

## Interrelations et évolution comparée de la cassitérite et des niobotantalates dans les différents faciès du granite de Beauvoir (Massif d'Échassières)

Ru Chen Wang \*, François Fontan \*, Pierre Monchoux \*

Mots-clés : Oxyde, Cassitérite, Niobotantalate, Columbite, Microlite, Données microsonde électronique, Granite (Granite Beauvoir)  
Allier (Échassières)

### Résumé

Le granite de Beauvoir renferme, en inclusion dans la lépidolite ou la topaze, de la cassitérite et des niobotantalates (columbite, microlite) dont l'abondance et les dimensions des cristaux augmentent depuis le faciès inférieur (III) jusqu'au supérieur (I), conformément à l'évolution de la composition chimique globale du granite.

Dans les cassitérites, les teneurs en Nb et Ta augmentent du faciès III au faciès II, mais diminuent ensuite, contrairement à l'évolution du granite, dans le faciès I, suggérant que ces éléments ne s'intègrent plus au réseau de la cassitérite au-dessous d'une certaine température. Au sommet du faciès II, les cassitérites sont riches en exsolutions de columbite dont la formation est attribuée à la diminution de température. Dans ce faciès, Ta serait accepté de préférence à Nb et Fe de préférence à Mn dans la cassitérite, la préférence pour Fe subsistant seule dans le faciès III.

Les niobotantalates, essentiellement des manganocolumbites, sont soit indépendantes de la cassitérite, soit en inclusions primaires, soit en exsolution dans ce minéral. Ces trois populations sont chimiquement différentes, les inclusions primaires étant intermédiaires entre les deux autres ; les différences entre les columbites indépendantes et primaires suggèrent, pour ces dernières, des échanges par diffusion avec la cassitérite. Les teneurs en Nb et Ta s'accroissent, dans les trois populations, de la base vers le sommet, comme pour la composition globale. Par contre, la température semble régir les échanges entre (Sn, Ti) et (Fe, Mn) (Nb, Ta) d'une part, entre (Nb, Ta) et (Fe, Mn) d'autre part.

### Abstract

*Interrelationships and compared evolution of the cassiterite and the columbotantalates in the Beauvoir granite (Echassières granitic massif).*

The Beauvoir granite is one of three units of the Echassières granitic complex. A 900 m deep bore hole realized in this granite gives a vertical petrographic zonation with three superposed facies : B I (97-480 m), B II (480-746 m) and B III (746-789 m).

The granite contains, in the lepidolite or in the topaz, inclusions of cassiterite and columbotantalates (columbite, microlite), whose abundance and dimensions increase from the facies B III to the facies B I, in agreement with the evolution of the granite bulk composition.

In the cassiterite crystals, trace element-contents (Nb + Ta + Fe + Mn) increase from B III to B II, but decrease in B I, unlike the evolution of those trace elements in the granite. This may suggest that below a certain temperature there is a minor ability of the trace elements to enter the cassiterite lattice. At the summit of B II, the cassiterite crystals are rich in exsolutions of columbite, whose formation is attributed to the temperature decrease. In this facies, Ta would be accepted in preference to Nb and Fe in preference to Mn in the cassiterite, the preference for Fe subsists only in B III.

The columbotantalates, essentially manganocolumbites, are either independent of the cassiterite, either as primary inclusions or as exsolution in this mineral. All three populations chemically differ from one to another, the primary inclusions being intermediate between two others. It is thus suggested that there is an exchange by diffusion between cassiterite and the primary inclusions.

The contents of Nb and Ta increase, in all populations, from the bottom toward the summit, as for the bulk composition of the granite. In contrast, the temperature seems to govern on the exchanges between (Sn, Ti) and (Fe, Mn), (Nb, Ta) on one hand, between (Nb, Ta) and (Fe, Mn) on the other hand.

\* Laboratoire de Minéralogie et Cristallographie, UA 67, Université Paul-Sabatier, 39, Allées Jules-Guesde, 31400 Toulouse

## Introduction

Le granite à albite-lépidolite de Beauvoir est l'unité magmatique la plus récente du complexe granitique d'Échassières, deux autres unités étant celles des Colettes et de la Bosse. Les études réalisées depuis une vingtaine d'années sur ce complexe, notamment par G. Aubert (1969) et A. Kosakevitch (1976) ont montré que la minéralisation à Sn, Ta, Nb, Li et Be, disséminée dans le granite de Beauvoir, s'était déposée au cours de la mise en place de ce granite.

Un sondage GPF de 900 m a été réalisé sur le granite de Beauvoir. Il a été mis en évidence la structure zonée du granite en trois faciès superposés (Cuney *et al.*, 1985),

Faciès I (B I. 97-480 m), caractérisé par l'abondance de la lépidolite pauvre en fer et de l'albite;

Faciès II (B II. 480-746 m), à ferro-lépidolite;

Faciès III (B III. 746-789 m), à feldspath potassique rose.

Cette zonalité pétrographique et minéralogique est comparable, entre autres, à celle d'un granite du Sud de la Chine, minéralisé en Ta, Nb, Sn et Li (Lu *et al.*, 1975).

Le présent travail effectué dans le cadre du thème 8 de la GPF3, s'intègre dans les études portant sur l'évolution des minéralisations en Sn, Nb, Ta. Il a pour but de préciser les relations entre cassitérite et niobantalates et de suivre leur évolution minéralogique, chimique et cristallographique dans les faciès du granite.

La totalité des analyses utilisées pour ce travail est publiée dans le Document BRGM n° 124.

## Cassitérite

### 1. — Morphologie, homogénéité, distribution dans les faciès du granite

La cassitérite se présente dans tous les faciès du granite sous forme de cristaux bipyramidés avec prismes courts, généralement inclus dans la lépidolite ou la topaze. Du bas du granite (faciès III) vers le haut (faciès I), on note l'accroissement de l'abondance des cristaux et de leur taille, leur longueur variant de 20-100  $\mu\text{m}$  à 1-1,5 mm.

Les cassitérites du faciès I sont d'aspect plus homogène que celles des deux autres faciès, dans lesquels l'hétérogénéité est due à deux causes :

- la présence de zones à pléochroïsme de réflexion gris à incolore ; ces zones constituent le plus souvent la bordure des cristaux, mais on a aussi trouvé des taches plus petites, à tendance polygonale, dispersées de façon apparemment quelconque dans des cristaux ; plusieurs analyses chimiques sur une cassitérite hétérogène du faciès II montrent que la partie pléochroïque est plus riche en éléments en trace (Nb, Ta, Fe, Mn et Ti) que le reste de la cassitérite.
- la présence d'inclusions de columbités (voir plus loin).

### 2. — Éléments en trace et inclusions

43 analyses à la microsonde (CAMEBAX SX50, Toulouse III) ont été réalisées sur les cassitérites des faciès I (9 analyses sur 4 cassitérites), II (23 analyses sur 14 cassitérites) et III (11 analyses sur 3 cassitérites) pour les éléments suivants : Sn, Nb, Ta, Fe, Mn, Ti, Sc, Ca, Na, W (tabl. I). Les teneurs varient généralement d'un faciès à l'autre (fig. 1).

#### a) Localisation des éléments en trace

Les cassitérites du faciès I contiennent une faible quantité de Nb, