

Le stockwerk à ferberite d'Échassières : évolution spatiale et temporelle ; cristallochimie des ferberites

M. Aïssa ⁽¹⁾, Ch. Marignac ⁽²⁾, A. Weisbrod ⁽¹⁾⁽³⁾

Mots-clés : Stockwerk (Tungstate), Ferberite, Hübnerite, Cristallochimie, Tungstène substance, Columbite, Zonalité, Allier (Échassières).

Résumé

Le stockwerk à ferberite d'Échassières s'est mis en place en trois stades, de façon pénécontemporaine de l'intrusion d'aprites et d'aplo-pegmatites (stockscheiders), formant elles-mêmes un stockwerk, et représentant vraisemblablement des manifestations de l'hypothétique granite de la Bosse, dont l'existence est postulée en profondeur pour rendre compte de celle de la minéralisation tungstifère. Par rapport à ce granite, il semble que le stockwerk occupe une position plus distale que celle de la plupart des minéralisations péritholiques de même type connues dans la chaîne hercynienne.

Les ferberites ($\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mn} \approx 0,75$) sont riches en niobium (couramment entre 0,5 et 1,5 % Nb_2O_5) et pauvres en tantale (généralement 0,1 %) ; elles correspondent essentiellement à une solution solide (ou à des syncristallisations infra-micrométriques) entre ferberite et ferrocolumbite, mais une petite partie (généralement moins de 5 %) du fer s'y trouve sous forme de Fe^{3+} .

Les teneurs en niobium varient au cours du temps, chaque stade de minéralisation montrant apparemment une séquence cristaux zonés riches en niobium-cristaux non zonés plus pauvres ; en revanche, le taux de ferberite reste remarquablement encaissantes.

Il y a de plus une nette zonation verticale des compositions : avec la profondeur, les ferberites s'appauvrissent en Fe^{3+} et en niobium, tandis que le taux de ferberite augmente (jusqu'à $\approx 0,95$) ; ces phénomènes reflètent vraisemblablement la plus grande proximité du granite de la Bosse.

L'intrusion du granite de Beauvoir, connu depuis longtemps pour recouper le stockwerk, induit des circulations hydrothermales qui ont, sur le stockwerk, des effets considérables. Les filons de quartz sont envahis et corrodés par une topaze tardive, à laquelle succèdent des micas, lithinifères puis phengitiques. Des micro-cavités de dissolution se développent dans les ferberites, remplies de quartz, zircon, micas, et, localement de « columbite » riches en W (jusqu'à ≈ 8 % WO_3), tantale (jusqu'à ≈ 5 % Ta_2O_5) et titane (jusqu'à ≈ 4 % TiO_2) ; en même temps, des transformations en wolframite et hübnerite ont lieu sporadiquement à la faveur de circulations fissurales et de diffusions à partir de la périphérie des cristaux.

Abstract

The ferberite stockwerk at Échassières : spatial and temporal evolution ; crystal chemistry of ferberites.

The ferberite stockwerk at Échassières was formed in three stages, penecontemporaneously with the emplacement of a stockwork of aprites and aplo-pegmatites (stockscheiders). These magmatic rocks are probably related to a hypothetical granite body (Bosse granite), the existence at depth of which is currently postulated in order to explain the tungsten mineralizing event. Relatively to this granite, the Échassières stockwerk is probably in a more distal position than most of the similar peritholitic quartz-wolframite deposits in the hercynian belt.

The ferberites ($\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mn} \approx 0,75$) are Nb-rich (currently in the range 0.5–1.5 % Nb_2O_5) and Ta-poor (usually 0.1 % Ta_2O_5). This is due to solid solution (or submicrometric imbricated growth) between ferberite and ferrocolumbite ; there is however some Fe^{3+} (currently < 5 % total iron).

Niobium content was time dependent : at each mineralization stage is observed the succession Nb-rich zoned crystals-Nb-poorer unzoned crystals. To the contrary, ferberite ratio is very constant at a given locality : this fact suggests a local control of the ratio, for instance by the surrounding rocks composition.

Compositions display great variations downwards : impoverishment in Fe^{3+} and niobium ; increasing of the ferberite ratio (up to $\approx 0,95$). These changes are thought to reflect the increasing proximity of the Bosse granite.

Intrusion of the late Beauvoir granite has strong effects upon the stockwerk. Quartz veins are invaded by topaze, quartz being dissolved and not ferberites, then by micas (first lithiniferous, then phengitic). Corrosion microcavities within the ferberites are filled with quartz, zircon, micas, and, locally, a Ta-Ti-W-rich « columbite » (up to ≈ 5 % Ta_2O_5 , ≈ 4 % TiO_2 and ≈ 8 % WO_3) ; meanwhile, ferberites are changed by place into wolframite or even hübnerite, along fissure zones, or from the crystal rims.

(1) Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, BP 9, 54501 Vandœuvre-les-Nancy ;

(2) École des Mines de Nancy, 54042 Nancy Cedex

(3) École de géologie, BP 452, 54001 Nancy Cedex

Outre le granite de Beauvoir lui-même, le district d'Échassières comprend trois formations minéralisées : les filons à cassitérite-topaze des Chaillats, au Sud du complexe granitique, les filons à quartz-hübnerite du Mazet, au Nord du granite des Colettes, et le stockwerk à ferberite d'Échassières, affleurant au Sud du granite des Colettes (stockwerk de la Bosse), et retrouvé en profondeur par le sondage Échassières 1 (Cuney et al., 1986; Cuney et al., *ce volume*).

Ce stockwerk, étudié dans sa zone d'affleurement par de Rosen (1965, 1966), Aubert (1969), Jacquot (1984) et Aïssa (1987), est recoupé par le granite des Colettes et par le granite sodolithique de Beauvoir, son existence est classiquement rapportée à l'intrusion d'un granite non-affleurant, le granite de la Bosse (Aubert, 1969), dont l'existence reste hypothétique, dans la mesure où le sondage profond ne l'a toujours pas rencontré.

1. — Présentation du stockwerk

a) Le stockwerk de la Bosse.

Le stockwerk se présente actuellement comme un réseau de filons quartzeux plats, subconcordants à la schistosité des micaschistes, dont la puissance peut atteindre quelques décimètres (jusqu'à 0,6 m), et de filons plus redressés, et généralement moins puissants (jusqu'à 0,2 m), qui les relient entre eux, et se relaient. Ce réseau est relativement réglé; il a été proposé qu'il représente en fait un système de « semi cone sheet » en relation avec l'hypothétique granite de la Bosse (Jacquot 1984; Jacquot et Gagny 1985); le modèle prévoyait toutefois la présence de ce granite à une profondeur modérée, et n'a pu encore être vérifié par les résultats du sondage profond, qui n'a en effet traversé qu'une épaisseur cumulée de 160 m de stockwerk, dilaté par la mise en place ultérieure du granite de Beauvoir (Cuney et al., *ce volume*).

L'absence d'altérations aux épontes des filons minéralisés est un fait remarquable; on a toutefois observé le développement sporadique et discret de micas bruns probablement lithinifères aux épontes de certaines veines.

Les filons du stockwerk recoupent des filons microgranitiques et lamprophyriques précoces, et sont eux-mêmes recoupés par les granites des Colettes et de Beauvoir (Aubert, 1969). Ils sont pénécemporains d'une génération de granites fins, aplites, aplopegmatites (stockscheiders : Jacquot 1984) et pegmatites, intrusifs dans le même réseau de fractures que le stockwerk, et qui représentent peut-être des manifestations distales de l'hypothétique granite de la Bosse, dont l'existence trouverait ainsi une justification objective. Ils représenteraient, d'après Jacquot (1984) et Jacquot et Gagny (1985), le résultat d'une « subsidence en chaudron », mais certaines observations suggèrent aussi bien une ouverture de joints préexistants sous la pression du magma (fig. 1). Par rapport à ce stade intrusif, d'ailleurs polyphasé, il est en fait possible d'identifier trois générations successives de veines minéralisées (Aubert 1969; Aïssa 1987) (tabl. 1, fig. 1).

A chaque génération, s'expriment des filons plats et des veines plus redressées, dont l'ouverture semble simultanée : les deux groupes sont, en effet, remplis de façon pénécemporaine sans intersections nettes (observation également réalisée par Jacquot 1984); c'est là l'indication que leur ouverture a eu lieu simultanément, sous l'effet de la surpres-

	PHENOMENES HYDROTHERMAUX	PHENOMENES MAGMATIQUES	
TEMPS	Veinules et pseudo-greisen à micas plus ou moins lithinifères (?), avec rare ferberite 4	Aplites (place imprécise)	STADE BEAUVOIR
	Veines et pseudo-greisen à topaze		
	Veines à quartz-ferberite 3 Greisens quartzo-micacés (+topaze) Veines à quartz-ferberite 2	Pegmatites Aplites et aplopegmatites b Aplites et aplopegmatites a Granites fins à muscovite	STADE ROSEN
	Veines à quartz-ferberite 1	Microgranites Lamprophyres	

Tabl. 1. — Chronologie relative des événements magmatiques et hydrothermaux dans le stockwerk d'Échassières.
Relative chronology of magmatic and hydrothermal events in the Echassières stockwerk.

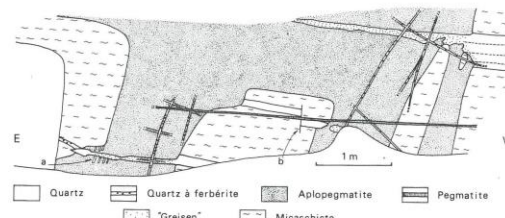


Fig. 1 — Chronologie des manifestations filoniennes par rapport aux intrusions aplopegmatiques (carrière de la Bosse, niveau 2, détail du parement).

L'aplopegmatite est postérieure à un réseau filonien quartzeux plat, localement à ferberite (ferberite 1), qu'elle recoupe, enclave, ou enveloppe, le quartz, partiellement dissous, se comportant alors comme un écran, sur lequel paraissent localement se développer les feldspaths plumeux caractéristiques de l'aplopegmatite (a); ce dispositif peut suggérer un phénomène de « subsidence en chaudron » (Jacquot 1984; Jacquot et Gagny 1985), mais est également compatible avec une injection forcée de magma en surpression dans le réseau des fractures préexistantes.

De façon remarquable, les quartz « emballés » dans l'aplopegmatite se présentent actuellement comme des « greisens » quartzo-micacés; ils sont recoupés par des veines de quartz à ferberite (ferberite 3), qui viennent localement réouvrir les anciennes veines plates. Une pegmatite centimétrique à feldspaths « en peigne » recoupe l'ensemble du dispositif; en (b), on observe qu'elle est postérieure à une petite fracture subverticale à N100°E, qui affecte un filon quartzeux plat.

Relationships between aplo-pegmatites and mineralized quartz veins (Bosse quarry, level 2).

The aplo-pegmatite dike post-dates a first set of flat-lying quartz veins, locally with ferberite (ferberite 1); quartz is partially dissolved, and forms screens upon which plumose feldspars are locally growing (a). This may be interpreted as « cauldron subsidence » related (Jacquot 1984, Jacquot and Gagny 1985) or as magma forcing into a preexisting set of joints as well. Incorporated quartz has been transformed into a greisen; it is crosscutted by late quartz-ferberite veinlets (ferberite 3), locally reopening the old flat lying ones. A late pegmatite veinlet crosscuts the whole system; in (b) it is seen to post-date a vertical N100°E fault.

sion induite par les fluides hydrothermaux, comme dans d'autres gisements de tungstène péritholotiques du Massif central (Derré 1983; Nicolas 1985) ou du Portugal (Kelly et Rye 1979). Dans le détail cependant, cette ouverture apparaît polyphasée, saccadée, selon une logique de « fracturation-colmatage » (« crack-seal », Ramsay 1980) (fig. 2a, b, c).

En outre, d'une génération à l'autre, s'observe la réouverture (par « fracturation-colmatage ») de veines préexistantes, aussi bien redressées (fig. 2d) que plates : si bien qu'il est difficile, sur un échantillon donné, d'assigner un stade précis de formation à des cristaux de ferberite; des observations

comme celles de la figure 1 confirment bien en revanche l'existence de plusieurs générations de ce minéral.

Les directions filoniennes sont multiples mais une direction N10-N50°E semble prédominer parmi les filons redressés (de Rosen 1965; Jacquot 1984); sur la base d'observations limitées par l'exiguïté des affleurements, il semble toutefois que ceux du stade 1 se différencient par leur pendage (40 à 60°W) de ceux des stades suivants (60 à 80°E) qui paraissent les plus représentés, et qui se parallélisent aux directions des intrusions apliques, etc.

Des fractures affectent le stockwerk: failles raides à composante normale, conjuguées selon N20-40°E et N140-160°E; rejeux cisailants des épontes des filons plats, décalant les veines redressées synchrones (ce phénomène, déjà observé par de Rosen (1965) est interprété par Jacquot (1984) comme significatif de la dynamique de mise en place des filons quartz eux-mêmes); leur âge n'est pas connu, mais certaines d'entre elles tout au moins paraissent relativement précoces (fig. 1).

Les filons minéralisés sont ultérieurement envahis de topaze, puis d'un mica bronzé probablement lithinifère (zinnwaldite? voir Monier et al., ce volume), suivi d'un mica blanc phengitique, en veinules, ou en plages monominérales qui remplacent le quartz, dissous (fig. 2e), ce qui démontre le caractère sous-saturé en quartz des fluides hydrothermaux responsables de ces « pseudo-greissens »; la ferbélite n'est

pas affectée par le stade à topaze, ce qui confirme l'inertie du tungstène relativement aux fluides de haute température riches en fluor (Manning et Henderson, 1984). Le tabl. 2 donne quelques analyses représentatives de ces topazes et micas.

Cet ensemble de manifestations est franchement tardif dans l'histoire du stockwerk, puisque les pegmatites qui recoupent toutes les minéralisations sont elles-mêmes affectées par les corrosions fissurales à topaze (tabl. 1). Il représente l'effet sur le stockwerk de l'intrusion du granite de Beauvoir riche en fluor, comme le supposait déjà de Rosen (1965, 1966) et comme le démontre l'étude des inclusions fluides (Aïssa 1987; Aïssa et al., ce volume). Des veinules d'aplite à mica blanc, qui recoupent toutes les autres manifestations magmatiques, sont peut-être la trace distale de cette même intrusion (Aubert, 1969).

