondage qui peut marquer la décroissance de l'activité granitique de type Beauvoir dans les micaschistes; mais ce phénomène n'a été constaté que dans les dix derniers mètres du dernier panneau considéré comme en place d'après des données structurales régionales. Il est à remarquer que ces teneurs sont assez comparables aux valeurs enregistrées pour les micaschistes les plus superficiels.

Références bibliographiques

AÏSSA M. (1987). — Reconstitution d'un système de paléocirculations hydrothermales et de ses conséquences métallogéniques : le

district d'Échassières (Massif central français). Thèse INPL, Nancy, 249 p.

AUBERT A. (1969). — Les coupoles granitiques de Montebas et d'Échassières (Massif central français) et la genèse de leur minéralisation en étain, lithium, tungstène et beryllium. *Mémoire du BRGM Fr.*, n° 46, 349 p., 2 vol.

BURNOL L. (1974). — Géochimie du beryllium et types de concentration dans les leucogranites du Massif central français. Mémoire du BRGM Fr., n° 85, 168 p., 2 vol.

BURNOL L., VIALLEFOND L. (1984). — Géochimie complémentaire en sol à Échassières. Résultats préliminaires. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 81-8, pp. 57-86.

BEER K.E., BALL T.K. (1986). — Tin and tungsten in pelitic rocks from S-W England and their behaviour in contact zones of granites and in mineralized areas. In the Annual conference of the Usser Society.

CUNY M., FRIEDRICH M., DRIN N. (1985). — Traitement par l'analyse statistique de données multivariées sur le complexe de Brame — Saint-Sylvestre — Saint-Goussaud (Limousin, France). Différenciation magmatique et polygénisme. In « Data processing in geochemistry and in engineering Geology ». Sci. de la Terre, Ser. Inf. Geol., Nancy, n° 23, pp. 1-25.

FOSTER D.M. (1960). — Interpretation of the composition of lithium micas. *Geol. Surv. Prof. Paper* 354-E, 147 p.

KRECJI L.E., SCHEEL L.D. (1966). — The chemistry of beryllium. In : H.E. Stokinger (Editor), *Beryllium. Its Industrial Hygienic aspect*. Academic Press. New York, pp. 45-133.

MONIER G., TEGEY (1985). — La pétrographie des différents faciès. Étude pétrographique préliminaire. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 100, pp. 58-93.

OOSTEROM M.G., BUSSINK R.W., VRIEND S.P. (1984). — Litho-geochemical studies of aureoles around the Panasqueira Tin-Tungsten deposit, Portugal. *Mineral Deposita*, **19**, pp. 283-288.

ROSS M. (1984). — Crystal chemistry of beryllium. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, n° 468, 30 p.

ROUTHIER P. (1963). — Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherche. 2 tomes, Masson, 1282 p.

VIALLEFOND L. (1985). — Application de la classification hiérarchique ascendante au traitement des résultats de géologie sol à l'aplomb de l'apex granitique d'Échassières-Beauvoir. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 95-8, pp. 125-135.

VONCKEN S.H.L., VRIEND S.P., KOCKEN J.W.M., JANSEN J.B.H. (1986). — Determination of beryllium and its distribution in rocks of the Sn-W granite of Regoufe, Northern Portugal. *Chemical geology*, **56**, pp. 93-103.

WEISBROD A. (1986). — Caractères généraux des phases fluides dans les indices et gisements de tungstène et d'étain dans les facteurs de concentration des matières premières minérales. Colloque PIRSEM 86, pp. 89-92.

WHITTAKER E.J.W., MUNTUS R. (1970). — Ionic radii for use in geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **34**, pp. 945-956.