La minéralisation est simple et se réduit à la seule ferbélite, localement associée à une « columbite » développée dans des micro-cavités de corrosion tardive (voir plus loin). L'absence de sulfures est, en particulier, complète.

b) Le stockwerk profond.

Le sondage profond a constamment recoupé des filons minéralisés de 0 à 97 m, jusqu'à rencontrer le granite de Beauvoir; les caractéristiques du stockwerk ne paraissent pas changer dans cette portion, y compris les orientations des

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	38.31	39.47	39.45	38.55	44.98	45.81	45.49	44.67	44.96	46.15
TiO ₂	1.07	1.23	1.47	1.30	0.61	0.72	0.56	0.13	0.15	0.00
Al ₂ O ₃	23.29	23.26	21.53	20.59	22.56	32.55	32.91	38.37	36.50	34.27
FeO	15.69	14.73	16.67	17.23	12.25	3.07	2.68	1.16	1.77	2.03
MnO	0.32	0.24	0.68	0.55	0.28	0.04	0.05	0.10	0.00	0.06
MgO	3.49	3.80	4.73	4.96	1.66	1.20	1.06	0.05	0.13	0.90
Na ₂ O	0.37	0.19	0.23	0.26	0.28	0.66	0.71	0.32	0.31	0.78
K ₂ O	10.10	9.80	9.92	9.89	10.19	10.71	10.90	10.97	10.90	10.57
F	3.57	4.22	5.08	4.82	8.19	3.12	3.18	1.46	1.19	1.87
	96.19	96.95	99.75	98.15	101.01	97.87	97.52	96.60	95.90	96.62
Si	2.91	2.96	2.95	2.94	3.29	3.11	3.10	2.98	3.02	3.11
Al ^{IV}	1.09	1.04	1.05	1.06	0.71	0.89	0.90	1.02	0.98	0.90
Al ^{VI}	0.99	1.02	0.84	0.79	1.23	1.71	1.74	1.98	1.92	1.82
Ti	0.06	0.07	0.07	0.07	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00
Fe ⁴⁺	1.00	0.93	1.04	1.10	0.75	0.17	0.15	0.07	0.10	0.11
Mn	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Mg	0.40	0.43	0.56	0.56	0.18	0.12	0.11	0.00	0.01	0.09
Na	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	0.08	0.09	0.04	0.04	0.10
K	0.98	0.94	0.95	0.96	0.95	0.93	0.95	0.94	0.94	0.91
F	0.86	1.00	1.32	1.16	1.89	0.67	0.69	0.31	0.25	0.40
OH	1.14	1.00	0.68	0.84	0.11	1.33	1.31	1.69	1.75	1.60
Fe/Fe+Mg	0.720	0.688	0.652	0.668	0.809	0.593	0.592	0.937	0.886	0.567

Tabl. 2. — A) Analyses représentatives des micas du stockwerk d'Échassières. Analyses à la microsonde électronique (CAMEBAX, BRGM Orléans) par D. Ohnenstetter. L'étalon du fluor est une topaze.

Micas bruns: 1-2 ECH 849.76 veine à quartz-topaze-micas-ferbélite
3-4 ECH 879.26 « biotitisation » d'éponte.

Micas bronzés: 5 ECH 66, stockwerk de la bosse, veinule recoupant la topaze.

Micas blancs: 6-7 ECH 65, stockwerk de la Bosse, veine tardive à ferbélite.

8-9 ECH 879.26 mica blanc intergranulaire dans le quartz
10 ECH 849.76 veine à quartz-topaze-micas-ferbélite.

Typical electron-probe analyses from micas in the Échassières stockwerk. Analyses performed on an electron-probe CAMEBAX (BRGM Orléans) by D. Ohnenstetter. Standard for fluorine is topaze.

Brown micas: 1-2 ECH 849.76 quartz-topaze-micas-ferberite veinlet
3-4 ECH 879.26 brown mica impregnation at the wall-rock

5 ECH 66, Bosse stockwerk, mica veinlet crosscutting topaze

White micas: 6-7 ECH 65, Bosse stockwerk, late mica-ferberite veinlet.
8-9 ECH 879.26 intergranular white mica within quartz

10 ECH 849.76 quartz-topaze-micas-ferberite veinlet

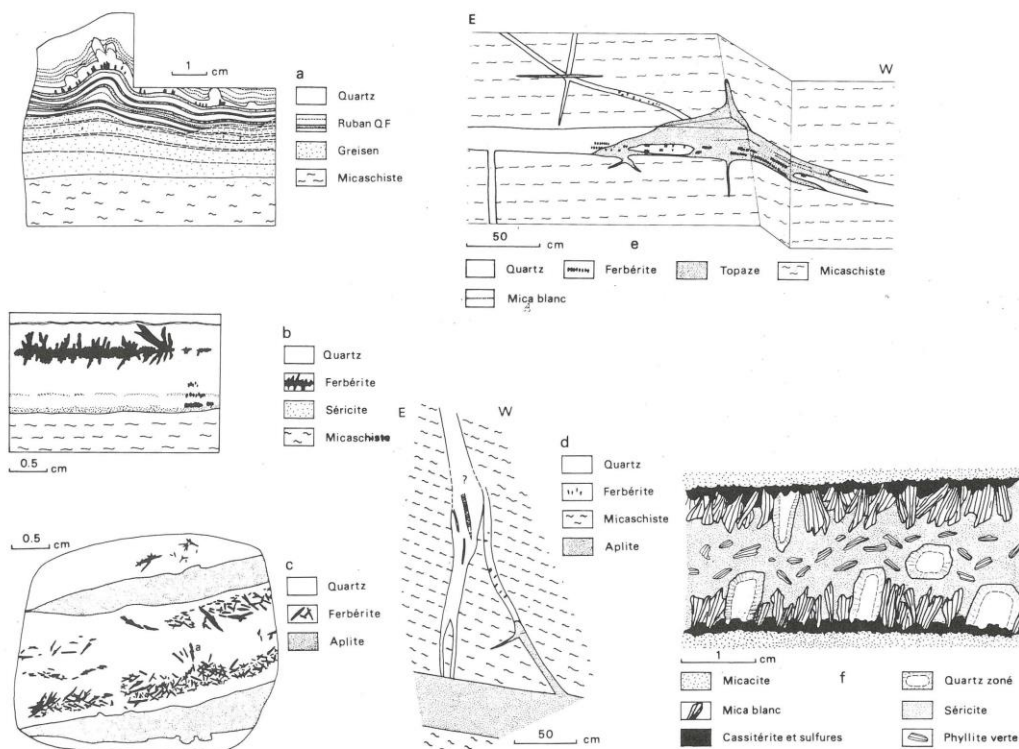


Fig. 2 — a, b, c. — Phénomènes de « fracturation-colmatage » dans la formation des veines à quartz-ferberite :

- a. ECH 2-4 : « fracturation-colmatage » dans une aplité (stage ferberite 2), dessin d'échantillon, un épisode de greisenisation s'est localement surimposé : il est donc postérieur à la ferberite 2 (mais antérieur à la ferberite 3, voir la figure 1) ;
 b. ECH 42.34 : croissance anti-taxique des ferberites à partir d'une paroi résiduelle, dessin d'après lame mince ; noter les reliques à séricite successivement détachées de la paroi de micaschiste, et la ferberite précoce fracturée de façon concomitante ;
 c. ECH 45 : ouvertures en « fracturation-colmatage » dans une aplité (stage ferberite 2), dessin d'après lame mince ; une première formation de quartz à aiguilles de ferberite est découpée par des lanières quartzueuses, éventuellement associées à un nouveau développement de ferberite (a).

« Crack-seal » phenomena in quartz-ferberite veins :

- a. ECH 2-4 : « crack-seals » within an aplité (ferberite 2 stage), sample drawing ; note the superimposed greisenisation ; greisenisation then postdates the ferberite 2 stage, but is earlier than ferberite 3 (see figure 1) ;
 b. ECH 42.34 : antitaxic growth of ferberites along a remnant screen, thin section drawing ; note the sericite screens successively detached from the surrounding micaschist, and the corresponding fracturing of earlier ferberite ;
 c. ECH 45 « crack-seal » openings in an aplité (ferberite 2 stage), thin section drawing ; a first set of ferberite needles in quartz is reopened and filled by later quartz with sometimes new ferberite (a).

Fig. 2 d. — Exemple de réouverture d'un filon quartzueux antécédent par une veine à ferberite (carrière de la Bosse, niveau 2, détail du parement).

Un filon plat d'aplogématite recoupe le dispositif, et envoie une digitation qui semble dissoudre (au moins sur une partie de son trajet) une veine à quartz-ferberite ; de telles relations avaient été interprétées à tort par Aubert (1969) comme une preuve de cogenétisme entre filons tungstifères et injections granitiques.

Reopening of an early quartz vein by a ferberite veinlet (Bosse quarry, level 2).

A flat lying aplogématite vein crosscuts the quartz veins, with an apophysis injected along a preexisting quartz-ferberite vein, which is partially dissolved ; such relationships were erroneously interpreted by Aubert (1969) as a proof of cogenetism between aplité intrusion and ferberite veins.

Fig. 2e. — Oblitération d'un filon plat à quartz-ferberite par l'épisode de topaze (carrière de la Bosse, niveau 3, détail du parement, simplifié). Le quartz est dissous, et ne subsiste plus qu'à l'état de reliques dans la topaze (pseudo-greisen) ; la ferberite reste intacte. Des fissures remplies de mica blanc recoupent ultérieurement la topaze, toujours selon une logique de « fracturation-colmatage », parallèlement aux épontes de l'ancien filon quartzueux.

Superimposition of topaze development onto a preexisting flat-lying quartz-ferberite vein (Bosse quarry, level 3).

Quartz is dissolved but for remnant patches within the topaze, whereas ferberite is unchanged. Late micas « crack-seal » veinlets are parallel to the main vein.

Fig. 2f. — Veine à cassitérite observée à la cote 40,51 du sondage Échassières 1.

Les épontes sont formées par une micacite à mica blanc, imprégnée de cassitérite plus ou moins associée à des sulfures (chalcopyrite, stannite, arsénopyrite). Le quartz, spectaculairement zoné (avec un cœur limpide et un cortex fibreux très riche en inclusions fluides) est postérieur à la cassitérite ; il est antérieur à un minéral (feldspath ? topaze ?) complètement pseudomorphosé en mica blanc, recoupé par une phyllite verte très biréfringente.

Cassiterite vein at the 40.51 level in the Échassières drill core.

Wall-rocks are made of a micacite with cassiterite and sulphides (chalcopyrite, stannite, arsenopyrite) disseminations. Well-zoned quartz (limpid core, fluid inclusion-rich fibrous rim), is later than cassiterite, but earlier than an undetermined mineral, which is in turn transformed into white mica and a very birefringent green phyllite.

filons. Toutefois, une veine à micas « blancs » et « verts », probablement lithinifères, cassitérite, sulfures et quartz subordonné a été rencontrée à la cote 40,51 (fig. 2f) (de façon générale, la numérotation des échantillons du sondage profond correspond à leur cote dans ce sondage).

	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	31.77	33.11	32.88	32.11	32.16	32.80
Al ₂ O ₃	54.69	56.09	55.11	53.66	53.31	54.80
Fe ₂ O ₃	0.00	0.07	0.00	0.06	0.03	0.09
F	18.97	18.34	17.07	14.98	20.01	16.06
	105.43	107.61	105.06	108.12	107.50	103.75
Si	0.99	1.00	1.01	1.01	0.99	1.01
Al	2.01	2.00	1.99	1.99	2.01	1.99
F	1.87	1.75	1.65	1.49	1.95	1.29
OH	0.13	0.25	0.35	0.51	0.05	0.71
F/F+OH	0.936	0.877	0.828	0.745	0.976	0.647

Tabl. 2. — B) Analyses représentatives des topazes du stockwerk d'Échassières. Analyses à la microsonde électronique (CAMEBAX, BRGM Orléans) par D. Ohnenstetter. L'étalon est une topaze de Thomas Range; temps de comptage 20 s; plage balayée 10 x 10 µm; 8 nA; 15 kV; correction ZAF.

A tous les niveaux, les topazes montrent la même variabilité (F/F+OH entre 0,75 et 0,94, avec une moyenne autour de 0,85), sauf dans ECH 879.26 (où il existe en outre un certain nombre de topazes ultra-fluorées) et dans ECH 849.76, où la topaze participe au remplissage d'une veine tardive, au lieu de corroder le quartz comme dans les autres échantillons (F/F+OH entre 0,60 et 0,80, avec une moyenne à 0,75).

1 ECH 66, stockwerk de la Bosse — 2 ECH 94.45 — 3 ECH 749.71 — 4,5 ECH 879.26 — 6 ECH 849.76.

Typical electron-probe analyses from topazes in the Échassières stockwerk. Analyse performed on an electron-probe CAMEBAX (BRGM Orléans) by D. Ohnenstetter. Standard is a Thomas Range topaze; counting time 20 s; scanning 10 x 10 µm; 8 nA; 15 kV; ZAF correction.

At each level, the topaze exhibit the same variability range (F/F+OH between 0.75 and 0.94, with a mean at 0.85), excepted in the ECH 879.26 sample (where are also found ultra fluorine-rich crystals) and in the ECH 849.76 sample, where is found a vein-filling topaze, in contrast with the normal quartz-corroding habit (F/F+OH between 0.60 and 0.80, with a mean at 0.75).

1 ECH 66, Bosse stockwerk — 2 ECH 94.45 — 3 ECH 749.71 — 4,5 ECH 879.26 — 6 ECH 849.76.

Le sondage a retrouvé les filons à ferbérîte à partir de la cote 750, d'abord au sein d'enclaves micaschisteuses dans le granite, puis au milieu de panneaux de plus grande taille; mais seuls deux panneaux (entre 789 et 817 m et entre 878 et 900 m) semblent ne pas être basculés, et représenteraient donc le stockwerk profond *in situ*.

Ce stockwerk profond, quoique très similaire à celui de la Bosse, présente cependant avec lui des différences significatives (Aïssa, 1987) :

— les corrosions tardives à topaze et micas, toujours présentes sont beaucoup plus discrètes (voir le tableau II pour des analyses représentatives).

De la cassitérite apparaît parfois, en étroite relation avec le mica, qui se développe en fissures de corrosion intergranulaires dans le quartz. La précipitation de la cassitérite semble ainsi avoir été le fait de solutions sous-saturées en quartz; de telles situations ne sont pas exceptionnelles et s'observent également, par exemple, à Walmès (Maroc) ou à Panasqueira (Portugal).

L'existence d'une génération tardive de ferbérîte en liaison avec cet épisode est suggérée par la présence de grands prismes corrodés de ce minéral dans une veinule à quartz automorphe, topaze, mica brun (sans doute lithinifère, zinnwaldite ?) et mica blanc phengitique plus tardif, observée à la cote 849,76 (voir le tableau II pour des analyses représentatives) :

— une paragenèse sulfurée est fréquemment présente; nettement tardive, associée à un quartz plus finement cristallisé que celui qui accompagne la ferbérîte, et assez souvent accompagnée de micas blancs, elle comporte pyrite, chalcopryrite, sphalérite, arsénopyrite, bismuthinite, et bismuth natif. On observe un remplacement systématique du bismuth par la bismuthinite, attestant une augmentation de f_{S_2} ; ce phénomène s'observe également dans des gisements comparables du Massif central (par exemple à Leucamp; Nicolas, 1985) :

— l'altération aux épontes est plus systématique et se marque, d'une part, par le développement d'un liseré de micas bruns qui souligne le contact micaschiste-filon quartzeux; d'autre part, et surtout, sous forme d'une tourmalinisation des micaschistes, qui devient très importante dans le panneau basal. Le tableau II présente des analyses représentatives de ces micas bruns qui ressemblent beaucoup à ceux de l'échantillon ECH 849,76 et sont sans doute lithinifères (zinnwaldite ? Monier *et al.*, ce volume), comme l'indique notamment leurs très fortes teneurs en fluor qui les apparentent aux micas lithinifères observés aux épontes de certaines veines dans le granite de Beauvoir (Monier et Tegye, 1985); il n'est donc pas exclu qu'ils soient tardifs.

Cet ensemble de caractéristiques, et singulièrement l'importance croissante des altérations d'éponte, signale très vraisemblablement la proximité du granite de la Bosse.

Relativement au granite présumé responsable de la minéralisation, le stockwerk d'Échassières semble ainsi dans son ensemble beaucoup plus distal que la plupart des gisements péri-batholitiques du Massif central ou d'ailleurs, auxquels il ne commence, en effet, à ressembler vraiment que dans les portions les plus profondes atteintes par le sondage.

2. — Habitus des ferbérîtes

La ferbérîte se présente généralement sous forme de prismes aciculaires ou lancéolés, plus rarement en prismes trapus; une occurrence exceptionnelle (cote 94,45) montre un habitus en pseudo-prismes formés par l'aggrégation de petits prismes à formes simples (para-cristaux ?) (fig. 1, pl. I); les morphologies concrétionnées décrites par Aubert (1969) n'ont pas été retrouvées. Cette ferbérîte est de petite taille: 0,1 mm à 1 cm, le plus souvent de l'ordre du millimètre. Observés au microscope métallographique, les prismes lancéolés montrent souvent une belle structure concentrique, avec un cœur aciculaire où se marquent de nombreuses zones de croissance, soulignées par des arrachements et/ou des vides de dissolution, et un cortex apparemment homogène (fig. 2, pl. I); examinée au microscope à balayage, cette zonation est beaucoup plus spectaculaire: il apparaît dans les cœurs une très fine zonation chimique soulignant la croissance du minéral, exprimée par l'alternance de bandes

sombres (niobifères, voir plus loin) et de bandes claires (fig. 3, pl. I), et ce sont surtout les bandes sombres qui ont fait l'objet de la corrosion qui souligne la zonation optique. Un échantillon du stockwerk de la Bosse (ECH 5-3, malheureusement trouvé non en place) réalise un cas particulier de ce type de zonation, avec de spectaculaires dislocations (fig. 4, pl. I).

Dans la carrière de la Bosse, l'échantillon ECH 41 montre des ferbérîtes « emballées » dans du matériel aplitique, résultant de l'incorporation d'anciens rubanements à quartz-wolframite de stade 2 dans une intrusion postérieure (voir le tabl. I) ; le quartz a apparemment été dissous, tandis que les agrégats de ferbérîte aciculaire, quoique parfois disloqués et recouverts par le matériel aplitique, ne montrent aucune trace de corrosion : il ne semble donc pas y avoir eu de mise en solution du tungstène dans le magma. En revanche, on observe les effets thermiques de cette incorporation : les prismes aciculaires ne montrent en effet plus la moindre trace de zonation, cependant que l'examen à la microsonde électronique révèle une répartition aléatoire de zones claires et de zones sombres (fig. 1, pl. II). Ce dispositif s'interprète comme le résultat d'une réorganisation des hétérogénéités chimiques correspondant aux anciennes zones de croissance sous l'effet de « cuisson » dû à l'intrusion aplitique.

De tels phénomènes de digestion, totale ou partielle, des filons de quartz par les aplites avec conservation des ferbérîtes ne semblent pas rares à Échassières : voir par exemples les fig. 2 et 3, pl. XXXV, de Aubert (1969) et surtout la fig. 32, de Rosen (1965).

Les autres habitus sont exempts de zonation ; un échantillon du stockwerk de la Bosse (ECH 49) montre cependant, dans un cristal trapu d'apparence par ailleurs homogène, une bande mûlée où alternent bandes claires et bandes sombres (plus ou moins corrodées), et qui pourrait correspondre à une bande de croissance (fig. 2, pl. II).

On connaît dans la carrière de la Bosse des veinules centimétriques à ferbérîte seule, ou à rare quartz central. Dans la

plupart des cas, cependant, la ferbérîte est étroitement associée au quartz, dessinant avec lui des rubanements plus ou moins rythmiques, avec des phénomènes d'arrachement ou de régénération ; ou encore formant des remplissages dans des fentes de réouverture (fig. 2a, b, c, d). Ces caractéristiques renvoient à la logique de « fracturation-colmatage » qui est celle de l'ouverture des filons.

On observe fréquemment une disposition séquentielle des cristaux de ferbérîte dans les veines quartzzeuses : les prismes aciculaires se localisent aux épontes, formant des bandes de « fracturation-colmatage » caractéristiques ; tandis que les portions centrales sont jalonnées par des prismes à morphologie plus trapue (fig. 3, pl. II).

L'ensemble de ces caractéristiques paraissent se retrouver pour les trois générations de ferbérîte mises en évidence dans le stockwerk. On constate, en revanche, une nette rarefaction des morphologies zonées pour les prismes aciculaires dans les parties profondes du dispositif.

3. — Cristallochimie des ferbérîtes

Environ 320 analyses à la microsonde électronique ont été réalisées sur les ferbérîtes d'Échassières. Les tableaux 3 et 4 donnent une sélection d'analyses représentatives.

Si l'on fait abstraction de certaines analyses riches en manganèse, qui représentent des phénomènes tardifs (voir plus loin) il s'agit de ferbérîtes typiques, comme l'avait déjà démontré Aubert (1969). Elles s'avèrent riches en niobium, et contiennent des quantités mineures de tantale, et, parfois, de titane et d'étain (tabl. IV) ; ni magnésium, ni calcium, ni scandium, ne sont présents au seuil de détection de la microsonde (qui est de l'ordre du millier de ppm) ; cependant, Aubert (1969) signale des teneurs moyennes en scandium de

ECH	45-2	49	34	49	49	34	66-b	749.71	879.26	90.90	772.35	895.55
N°	104	114	204	110	102	214	203	301	201	212	307	408
Faciès	BS	BS	BC	BC	CX	NZ	NZ	BC	BC	CX	NZ	NZ
WO ₃	67.87	62.19	73.93	73.12	75.42	75.52	76.35	75.99	74.51	76.61	76.30	76.73
Nb ₂ O ₅	5.46	5.77	1.38	2.68	0.70	0.35	0.43	0.52	1.41	0.78	0.14	0.02
Ta ₂ O ₅	0.11	0.04	0.01	0.01	0.01	0.08	0.00	0.16	0.03	0.05	0.00	0.08
FeO	18.36	17.67	18.53	18.49	17.91	18.48	18.91	15.13	19.03	17.83	21.35	21.83
MnO	6.02	7.03	5.24	5.60	5.86	5.19	4.86	8.08	4.41	4.83	1.84	1.22
Somme	97.82	92.69	99.09	99.91	99.90	99.63	100.49	99.88	99.38	100.10	99.63	99.88
Formule structurale sur la base de 4 oxygènes												
W	0.885	0.852	0.970	0.946	0.985	0.991	0.995	0.994	0.975	0.999	1.003	1.007
Nb	0.124	0.138	0.032	0.061	0.016	0.008	0.010	0.012	0.032	0.018	0.003	0.000
Ta	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001
Fe	0.773	0.782	0.785	0.772	0.755	0.782	0.790	0.638	0.804	0.750	0.905	0.924
Mn	0.257	0.315	0.225	0.237	0.250	0.223	0.207	0.345	0.189	0.206	0.079	0.052
Somme	2.039	2.087	2.012	2.016	2.006	2.004	1.999	1.989	2.000	1.973	1.990	1.983
Ferb	0.751	0.713	0.777	0.765	0.751	0.779	0.793	0.649	0.810	0.785	0.920	0.946

Tabl. 3. — Analyses représentatives à la microsonde électronique (CAMEBAX, Nancy 1) des ferbérîtes du stockwerk d'Échassières. Conditions analytiques : 15 kV, 15 nA, temps de comptage 20 s ; corrections ZAF.
Typical electron-probe analyses from the Échassières ferberites (CAMEBAX, Nancy 1). Analytical conditions : 15 kV, 15 nA, counting time 20 s ; ZAF corrections.

ECH	45-1	45-2	45-1	45-1	45-1	45-2	45-2	45-2	34	49	49	49
N°	102	128	201	202	206	123	125	126	201	103	204	205
Faciès	NZ	BC	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS*	BS*	BS*	BS*
WO ₃	74.41	75.87	66.89	66.59	66.13	63.42	61.36	65.93	55.60	57.01	63.29	63.88
Nb ₂ O ₅	0.76	0.26	2.65	2.57	2.65	8.77	9.78	6.10	3.29	6.80	4.05	3.67
Ta ₂ O ₅	0.04	0.00	0.17	0.14	0.06	0.08	0.00	0.04	0.01	0.11	0.21	0.30
TiO ₂	0.03	0.00	0.11	0.12	0.20	0.41	0.99	0.20	n.m.	0.27	n.m.	n.m.
SnO ₂	0.00	0.09	0.32	0.04	0.04	0.47	0.00	0.24	n.m.	0.22	n.m.	n.m.
FeO	17.34	17.92	19.60	19.74	19.57	18.06	18.35	18.62	27.30	23.98	22.90	22.96
MnO	6.29	6.29	5.23	5.19	5.08	5.13	5.30	4.88	5.61	4.75	4.95	5.14
Somme	98.87	100.44	94.97	94.39	93.73	96.34	96.38	96.38	91.80	93.13	95.41	95.95

Tabl. 4. — Exemples d'analyses de faciès BS à la microsonde électronique (CAMEBAX, Nancy 1) en prenant en compte le titane et l'étain. Comme la somme $TiO_2 + SnO_2$ ne dépasse jamais 1 %, cette prise en compte n'améliore pas sensiblement la sommation des analyses. On a donné pour comparaison des analyses représentatives d'autres faciès : il ressort clairement que le titane et l'étain sont concentrés dans les BS.

BS*: analyses aberrantes, anormalement riches en fer.

Electron-probe analyses from BS facies (CAMEBAX, Nancy 1), including measurement of Ti and Sn contents. As the sum $TiO_2 + SnO_2$ is never more than 1 %, the analytical total is not significantly improved. Other facies analyses are given for comparison: it is clear that only BS facies are containing significant quantities of titanium and tin.

BS*: anomalous analyses, too much iron-rich.

200 ppm (pouvant atteindre 700 ppm) pour les ferbérîtes du stockwerk, lesquelles s'opposent, de ce point de vue, aux hübnerites du Mazet, qui ne sont pas scandifères.

Il a été soigneusement tenu compte des phénomènes de zonation, et l'on a distingué les habitus non zonés (NZ : prismes aciculaires homogènes et prismes trapus, qui ne se différencient pas) des habitus zonés, où l'on spécifie les cœurs à zones de croissance : bandes claires (BC) et bandes sombres (BS) ; et les cortex d'apparence homogène (CX).

De façon générale, ces différents types diffèrent par leurs teneurs en niobium, qui décroissent en moyenne selon la séquence BS-BC-CX-NZ, en chaque localité du stockwerk (nous verrons en effet plus loin qu'il y a une forte zonalité verticale des teneurs en niobium). Les différentes générations de ferbérîte ne semblent pas en revanche différer sensiblement par leurs compositions.

Un problème a été rencontré lors de l'analyse des bandes sombres ; il n'a en effet jamais été possible d'obtenir des analyses à sommation satisfaisante. Ces bandes sombres, qui contiennent des quantités de niobium très supérieures à celles des autres faciès de ferbérîte, sont également les seules à présenter des teneurs significatives en titane et étain dont la prise en compte dans les protocoles analytiques n'améliore toutefois pas la sommation des analyses (tabl. IV).

On pourrait penser, pour expliquer ce déficit systématique, à l'incorporation d'eau dans le minéral, soit sous forme de OH^- dans le réseau, soit sous forme de H_2O liée. Cependant, des examens réalisés par interférométrie infra-rouge (IFS 88 Brucker), tant en transmission qu'en réflexion, n'ont pas montré d'indication positive de la présence d'eau. Il faut donc conclure que ces mauvaises analyses reflètent des effets de surface systématiques ; on peut penser à une microporosité : on rappellera à ce propos que les bandes sombres sont particulièrement sujettes à corrosion dans les cristaux zonés (à tel point que, dans les échantillons de tout le sondage profond, les bandes sombres sont virtuellement toutes dissoutes). La considération de diagrammes tels que celui de la figure 3 indique cependant que si ces analyses présentent un défaut de sommation, elles ne sont probablement pas affectées de biais : la pente du nuage de points correspondant aux

bandes sombres est en effet semblable à celle (déterminée par régression linéaire) du nuage des points représentatifs des analyses à bonne sommation.

On notera enfin que quatre analyses de bandes sombres (ECH 34,201 ; ECH 49,103, 204 et 205) montrent un excès de fer à caractère aberrant (tabl. IV).

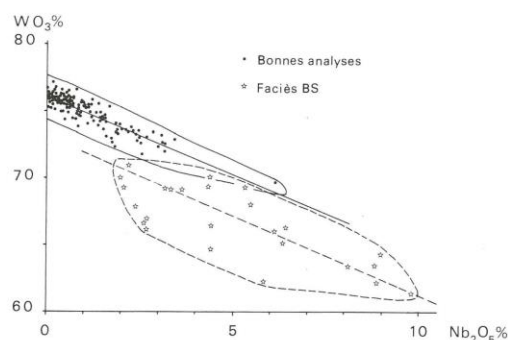


Fig. 3 — Corrélation $WO_3\%-Nb_2O_5\%$ pour les analyses brutes des ferbérîtes ; la pente du nuage de points des faciès BS, à mauvaise sommation ($\Sigma < 98,5\%$) est compatible avec celle de la droite de régression des analyses à bonne sommation (entre 99 % et 100,5 %), ce qui suggère l'absence d'un biais systématique pour le rapport W/Nb.

Correlation diagram between $WO_3\%$ and $Nb_2O_5\%$ for the ferberite analyses ; the BS facies point cloud has a slope close to that of the linear regression for the well-summed analyses. (Σ between 99 % and 100,5 %) ; this suggests the BS analyses to be unbiased whatever their bad summation ($\Sigma < 98,5\%$).

a) Étude empirique des relations cristallogéniques.

Les analyses sont rapportées à quatre oxygènes, c'est-à-dire à une formule structurale du type ABO_4 , avec A = Fe, Mn, ... et B = W, Nb, Ta ...

Dans ces conditions :

— On observe la classique anti-corrélation entre Fe et Mn avec cependant un léger déficit en fer dans le cas des échantillons du sondage : $\lim_{Mn=0} Fe \approx 0,99$ ou, au contraire, un léger excès pour les échantillons du stockwerk de la Bosse : $\lim_{Mn=0} Fe \approx 1,01$, d'ailleurs beaucoup plus marqué pour les analyses de bandes sombres (BS). Ces différences se retrouvent naturellement dans les moyennes ; Fe+Mn vaut ainsi en moyenne 1,012 pour les échantillons de surface ($N = 121$) (1,007 $N = 99$, si l'on ne tient pas compte des BS) ; et 0,993 pour les échantillons du sondage ($N = 129$). Malgré un net recouvrement (les erreurs-standard sont de l'ordre de 0,02), ces différences, quoique faibles, paraissent significatives. Il paraît difficile, en particulier, de les attribuer à d'éventuels biais analytiques, compte-tenu de leur caractère systématique en fonction de l'origine des échantillons.

— il y a une nette anti-corrélation entre W et Nb ; les échantillons dessinent des séries de tendances parallèles, de pentes $-0,8/-0,85$, décalées verticalement les unes des autres dans le sens d'un abaissement de $\lim_{Nb=0} W$ d'autant plus marqué que la teneur moyenne en (Fe+Mn) est plus élevée (fig. 4a, b).

Il faudrait en toute rigueur ajouter Ta à Nb, et étudier les relations W/Nb+Ta ; toutefois, les teneurs en Ta sont pratiquement négligeables, largement inférieures à 0,01 : on reste au voisinage de la limite de détection.

La figure 4 montre par ailleurs que la recherche des corrélations empiriques doit être menée avec précaution, en s'en tenant dans un premier temps au plus petit dénominateur commun des analyses ; il peut arriver en effet, si l'on considère différents faciès d'un même échantillon (fig. 4a), ou encore le même faciès dans plusieurs échantillons (fig. 4b), que l'on produise des tendances artificielles ; ou encore, qu'il n'apparaisse pas de corrélation du tout (fig. 4c).

— les corrélations entre W ou Nb et Fe ou Fe+Mn sont mauvaises ou inexistantes ; on note cependant une tendance à la corrélation W/Fe pour les échantillons du stockwerk de la Bosse ; et à la corrélation Nb/Fe pour ceux du sondage ; en revanche, comme le montre la figure 4(c, d) il y a une excellente anti-corrélation entre W + Nb et Fe + Mn, avec des pentes faibles, de l'ordre de $-0,5$ pour la plupart des faciès des échantillons de surface, et de l'ordre de $-0,4$ pour les échantillons du sondage. Les échantillons dessinent, en fait,

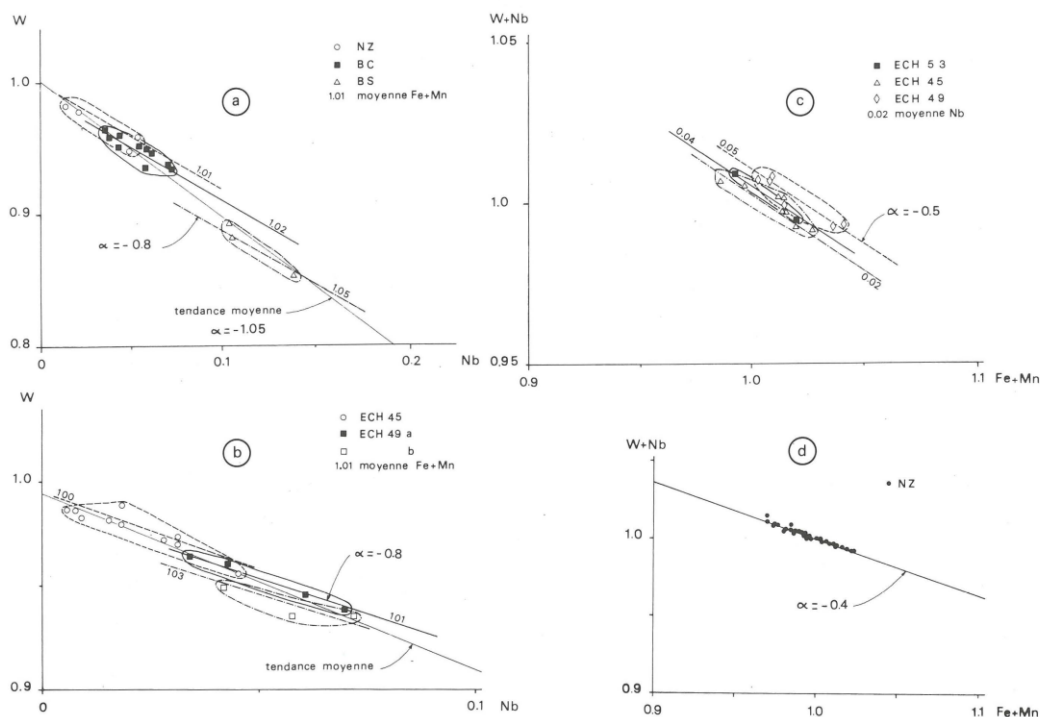


Fig. 4 — Exemples de corrélations entre éléments pour les ferberites. Examples of inter-element cross-correlations for the ferberites.

Fig. 4 a, b. — Corrélations W-Nb : a. Différents faciès de l'échantillon ECH49 (stockwerk de la Bosse) ; b. Faciès BC pour différents échantillons du stockwerk de la Bosse. Dans les deux cas, la saisie brutale des données conduirait à des conclusions erronées sur la structure des corrélations (fausses tendances). α pente (estimation visuelle pour les tendances partielles ; régression linéaire pour la tendance moyenne).

W-Nb cross-correlation : a Different facies of the ECH49 sample (Bosse stockwerk) ; b. BC facies for some Bosse stockwerk samples. In both

cases, treatment of the data as a single set would be misleading as non existing trends would appear. α slope (visual estimate for partial trends, linear regression for the whole data trend).

Fig. 4 c, d. — (Corrélations (W+Nb)-(Fe+Mn)) : c. Faciès BC pour différents échantillons du stockwerk de la Bosse : α pente, estimation visuelle ; d. Faciès NZ pour deux échantillons des parties profondes du sondage Échassières 1 ; α : pente, régression linéaire.

Fig. 4 c, d. — (W+Nb) - (Fe+Mn) cross-correlation : c. BC facies for some Bosse stockwerk samples ; α : slope, visual estimate ; d. NZ facies for two samples from the bottom of Échassières 1 drill core ; α : slope, linear regression.

des séries de tendances, systématiquement décalées les unes par rapport aux autres en fonction de la teneur moyenne en niobium des échantillons.

La figure 5a illustre une fois de plus le danger qu'il peut y avoir à pratiquer des régressions générales sur un ensemble de valeurs : on obtient, en effet, pour toutes les analyses du stockwerk de la Bosse une bonne droite de régression (passant d'ailleurs par les points représentatifs des quatre analyses aberrantes, car trop riches en fer, des faciès BS), qui est toutefois fortement oblique sur les tendances réelles telles qu'elles ressortent d'une interprétation plus fine.

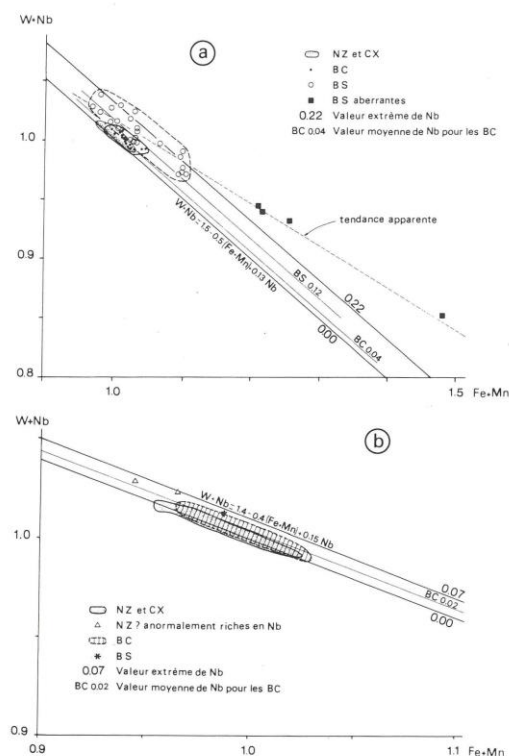


Fig. 5 — Test quantitatif de la relation (9) du texte pour les ferbérîtes du stockwerk de la Bosse (a), et du sondage profond (b).

On constate un bon alignement des nuages de points correspondant aux différents faciès de ferbérîte sur les droites indexées par les teneurs moyennes en niobium de ces faciès, les nuages restant par ailleurs encadrés par les droites indexées sur les teneurs extrêmes. La tendance apparente de la figure 5a est obtenue par régression linéaire.

Quantitative test for the equation (9) (see text):

a. Bosse stockwerk ferberites; b. Deep drill core ferberites. Points alignments are in good agreement with the theoretical lines drawn for different niobium contents. The apparent trend in figure 5a results from a linear regression.

b) Interprétation en termes de substitutions.

Il n'est usuellement pas possible à partir d'analyses chimiques à la microsonde électronique (à l'échelle de laquelle les ferbérîtes analysées sont homogènes) de distinguer entre de vraies substitutions et des syncristallisations de phases distinctes à une échelle inframicroscopique; l'étude qui suit

ne préjuge donc en rien des mécanismes réels par lesquels les éléments rentrent dans les ferbérîtes macroscopiques. Dans le cas des très fortes teneurs en niobium qui caractérisent les bandes sombres, il est d'ailleurs probable qu'il faille envisager l'existence de micro-couches de minéraux niobifères plutôt que des substitutions dans le réseau des ferbérîtes (Calas 1987, comm. orale).

Néanmoins, la recherche des contraintes cristallographiques qui conditionnent les répartitions empiriques observées, et leur écriture en termes de « substitutions », restent formellement les mêmes dans les deux situations, et peuvent donc apporter des informations utiles.

Ceci étant, pour expliquer l'incorporation du niobium dans la ferbérîte, on peut envisager trois types de substitutions :

— (1) Une solution solide $\text{FeWO}_4\text{-FeNbO}_4$, décrite par le vecteur de substitution $\text{W}_{-1}\text{Fe}^{2+}_{+1}\text{Fe}^{3+}_{+1}\text{Nb}_{+1}$; on sait, en effet, qu'il existe une variété polymorphique de l'ixiolite FeNbO_4 à structure monoclinique de type wolframite (Roth et Waring 1964). Ceci entraîne pour le minéral résultant la relation :

$$W = 1 - Nb$$

— (2) une solution solide ferbérîte-ferrocolumbite FeNb_2O_6 , dont il est classique de considérer qu'elle existe, au moins pour certains domaines de composition (Schröcke 1961; Cerny 1986); elle est décrite par le vecteur de substitution $\text{W}_{-1}\text{Fe}^{2+}_{+1}\text{Nb}_{+4}\text{A}_{+1}$, où il est d'ailleurs possible que les jeux sur les lacunes des sites A et B se compensent. Il en résulte pour la solution solide un déficit en fer, ainsi que la relation :

$$W = 1 - 0,75 Nb$$

— (3) une substitution impliquant les sites anioniques, décrites par le vecteur $\text{W}_{-1}\text{O}_{-1}\text{Nb}_{+1}(\text{OH})_{+1}$. Cette dernière possibilité doit être rejetée pour les ferbérîtes d'Échassières, puisque l'on n'y détecte pas d'eau.

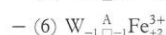
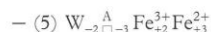
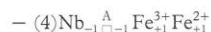
Les pentes expérimentales de la corrélation W/Nb sont loin de la pente -1 attendue pour le modèle (1), mais ne sont qu'approximativement en accord avec les prédictions du modèle (2); on a vu de plus que les ferbérîtes d'Échassières sont loin d'être toutes caractérisées par un déficit en site A. S'il semble donc probable que le vecteur $\text{W}_{-3}\text{Fe}^{2+}_{+1}\text{Nb}_{+4}$ décrive la cristallographie des ferbérîtes d'Échassières, ce doit être en combinaison avec d'autres vecteurs.

L'hypothèse la plus simple, combinaison de (2) avec (1), doit être rejetée; elle conduit en effet à la relation :

$$W = 2 - Nb - (\text{Fe} + \text{Mn})$$

qui n'est évidemment pas vérifiée par les données expérimentales.

Le fait qu'une partie des ferbérîtes d'Échassières montre un excès relatif de fer suggère alors de rechercher des substitutions à excès de fer du type :

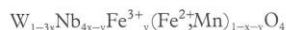


On remarque d'ailleurs que (6) résulte de la combinaison linéaire de (1) et de (4), et peut être considérée comme repré-

sentant une solution solide ferberite-magnétite. Le caractère peu probable de la réalité d'une telle solution solide, compte tenu de la disparité des structures, est d'ailleurs un argument ici en faveur d'un modèle de micro-couches pour cette « substitution ».

En notant x le taux de columbite et y le taux de substitution (4), (5), ou (6), on obtient alors :

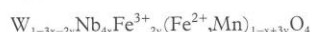
— pour (2) + (4) :



soient les relations :

$$\begin{cases} W = 1,43 - 0,86 Nb - 0,43 (Fe + Mn) \\ W + Nb = 1,43 - 0,43 (Fe + Mn) + 0,14 Nb \end{cases} \quad (7)$$

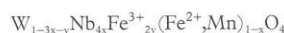
— pour (2) + (5) :



soient les relations :

$$\begin{cases} W = 1,40 - 0,85 Nb - 0,40 (Fe + Mn) \\ W + Nb = 1,40 - 0,40 (Fe + Mn) + 0,15 Nb \end{cases} \quad (8)$$

— pour (2) + (6) :



soient les relations :

$$\begin{cases} W = 1,50 - 0,87 Nb - 0,50 (Fe + Mn) \\ W + Nb = 1,50 - 0,50 (Fe + Mn) + 0,13 Nb \end{cases} \quad (9)$$

Les relations (7) à (9) reproduisent remarquablement les résultats empiriques : pentes des corrélations W/Nb et $W+Nb/Fe+Mn$; décalages des nuages de points expérimentaux en fonction des teneurs en $Fe+Mn$ ou en Nb (fig. 5). La présence de Fe^{3+} dans les ferberites d'Echassières semble donc un fait acquis ; il est plus délicat de savoir selon quel modèle de « substitution », les tests de validité des relations (7) à (9) étant également satisfaisants.

On peut cependant tenir compte du fait que les pentes des corrélations $W+Nb/Fe+Mn$ sont dans l'ensemble de l'ordre de $-0,5$ pour les échantillons du stockwerk de la Bosse et de $-0,4$ pour ceux du sondage ; et que de même il y a une corrélation W/Fe pour les échantillons de surface et Nb/Fe pour les échantillons profonds. Il est alors possible de proposer une combinaison des vecteurs (2) et (4) pour caractériser les ferberites des échantillons du sondage, tandis que ceux du stockwerk de la Bosse seraient décrits par une combinaison

	ECH	45-2	49	34	49	49	34	66-b
	N°	104	114	204	110	102	214	203
	Faciès	BS	BS	BC	BC	CK	NZ	NZ
Modèle (2)+(4)	C	0.038	0.034	0.010	0.015	0.004	0.003	0.000
	MT	0.029	0.065	0.008	0.012	0.004	0.004	0.011
Modèle (2)+(6)	C	0.031	0.049	0.008	0.018	0.005	0.002	0.003
	MT	0.030	0.059	0.009	0.011	0.004	0.003	0.012
Modèle (2)+(5)	C	0.031	0.049	0.008	0.018	0.005	0.002	0.003
	MT	0.012	0.024	0.004	0.004	0.002	0.001	0.005

Tabl. 5. — Comparaison des estimations des taux de columbite (C) et de substitution à Fe^{3+} (MT) dans les trois hypothèses envisagées pour les ferberites du stockwerk d'Echassières (voir texte).
Comparison of the estimates of columbite (C) and Fe^{3+} (MT) substitution ratios, according to the three hypotheses made in the text for the Echassières ferberites.

des vecteurs (2) et (6). Remarquons ici que les valeurs numériques des taux de columbite et de Fe^{3+} sont très semblables dans les deux modèles, tandis que le modèle (5) conduit à des valeurs environ moitié pour les taux de Fe^{3+} (tabl. 5).

En ce qui concerne l'incorporation du titane (essentiellement dans les faciès BS), on peut envisager le vecteur



Enfin les vecteurs de substitution classiques



complètent le jeu des substitutions nécessaires pour une description complète de la cristalchimie des ferberites d'Echassières.

En conclusion, les ferberites d'Echassières ont une cristalchimie dominée par la solution solide (ou la syncrystallisation à une échelle infra-micrométrique) wolframite-columbite, compensée, en ce qui concerne le déficit en $(Fe+Mn)$ qui devrait en résulter, par des substitutions mineures (ou des syncrystallisations, par exemple de ferberite et de magnétite) impliquant le Fe^{3+} . A titre d'exemple, le tableau 6 donne les valeurs moyennes des taux de columbite (C) et du taux de substitution à Fe^{3+} (MT), dans le modèle impliquant la substitution de vecteur $A_{\square-1}W_{-1}Fe_{+1}^{3+}$, pour les différents faciès individualisés dans les cristaux du stockwerk de la Bosse.

	BS	BC	CK	NZ
C	0.028 ± 0.006	0.007 ± 0.002	0.004 ± 0.002	0.002 ± 0.000
MT	0.046 ± 0.022	0.004 ± 0.002	0.000 ± 0.004	0.000 ± 0.002
N	27	20	8	49

Tabl. 6. — Décroissance régulière des taux de columbite (C) et de magnétite (MT) dans les différents faciès des cristaux de ferberite du stockwerk de la Bosse.
(N : nombre d'analyses utilisées pour les moyennes).
Regular decrease of the columbite (C) and magnetite (MT) ratios in the different faciès of ferberite crystals from the Bosse stockwerk (N : number of analyses used).

4. — Cristalchimie des « columbites » et des phases associées.

Des « columbites » ont été rencontrées dans un échantillon du stockwerk de la Bosse (ECH 5-3), malheureusement non en place. En cristaux de l'ordre de 0,1 mm, elles occupent des cavités de corrosion, développées dans des ferberites zonées (celles de la figure 4, planche I), et ultérieurement colmatées par des micas blancs. Il ne fait donc aucun doute que ces « columbites » appartiennent à une paragenèse tardive, liée aux effets perturbateurs de l'intrusion du granite de Beauvoir sur le stockwerk à ferberite.

Dans le détail, ces « columbites » sont précédées par une ferberite déchiétée (corrosion ? ou habitus squelettique ?) ; elles contiennent en outre de curieux cristaux d'habitus dendritique (fig. 4, pl. II).

a) « Columbites »

1) Cristalchimie

Analysées à la microsonde électronique, les « columbites » présentent d'importantes teneurs en tung-

tène, titane, tantale et accessoirement étain (tabl. 7) ; de telles compositions évoquent plutôt les ixiolites et, plus précisément, les wolframioixiolites (Cerny et Ercit 1985 ; Cerny 1986) ; cependant, les columbo-tantalites riches en tungstène sont connues : celles du granite de Beauvoir, par exemple (Kosakévitch 1976) ; et surtout les columbites tungstifères décrites par Beddoe-Stephens et Fortey (1981) dans le gisement à quartz-wolframite de Carrock Fell (English Lake District), très semblables aux nôtres par leur localisation dans des micro-cavités de dissolution de la wolframite et leur chimisme (tableau 7). En l'absence d'une caractérisation aux rayons X, nous appellerons provisoirement nos minéraux des « columbites » ; elles seront décrites (avec les mêmes restrictions que dans le cas des ferbérites) sur la base d'une formule structurale de type AB_2O_6 (avec $A = Fe, Mn, \dots$, et $B = W, Nb, Ti, Ta, \dots$).

Les substitutions $Nb_{-1}Ta_{+1}$, $Fe_{-1}Mn_{+1}$, $Ti_{-1}Sn_{+1}$, sont évidentes.

N°	307	308	311	330	333	A
WO ₃	7.79	5.89	6.94	7.09	5.44	8.76
Nb ₂ O ₅	65.62	66.88	65.11	64.44	66.48	64.33
Ta ₂ O ₅	2.34	4.48	3.65	4.16	4.59	3.54
TiO ₂	3.86	2.76	3.25	3.80	3.15	4.68
SnO ₂	0.21	0.39	0.13	n.m.	n.m.	n.m.
FeO	11.30	16.58	12.99	12.40	15.98	6.77
MnO	7.97	3.76	6.77	6.93	3.56	10.49
Somme	99.09	100.76	98.84	98.81	99.22	98.57
W	0.116	0.087	0.105	0.107	0.081	0.129
Nb	1.712	1.732	1.714	1.695	1.741	1.653
Ta	0.037	0.070	0.058	0.066	0.072	0.055
Ti	0.167	0.119	0.142	0.166	0.137	0.200
Sn	0.005	0.009	0.003	n.m.	n.m.	n.m.
Fe	0.546	0.794	0.633	0.603	0.774	0.322
Mn	0.390	0.183	0.334	0.342	0.175	0.505
Fe+Mn	0.936	0.977	0.967	0.945	0.949	0.822*

Tabl. 7. — Analyses représentatives à la microsonde électronique (CAMEBAX MBX, Nancy 1) des « columbites » de l'échantillon ECH 5-3, et analyse donnée pour comparaison d'une columbite de Carrock Fell (A, analyse 3, tabl. II, de Beddoe-Stephens et Fortey 1981 ; cette analyse comporte aussi 1.58 Se_2O_3).

n.m. ; non mesuré * 0.905 avec Se.
Typical electron-probe analyses (CAMEBAX MBX, Nancy 1) from the « columbites » in the ECH 5-3 sample ; analysis A is from Carrock Fell columbite and is given for comparison (analysis 3, table II, from Beddoe-Stephens and Fortey 1981 ; with 1.58 Se_2O_3).

n.m. ; not determined * 0.905 with Se.

Le tableau 7 montre un net déficit en Fe+Mn, alors que la somme des cations est généralement très voisine de 3 ($\Sigma = 2,990 \pm 0,005$, $N = 18$) ; il n'est donc pas possible d'envisager une substitution ferrocolumbite-ferbérite pour expliquer l'incorporation du tungstène.

De même, le tableau 7 montre que $W < Ti$, ce qui interdit d'envisager la substitution couplée $(10) W_{+1}Ti_{-1}Nb_{-2}$ proposée par Beddoe-Stephens et Fortey (1981) pour les « columbites » du gisement de Carrock Fell. La substitution $(11) Ti_{+3}Fe_{-2}Nb_{-2}$ qui, d'après Cerny et Ercit (1985, figure 2), caractérise les ixiolites et permettrait de rendre compte du déficit en Fe+Mn, n'est pas applicable non plus ici (fig. 6a). Malgré la difficulté qu'il y a d'envisager un excès de cations dans la structure, nous proposons pour résoudre cette difficulté de recourir au modèle $(12) W_{+1}Nb_{-4}Ti_{+5}$, qui semble bien en accord avec les données expérimentales (fig. 6a).

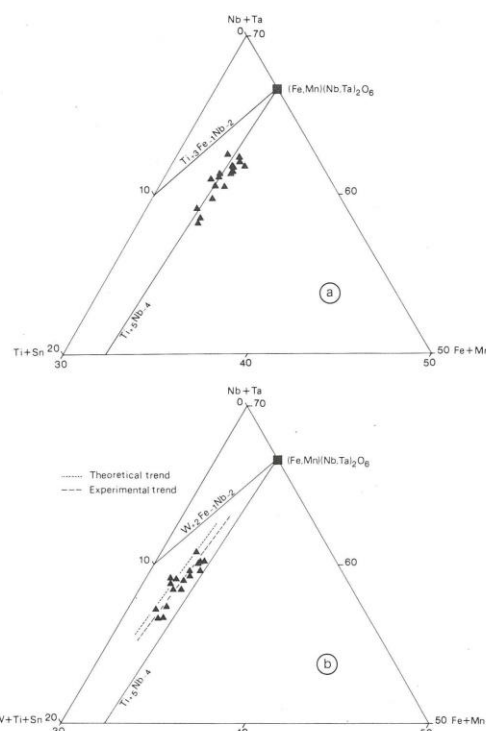


Fig. 6 — Tests des « substitutions » proposées pour les « columbites » : a : Tests de substitutions $(11) Ti_{+3}Fe_{-2}Nb_{-2}$ et $(12) W_{+1}Nb_{-4}Ti_{+5}$; b : Combinaison de (12) et de $(13) W_{+1}Nb_{-2}Fe_{-1}$; le nuage des points expérimentaux, maintenant oblique sur la direction du vecteur (12) est parallèle à la direction du nuage obtenu en combinant (12) et (13) en utilisant les teneurs expérimentales en W et Ti+Sn.

Testing the proposed « substitutions » in « columbites » (see text).

a. Test for the substitutions $(11) Ti_{+3}Fe_{-2}Nb_{-2}$ and $(12) W_{+1}Nb_{-4}Ti_{+5}$; b. Combination of (12) and $(13) W_{+1}Nb_{-2}Fe_{-1}$; the experimental trend is now oblique to the theoretical (12) vector direction ; this is accommodated by the quantitative combination of (12) and (13) vectors using the measured contents of W and Ti+Sn, which yields a trend parallel to the experimental one.

En revanche, la substitution de vecteur $(13) W_{+1}Nb_{-2}Fe_{-1}$, proposée par Beddoe-Stephens et Fortey (1981) pour les « columbites » du gisement de Carrock Fell, et qui peut à son tour rendre compte du déficit en Fe+Mn, semble bien se combiner à (12) comme le montre la figure 6b : dans le diagramme Nb+Ta, Fe+Mn, W+Ti+Sn, les points expérimentaux se groupent en effet selon une direction oblique à celles des deux vecteurs de substitution (12) et (13) , qui est bien celle que l'on attend de leur combinaison avec les teneurs observées en W et Ti+Sn.

On remarque, sur la figure 6b, que le nuage des points expérimentaux est décalé, par rapport à la position attendue, du côté du pôle Fe+Mn ; ce qui peut traduire l'existence d'un léger biais analytique, mais peut correspondre également à une substitution à Fe^{3+} , du type de celles qui ont résolu un problème analogue pour les ferbérites.

2) Zonation.

La répartition des éléments substitués est zonale, et il s'agit probablement de zones de croissance (figures 1 à 4, planche

III). Les analyses ponctuelles à la microsonde électronique permettent une ébauche de profil quantitatif (fig. 7) ; on constate ainsi qu'aux fluctuations de courte longueur d'onde qui caractérisent les zones de croissance élémentaires se superposent des variations de plus grande longueur d'onde :

— oscillations de W et Ta, qui paraissent à cette échelle relativement bien anti-corrélés, sauf en fin de croissance ;

— décroissance régulière du rapport Fe/Fe+Mn depuis le cœur vers la périphérie, à partir de valeurs proches de celles qui caractérisent les ferbérîtes encaissantes ; une remarquable discontinuité, avec remontée temporaire brutale du rapport, est bien visible en fin de croissance (figure 3, planche III) ;

— le titane et l'étain suivent une évolution parallèle qui n'est pas sans rappeler celle du fer (à la discontinuité près).

b) Phases associées.

1) Ferbérîtes « corrodées ».

Par rapport aux ferbérîtes « normales », les ferbérîtes « corrodées » qui précèdent les « columbités » présentent des particularités significatives (tabl. 8).

— elles sont très riches en niobium, comme les bandes sombres (BS), dont elles se distinguent cependant par des teneurs en tantale faibles, mais significatives ;

— il y a un déficit systématique en (Fe+Mn) ;

— l'anti-corrélation W/Nb+Ta obéit strictement à la relation :

$$W = 1 - 0,75 (Nb + Ta)$$

N°	303	315	344	345
WO ₃	69.64	69.19	69.76	66.15
Nb ₂ O ₅	6.13	5.31	5.09	8.91
Ta ₂ O ₅	0.32	0.35	0.24	0.21
TiO ₂	n.m.	n.m.	0.35	0.64
FeO	18.81	17.87	18.50	17.79
MnO	4.14	4.68	4.12	3.70
Somme	98.63	97.86	98.11	97.50
W	0.900	0.901	0.908	0.851
Nb	0.138	0.121	0.116	0.200
Ta	0.004	0.005	0.003	0.003
Ti	n.m.	n.m.	0.013	0.024
Fe	0.768	0.751	0.777	0.738
Mn	0.175	0.174	0.175	0.156
Somme	1.985	1.952	1.992	1.972
Fe+Mn	0.943	0.925	0.952	0.894
Ferb	0.814	0.812	0.816	0.826

Tabl. 8. — Analyses représentatives à la microsonde électronique (CAMEBAX, Nancy 1) des ferbérîtes « corrodées » de l'échantillon ECH 5-3 (voir texte).
n.m. ; non mesuré.

Typical electron-probe analyses (CAMEBAX, Nancy 1) from the « corroded » ferberites in the ECH 5-3 sample (see text).
n.m. ; not determined.

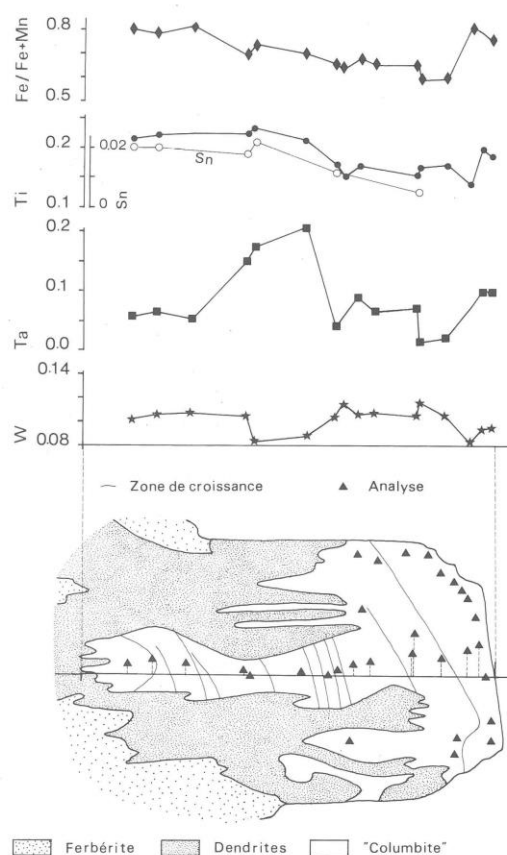


Fig. 7 — Profil quantitatif des zonations chimiques dans le cristal de « columbite » de la planche III.

Quantitative profile displaying chemical zonation within the « columbite » crystal from plate III.

caractéristique de la substitution wolframite-columbite (fig. 8a).

Cependant, cette substitution suppose aussi que l'on ait :

$$Fe + Mn = 1 - 0,25 (Nb + Ta)$$

relation sensiblement moins bien vérifiée par les analyses (fig. 8b).

2) Dendrites

Les minéraux dendritiques ont une composition intermédiaire entre celle des ferbérîtes, et plus particulièrement des ferbérîtes « corrodées » enrichies en tantale, et celles des « columbités » dans lesquelles ils sont inclus (fig. 1 et 2, planches III), comme le montrent le tabl. 9 et la fig. 9. Ils semblent donc correspondre à une « solution solide » entre ces ferbérîtes et ces « columbités ». Leur signification reste inconnue ; peut-être représentent-ils les produits d'une démixtion ? On peut toutefois noter l'analogie qu'ils présentent avec les den-

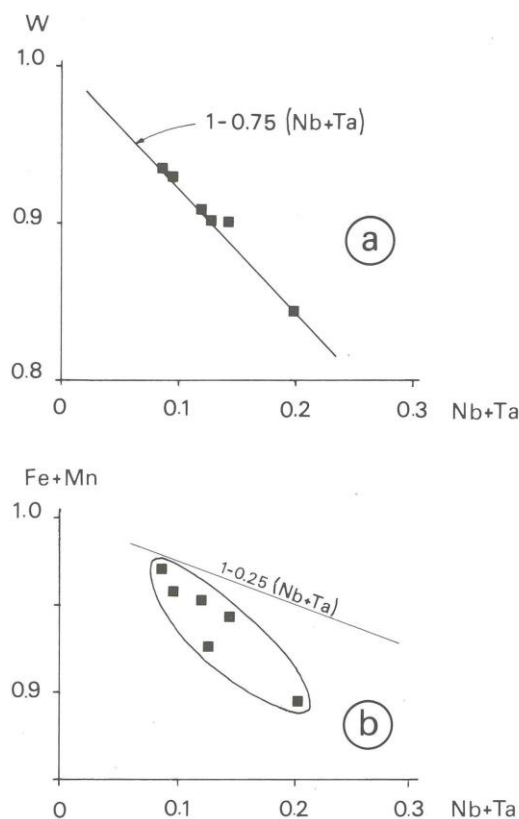


Fig. 8 — Relations cristallochimiques dans les ferbérîtes « corrodées » qui précèdent les « columbités » (voir texte)
Cristallochemical relationships for the « corroded » ferberites immediately preceding the « columbités » (see text).

N°	312	313	314	322	340	moyenne
W ₂ O ₃	35.77	35.22	35.38	34.20	32.88	34.69
Nb ₂ O ₅	34.89	35.55	36.41	39.51	37.82	36.84
Ta ₂ O ₅	3.48	2.29	1.76	1.28	4.36	2.63
TiO ₂	2.93	3.12	2.99	1.52	2.18	2.55
SnO ₂	0.95	0.94	0.62	n.m.	n.m.	0.84
FeO	16.43	14.04	13.48	11.28	13.26	13.70
MnO	4.33	6.47	7.73	9.28	6.85	6.93
Somme	98.76	97.63	98.36	97.08	97.33	98.17
Formule structurale sur la base de 4 oxygènes						
W	0.402	0.398	0.396	0.386	0.373	0.390
Nb	0.684	0.700	0.711	0.779	0.748	0.722
Ta	0.041	0.027	0.021	0.016	0.052	0.031
Ti	0.096	0.102	0.097	0.050	0.072	0.083
Sn	0.016	0.016	0.011	n.m.	n.m.	0.015
Fe	0.596	0.512	0.487	0.411	0.485	0.497
Mn	0.159	0.239	0.283	0.343	0.253	0.255
Fe/Fe+Mn	0.789	0.786	0.632	0.545	0.657	0.661

Tabl. 9. — Analyses à la microsonde électronique (CAMEBAX, Nancy 1) des dendrites incluses dans les « columbités » de l'échantillon ECH 5-3.
n.m. : non mesuré.
Electron-probe analyses (CAMEBAX, Nancy 1) from the dendrites enclosed within « columbités » in the ECH 5-3 sample.
n.m. : not determined.

drites mixtes à étain-tungstène obtenues par Baumer et al. (1986) à la faveur d'expériences de coprécipitation de cassitérite, scheelite, et ferbérîte : ces dendrites mixtes apparaissent dans une séquence de dépôt wolframite-dendrites-cassitérite riche en tungstène, au cours d'une trempe ; l'analogie de cette séquence de dépôt avec la succession possible ferbérîte (tantalifère)-dendrites-« columbités » riches en tungstène observée à Échassières, est frappante.

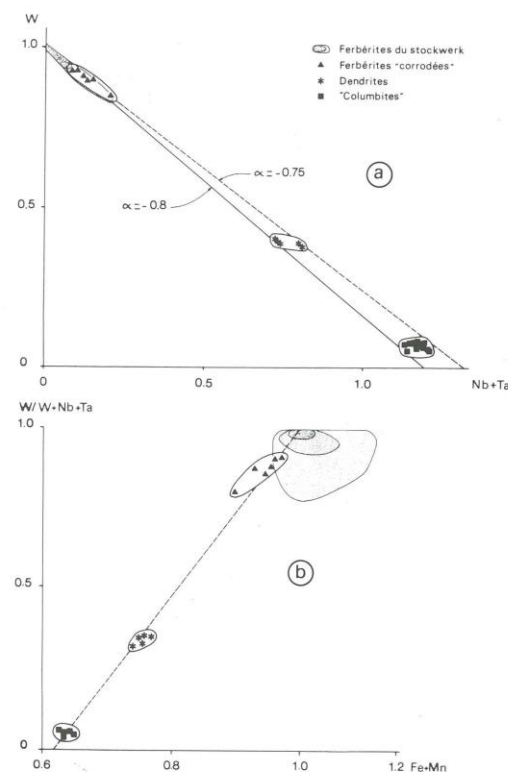


Fig. 9 — Mise en évidence du caractère intermédiaire des compositions des dendrites incluses dans les « columbités » entre les compositions de ces « columbités » et celles des ferbérîtes, plus particulièrement celles des ferbérîtes « corrodées » enrichies en tantale (voir texte).
Les analyses sont rapportées à 4 (O).

Evidencing the characteristics of the dendrite crystals enclosed into « columbités » ; these are intermediated between « columbite » and ferberites, specially the « corroded » Nb-Ta-enriched ferberites (see text). Structural formula for 4 (O).

5. — Évolutions spatiales et temporelles de la composition des ferbérîtes

On a déjà signalé l'existence d'une variation du rapport W/Nb des ferbérîtes en fonction de l'habitus, c'est-à-dire en fonction du temps ; le tabl. 10 montre en effet que la séquence cœur zoné (BC/BS)-cortex non zoné (CX)-cristaux non

	BS	BC	CX	NZ
Stockwerk de la Bosse	4.95 ± 0.94 (n=27)	1.57 ± 0.38 (n=20)	1.08 ± 0.66 (n=8)	0.67 ± 0.20 (n=49)
Niveau 100		0.87 ± 0.32 (n=12)	0.58 ± 0.20 (n=9)	0.45 ± 0.22 (n=15)
Niveau 750-850		0.40 ± 0.18 (n=6)	0.82 ± 0.30 (n=9)	0.20 ± 0.06 (n=53)
Niveau 850-900	2.17 (n=1)	1.36 ± 0.63 (n=5)	0.08 (n=1)	0.15 ± 0.12 (n=15)

Tabl. 10 A) — Evolution verticale de la teneur en Nb_2O_5 des ferberites du stockwerk d'Echassières (moyennes arithmétiques des analyses ponctuelles).
Vertical evolution of the Nb_2O_5 content of ferberites in the Echassières stockwerk (arithmetic means of point analyses).

	BS	BC	CX+NZ
Stockwerk de la Bosse	C 0.020 MT 0.035 Ferb 0.784	0.009 0.010 0.784	0.005 0.007 0.780
Niveau 100	C 0.005 MT -0.001 Ferb 0.775	0.003 -0.003 0.778	0.003 -0.003 0.778
Niveau 750-850	C 0.003 MT -0.007 Ferb 0.820	0.002 -0.003 0.854	0.002 -0.003 0.854
Niveau 850-900	C 0.012 MT 0.000 Ferb 0.797	0.008 0.001 0.810	0.002 -0.004 0.869

Tabl. 10 B) — Evolution verticale des paramètres cristallochimiques des ferberites du stockwerk d'Echassières (moyennes pondérées, d'abord par cristaux, ensuite par échantillons). Vertical evolution of the crystal chemistry parameters of ferberites in the Echassières stockwerk (weighted means, first at the crystal scale, then at the sample scale).

zonés (NZ) correspond de façon générale à une diminution des teneurs en niobium. En revanche, cette séquence ne se marque pas, pour un échantillon donné, par des variations du rapport $Fe/Fe+Mn$; tout au plus peut-on signaler une plus grande variabilité de ce rapport dans les bandes sombres (BS) relativement aux autres faciès.

On l'a également noté plus haut, la séquence cristaux zonés-cristaux non zonés (et pour ceux-ci, cristaux aciculaires-cristaux trapus) se retrouve à plusieurs reprises dans l'évolution du stockwerk (stades ferberite 1 à ferberite 3 du tableau 1). On n'observe apparemment pas à cette échelle de dérive dans la composition des ferberites, ni du point de vue des teneurs en Nb, qui évoluent toujours dans les mêmes limites, ni de celui du rapport $Fe/Fe+Mn$, qui reste en outre très constant à l'échelle de l'échantillon. Ce dernier point peut suggérer un contrôle au moins partiellement local de la valeur du rapport $Fe/Fe+Mn$ dans les ferberites, par exemple par la composition de l'encaissant.

Il faut cependant signaler le cas de la ferberite trapue de l'échantillon ECH 65 (stockwerk de la Bosse), qui présente un rapport ferberitique beaucoup plus élevé que celui de tous les autres échantillons de même provenance : il s'agit toutefois d'une ferberite isolée dans une veinule à micas blancs phengitiques, que l'on peut donc considérer à bon droit comme tardive, au même titre que ces micas.

a) Mise en évidence d'une zonalité verticale

Le tableau X met aussi en évidence une très nette dérive verticale des compositions, également visible sur les figures 10 a et b, où le système filonien a été représenté en « gommant » le granite de Beauvoir entre les cotes 100 et 750, conformément au modèle mis au point pour expliquer l'intrusion de ce granite (Jacquot et Gagny ce volume).

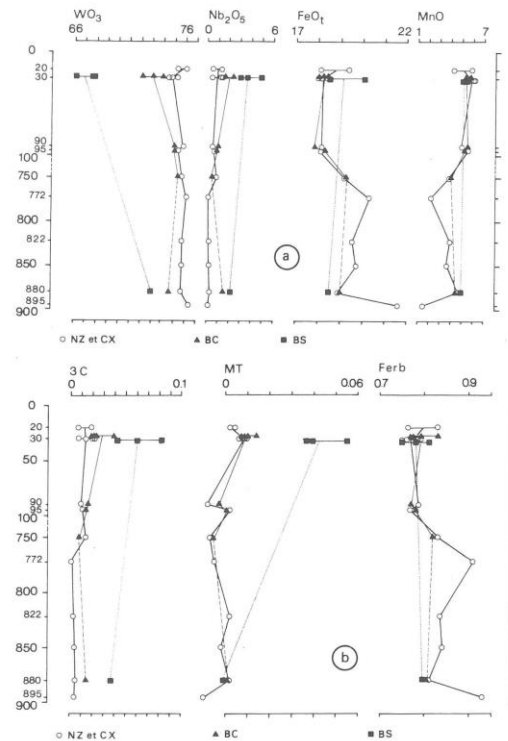


Fig. 10 — Zonalité verticale dans le stockwerk :
a. Variations de la composition brute des ferberites avec la profondeur ; on a soustrait le granite de Beauvoir entre les cotes 100 et 750 pour reconstituer au plus près la structure initiale du stockwerk, qui reste cependant un peu dilaté entre 750 et 900 m ; b. Même figure que la précédente, mais avec les paramètres cristallochimiques : C, taux de columbite ; MT, taux de la substitution à Fe^{3+} ; Ferb, taux de ferberite.

Vertical zonation of ferberite composition in the stockwerk :
Variation of raw composition with depth ; the stockwerk is reconstructed by removing the Beauvoir granite between the 100 and 750 levels, but remains a little bit expanded between the 750 and 900 levels ; b. Same figure, with crystal chemistry parameters as devised in the text : C, columbite ratio ; MT, Fe^{3+} substitution ratio ; Ferb, ferberite ratio.

Il faut souligner ici que le stockwerk d'Echassières, avec ses ferberites de petite taille, et son développement vertical reconnu sur près de 160 m grâce au sondage profond, fournit une occasion exceptionnelle de suivre l'évolution verticale du chimisme des minéraux tungstifères ; le fait que la partie du stockwerk actuellement explorée soit probablement plus distale relativement au granite associé que la plupart des gisements connus ne peut qu'ajouter à cet intérêt.

Les variations observées portent sur :

- les teneurs en niobium, qui décroissent spectaculairement pour tous les faciès lorsque l'on s'enfonce dans le dispositif ; il n'y a pas en revanche de variation sensible des teneurs en tantale, qui restent toujours à la limite de détection.
- les taux de ferberite (rapport $Fe/Fe+Mn$) croissent avec la profondeur, avec un saut apparent au passage du granite/panneaux enclavés ; serait-ce l'indication qu'il manque une

partie du stockwerk ? Les ferbérîtes les plus profondes sont ainsi des ferbérîtes presque pures.

— la teneur en Fe^{3+} , qui n'est systématiquement présent que dans le stockwerk de la Bosse (fig. 10 b) ; faut-il rapprocher ce fait de l'augmentation des teneurs en Fe^{3+} enregistrées par les micas de la partie sommitale de l'intrusion de Beauvoir (Monier et al. ce volume), et attribuer la présence de Fe^{3+} dans les ferbérîtes à une oxydation induite par cette intrusion ? On comprend cependant mal, dans cette hypothèse, pourquoi ce sont les cœurs zonés des cristaux (faciès BC, et surtout, BS) qui présentent les teneurs les plus élevées en Fe^{3+} .

b) Incidence des fluides tardifs sur les ferbérîtes : mise en évidence d'une tendance à la hübnérîtisation

Les ferbérîtes présentent dans leur morphologie des traces de l'évolution du stockwerk postérieurement à leur dépôt. Ce sont essentiellement des figures de corrosion :

— corrosion des bandes sombres, probablement pas d'origine supergène, puisqu'elle s'observe aussi en sondage, où elle est d'ailleurs maximale ;

— corrosion plus importante, démarant sur les bandes sombres, et développée en microcavités, ultérieurement colmatées par des minéraux variés : quartz, zircon, mica blanc phengitique ; l'absence de topaze dans de telles cavités peut suggérer leur caractère tardif par rapport à ce minéral. Il y a, plus rarement, des ébauches de frange de surcroissance, généralement au contact de micas blancs.

Des perturbations de la composition des ferbérîtes s'ajoutent à ces manifestations ; certains cristaux montrent, en effet, en liaison apparente avec la présence de micas blancs, des plages à composition plus riche en manganèse, allant des wolframites aux hübnérîtes franches (tabl. 11). Ces plages représentent le plus souvent des zones plus ou moins fissurales surimposées à la morphologie primitive du cristal (planche IV) ; mais il peut s'agir aussi de franges de surcroissance ; cependant, le caractère riche en manganèse de ces franges n'est pas systématique : certaines d'entre elles ont des compositions franchement ferbérîtiques.

Cet ensemble de faits s'intègre bien dans une logique simple si on les interprète à la lumière des résultats obtenus sur la variation du rapport $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mn}$ dans les « columbites » (voir plus haut) : celles-ci, qui poussent dans une phase précoce du colmatage de microcavités de corrosion des ferbérîtes par des micas blancs, sont donc de ce fait représentatives des variations du milieu de croissance au cours des phases tardives où se développent les altérations à manganèse.

Or, on l'a vu plus haut, ces « columbites » sont caractérisées par l'évolution au cours du temps de leur rapport $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mn}$: celui-ci décroît en effet continuellement depuis des valeurs élevées de type ferbérîtique, avec cependant une brève remontée avant la fin de la croissance (fig. 7). Ainsi peuvent s'expliquer à la fois les transformations et franges de surcroissance à taux de hübnérîte variables, et les franges de surcroissance à compositions ferbérîtiques, qui peuvent aussi bien représenter le début que la fin de cette évolution. De même, le caractère anormalement ferbérîtique des ferbérîtes tardives du stockwerk de la Bosse trouve-t-il ainsi son explication.

	1	2	3	4	5	6
WO_3	75,92	76,26	75,76	75,40	76,98	75,87
Nb_2O_5	0,18	0,05	0,03	0,95	0,16	0,00
Ta_2O_5	0,11	0,00	0,01	0,06	0,02	0,12
FeO	16,38	17,52	10,47	13,69	5,17	5,37
MnO	7,53	6,17	13,57	10,43	18,81	18,65
Somme	100,11	100,01	99,84	100,52	101,14	100,01
Formule structurale sur la base de 4 oxygènes						
W	0,991	0,998	0,992	0,977	0,994	0,991
Nb	0,004	0,001	0,001	0,021	0,004	0,000
Ta	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002
Fe	0,690	0,740	0,442	0,572	0,215	0,226
Mn	0,321	0,264	0,581	0,442	0,794	0,796
Somme	2,007	2,003	2,015	2,012	2,006	2,014
Ferb	0,682	0,737	0,432	0,564	0,213	0,221

Tabl. XI. — Analyses représentatives à la microsonde électronique (CAMEBAX, Nancy 1) des wolframites et hübnérîtes du stockwerk d'Échassières (voir texte).

1-3 : ECH 822,12 ; 1 (102) : frange de surcroissance 2 (106) : diffusion dans le cristal 3 (104) : fissure 4 : ECH 65-b-201 : fissure 5-6 : ECH 66-b-201 et 203 : franges de surcroissance

Taux de ferbérîte « normaux » des ferbérîtes correspondantes : ECH 822,12 : 0,84 ; ECH 65-b : 0,76 ; ECH 66-b : 0,83.

Typical electron-probe analyses (CAMEBAX, Nancy 1) from wolframites and hübnérîtes in the Echassières stockwerk (see text).

1-3 : ECH 822,12 ; 1 (102) : growth rim 2 (106) : diffusion inside the crystal 3 (104) : fissure 4 : ECH 65-b-201 : fissure 5-6 : ECH 66-b-201 and 203 : growth rim

« Normal » ferbérîte ratios in the corresponding ferberites : ECH 822,12 : 0,84 ; ECH 65-b : 0,76 ; ECH 66-b : 0,83.

Il apparaît donc que les fluides tardifs qui percolent dans le stockwerk après l'intrusion du granite de Beauvoir, au moment où se développent les corrosions à mica blanc, sont en équilibre avec des wolframites à composition riche en manganèse. On peut alors se poser la question de l'âge et de la signification des filons quartzeux à hübnérîte du Mazet, au Nord du granite des Colettes ; classiquement considérés comme une manifestation hydrothermale liée à ce granite (Aubert 1969), ne pourraient-ils pas en fait représenter, à la lumière des développements qui précèdent, une minéralisation associée à l'intrusion du granite de Beauvoir ?

6. — Conclusion

Le stockwerk à ferbérîte d'Échassières, polyphasé, occupe apparemment une position distale par rapport au granite associé qui reste inconnu, mais dont des aplites et aplopegmatites pénécontemporaines de la minéralisation en tungstène représentent peut-être une manifestation.

Les ferbérîtes sont riches en niobium et pauvres en tantale ; elles correspondent à une solution solide (ou à une syn-

cristallisation infra-micrométrique) ferbérîte-ferrocolumbite, combinée à des substitutions mineures impliquant du Fe^{3+} . En une localité donnée, leurs taux de ferbérîte sont remarquablement constants au cours des étapes successives de la minéralisation, ce qui suggère un contrôle local de la composition; tandis que leurs teneurs en niobium montrent une variation au cours du temps: succession de séquences cristallines zonées riches en niobium-cristaux non zonés plus pauvres au cours de chaque phase de minéralisation.

Le stockwerk montre une remarquable zonation verticale. On observe en effet avec la profondeur une diminution des teneurs en niobium et une augmentation des teneurs en fer, le rapport $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mn}$ étant pratiquement celui de ferbérîtes pures pour les échantillons les plus profonds; de même, la présence de Fe^{3+} n'est systématique que pour les échantillons de surface. Comme ces phénomènes se corrélaient avec une augmentation de l'intensité des altérations d'éponte (presque inexistantes en surface) avec la profondeur, on peut penser qu'ils reflètent la proximité croissante du granite de la Bosse.

Les effets de l'intrusion du granite de Beauvoir et des circulations hydrothermales subséquentes sont considérables. Le stockwerk est envahi par une topaze et des micas tardifs (lithinifères puis phengitiques); ses ferbérîtes sont corrodées à des degrés divers, et des minéraux niobo-tantalifères (« columbites » tungstifères et titanifères) s'y développent localement, tandis que des transformations en wolframite et hübnerite ont lieu sporadiquement à la faveur de circulations fissurales, et de diffusions à partir de la périphérie des cristallites.

Remerciements

Nous remercions D. Ohnenstetter pour les analyses de micas et de topazes sur la microsonde du B.R.G.M., ainsi que O. Barez pour les manipulations sur l'interféromètre infrarouge du Laboratoire de physico-chimie des surfaces de Nancy. M.M. A. Autran, L. Burnol, M. Cuney, M. Stemprok et un relecteur anonyme ont fait progresser le manuscrit par leurs remarques constructives.

Références bibliographiques

- AÏSSA M. (1987).— Reconstitution d'un système de paléocirculations hydrothermales et ses conséquences métallogéniques: le District d'Échassières (Massif Central français). Thèse Doct. INPL (Nouvelle Thèse), Inst. nation. polytech. de Lorraine, Nancy, France, 257 p.
- AUBERT G. (1969).— Les coupôles granitiques de Montebres et d'Échassières (Massif Central français) et la genèse de leurs minéralisations en Sn, Li, W et Be. *Mém. BRGM*, 46, pp. 1–345.
- BAUMER A., GUY B., OHNENSTETTER D. (1986).— Scheelite, ferbérîte: étude de la coprécipitation avec la cassitérite par voie hydrothermale. In: Colloque PIRSEM, Facteurs de concentrations des matières premières minérales, Montpellier 1986, Résumés, p. 22.
- BEDDOE-STEPHENS B., FORTEY, N.J. (1981).— Columbite from the Carrock Fell tungsten deposit. *Mineral. Mag.* 44, pp. 217–223.
- CERNY P. (1986).— Ore minerals of niobium and tantalum. In: Lanthanides, tantalum and niobium. Mineralogy, geochemistry, characteristics of primary ore deposits, prospecting, processing and applications. S.G.A. Workshop, Berlin, 1986, Extended Abstracts, 1–7.
- CERNY P., ERCIT T.S. (1985).— Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. *Bull. Minéral.* 108, pp. 499–532.
- CUNEY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON P., FEYBESSE J.-L., GAGNY C., JACQUOT T., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G., TEGYEY M. (1986).— Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur la coupole de granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir (Massif Central, France). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, 303, (2), pp. 569–574.
- DERRE C. (1982).— La province à Sn-W Ouest-Européenne. Histoire de divers types de gisements du Massif Central, des Pyrénées et du Portugal. Distribution des gisements. Thèse Doct. Etat. Univ. P. et M. Curie (Paris VI), vol. 1, 345 pp., vol. 2, 421 p.
- JACQUOT T.H. (1984).— Essai d'interprétation du stockwerk à ferbérîte du gisement de la Bosse (Massif d'Échassières, Massif Central français). Rapport préliminaire GPF2, inédit, 16 p.
- JACQUOT T.H., GAGNY C.L. (1985).— Pétrologie structurale du Massif d'Échassières (Massif Central français): mise en évidence de l'activité de linéaments lors de sa genèse. In: Doc. BRGM 95-8, pp. 39–53.
- KELLY W.C., RYE R.O. (1979).— Geologic, fluid inclusion and stable isotope studies of the tin-tungsten deposit of Panasqueira, Portugal. *Econ. Geol.*, 74, pp. 1721–1822.
- KOSAKEVITCH A. (1976).— Évolution de la minéralisation en Li, Ta et Nb dans la coupole granitique de Beauvoir (massif d'Échassières, Allier). Rapport BRGM, 96 p.
- MANNING D.A.C., HENDERSON P. (1984).— The behaviour of tungsten in granitic melt-vapour systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86, pp. 286–293.
- MONIER G., TEGYEY M. (1985).— Étude pétrographique préliminaire (du sondage Échassières 1). Doc. BRGM, n° 100 pp. 41–102.
- NICOLAS V.A. (1985).— Le gisement wolframifère de Leucamp dans son environnement régional (Châtaigneraie du Cantal, France). Thèse Doct. 3^e Cycle, École nat. sup. Mines Paris, pp. 1–384.
- RAMSAY J.G. (1980).— The crack-seal mechanism of rock deformation. *Nature*, 284, pp. 135–139.
- ROSEN A. (de) (1965).— Contribution à l'étude géologique du massif granitique des Colettes, de ses minéralisations et de ses altérations (Échassières, Allier). Thèse Doct. 3^e Cycle, Univ. Paris, 162 p.
- ROSEN A. (de) (1966).— Évolution continue d'un massif granitique et succession minérale: le massif des Colettes (Échassières, Allier). Deuxième partie: filons, altérations et minéralisation. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristall.*, 89, pp. 155–176.
- ROTH R.S., WARING J.L. (1964).— Ixiolite and other polymorphic types of FeNbO_4 . *Amer. Mineral.*, 49, pp. 242–246.
- SCHROCKE H. (1961).— Heterotype Mischbarkeit zwischen Wolframite- und Columbitgruppe. *Beitr. Mineral. Petrol.*, 8, pp. 92–110.

Planche I

Plate I

Fig. 1. — Agrégat de petits prismes à formes simples mimant une morphologie prismatique (para-cristal?). Échantillon ECH 94.45, sondage Échassières 1, L.R.; la barre représente 1 mm.

Little ferberite prisms aggregated according to a prismatical shape (para-crystal?). ECH 94.45 sample, Échassières 1 drill, core, R.L.; the scale bar is 1 mm.

Fig. 2. — Cristaux lancéolés à cœur aciculaire finement zoné. Échantillon ECH 90.90, sondage Échassières 1, L.R.; la barre représente 1 mm.

Lanceolate crystals, with needle-like delicately zoned cores. ECH 90.90 sample, Échassières 1 drill core, R.L.; the scale bar is 1 mm.

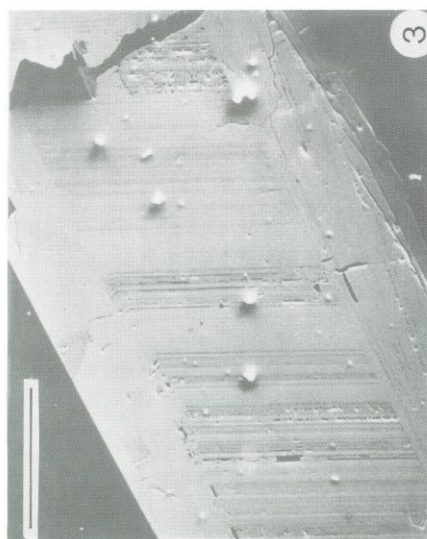
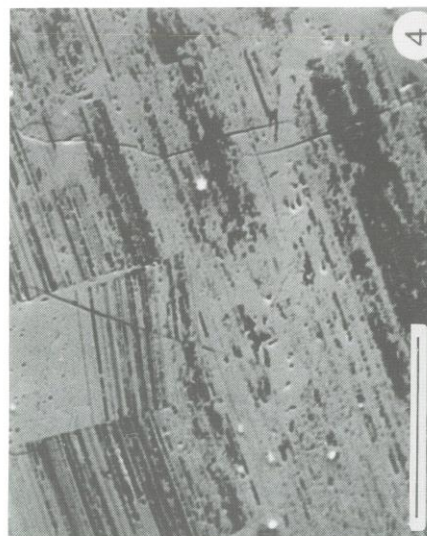


Fig. 3. — Détail de la zonation d'un prisme lancéolé; image en électrons secondaires à la microsonde électronique (CAMEBAX); noter l'alternance de bandes claires et sombres, reflétant des teneurs variables en niobium, et soulignant les zones de croissance, au cœur du cristal; on observe une forte corrosion, qui débute toujours dans les bandes sombres. Échantillon ECH 45-2, stockwerk de la Bosse; la barre représente 40 micromètres.

Detail of the zonation in a lanceolate crystal; backscattered electron imagery with an electron microprobe (CAMEBAX); in the core, alternating lighter and darker strips are related to the variable niobium content; they underline the growth zones; there is a strong corrosion, always beginning within the darker strips. ECH 45-2 sample, Bosse stockwerk; the scale bar is 40 micrometers.

Fig. 4. — Variante de la zonation précédente montrant des dislocations; image en électrons secondaires à la microsonde électronique (CAMEBAX); noter l'intense corrosion au niveau des bandes sombres; cette corrosion est peut-être à mettre en relation avec le développement de microcavités de dissolution remplies de mica blanc dans la ferberite. Échantillon ECH 5-3, stockwerk de la Bosse; la barre représente 40 micromètres.

Same kind of zoned crystal, with dislocations; backscattered electron imagery with an electron microprobe (CAMEBAX); note the strong corrosion within the darker strips, probably related to the development of dissolution microcavities infilled with white micas in this crystal. ECH 5-3 sample, Bosse stockwerk, the scale bar is 40 micrometers.

Planche II

Plate II

Fig. 1. — Répartition aléatoire des plages sombres (plus riches en niobium) et de plages claires dans un agrégat de prismes lancéolés de ferberite soumis à un recuit (voir texte) : image en électrons secondaires à la microsonde électronique (CAMEBAX). Échantillon ECH 41, stockwerk de la Bosse ; la barre représente 40 micromètres.

Patchy zoning with darker zones (niobium richer) and lighter zones, within an annealed aggregate of lanceolate crystal (see text) : backscattered electron imagery with an electron microprobe (CAMEBAX). ECH 41 sample, Bosse stockwerk ; the scale bar is 40 micrometers.

Fig. 2. — Bande de croissance mâclée (?) en bandes sombres (fortement corrodées) et en bandes claires dans un cristal de ferberite à morphologie trapue : image en électrons secondaires à la microsonde électronique (CAMEBAX). Échantillon ECH 49, stockwerk de la Bosse ; la barre représente 40 micromètres.

Twinned (?) growth strip, with darker, strongly corroded, strips and lighter strips, within a stout ferberite crystal backscattered electron imagery with an electron microprobe (CAMEBAX). ECH 49 sample, Bosse stockwerk ; the scale bar is 40 micrometers.

Fig. 3. — Prisme de ferberite à morphologie trapue. Échantillon ECH 94.45, sondage Échassières 1, L.R. ; la barre représente 1 mm.

Stout prism of ferberite. ECH 94.45 sample, Échassières 1 drill, core, R.L. ; the scale bar is 1 mm.

Fig. 4. — Cristal de « columbite » développé en remplissage précoce dans une microcavité de dissolution de la ferberite, colmatée de mica blanc (en noir) : image en électrons secondaires à la microsonde électronique (CAMEBAX) ; entre la ferberite zonée (voir la figure 4, planche I) et la « columbite », s'intercale une ferberite à morphologie déchiquetée (corrosion ? ou habitus dendritique ?) enrichie en niobium et, dans une moindre mesure en tantale (voir texte). Échantillon ECH 5-3, stockwerk de la Bosse ; la barre représente 40 micromètres ; w ferberite « corrodée ».

« Columbite » crystal infilling a dissolution microcavity within a ferberite crystal (see figure 4, plate I) ; late infilling is phengitic white mica (in black) : backscattered electron imagery with an electron microprobe (CAMEBAX) ; between the zoned ferberite and the « columbite », there is a shredded ferberite (corrosion ? dendritic habit ?), Nb- and Ta-enriched (see text). ECH 5-3 sample, Bosse stockwerk, the scale bar is 40 micrometers ; w « corroded » ferberite.

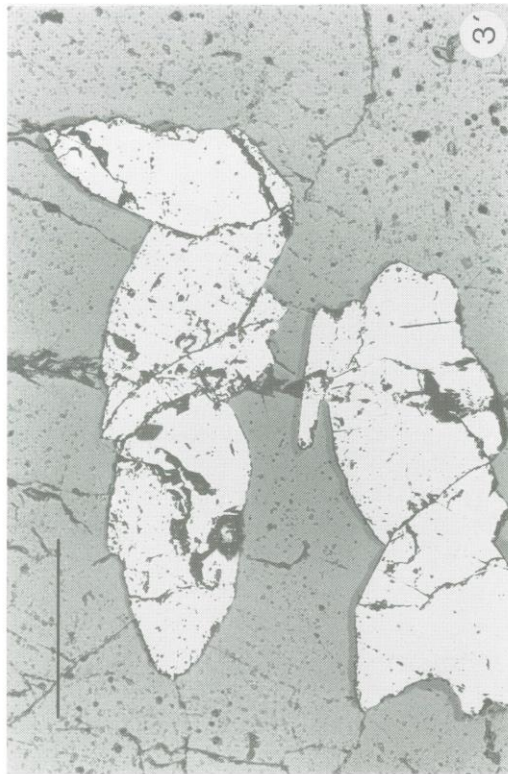
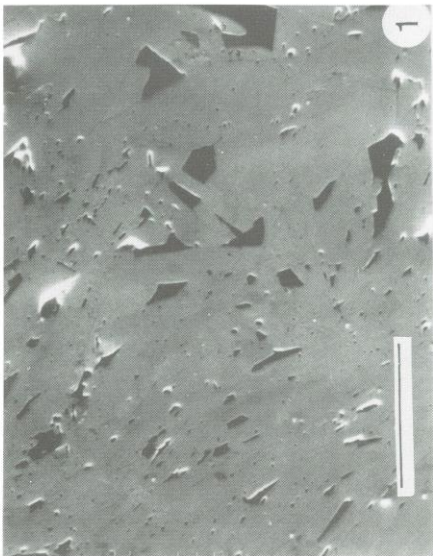
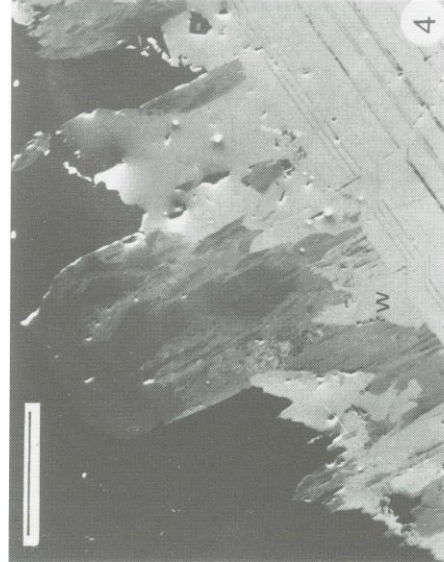


Planche III*Plate III*

Répartition de quelques éléments dans le cristal de « columbite » de la figure 4 (planche II) ; images à la microsonde électronique (CAMEBAX). La barre représente 20 micromètres.

Distribution of some elements within the « columbite » crystal of figure 4 (plate II) ; electron microprobe imagery (CAMEBAX). The scale bar is 20 micrometers.

Fig. 1. — Image en électrons secondaires ; noter les fines bandes de croissance soulignées par la zonation chimique ; ces bandes viennent buter sur de curieux minéraux à morphologie dendritique.

Backscattered electron imagery ; note the thin growth zones underlined by the chemical zonation ; these zones about onto curious dendritic minerals enclosed within the « columbite ».

Fig. 2. — Image K α du tungstène ;
noter les fortes teneurs en tungstène des dendrites.

Tungsten K α scanning ; note that dendrites are W-rich.

Fig. 3. — Image K α du manganèse ;
noter la nette zonation, notamment en fin de croissance du prisme de « columbite »

Manganese K α scanning ;
note the zonation, specially at the late stage growth.

Fig. 4. — Image K α du titane ;
cet élément participe à la fine zonation de croissance de la « columbite ».

Titanium K α scanning ;
this element contributes to the delineation of the thin growth zones.

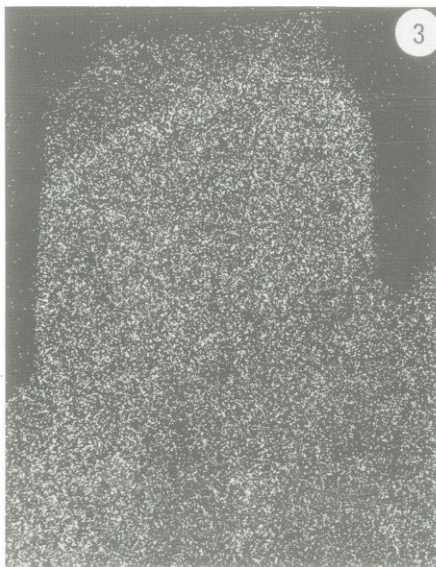


Planche IV*Plate IV*

Exemple de « hübnérization » d'un prisme de ferberite (échantillon ECH 822.12, sondage Échassières 1)

A case of « hübnérization » of a ferberite crystal (ECH 822.12 sample, Échassières 1 drill core)

Fig. 1. — Le prisme, rompu avec intercalation de mica blanc (m) et de bismuthinite (b), développe une frange néoformée à contours automorphes (f). L.R. ; la barre représente 100 micromètres.

The prism is disrupted, with intercalation of phengitic white mica (m) and bismuthinite (b); a neoformed automorphic rim is developed (f). R.L. ; the scale bar is 100 micrometers.

Fig. 2. — L'image X du manganèse pour la plage f de la figure 1 et les régions adjacentes (K α , CAMEBAX), montre que cette frange correspond à un enrichissement en manganèse, diffusant vers le cœur du cristal ; des enrichissements beaucoup plus marqués correspondent à des fissures, à partir desquelles s'observe également une diffusion ; la barre représente 50 micromètres.

Manganese K α scanning (CAMEBAX) for the f region of figure 1, and the peripheral regions ; the automorphic rim is Mn-enriched, and manganese is clearly propagating towards the crystal core, stronger enrichment zones are seen along fissures ; the scale bar is 50 micrometers.

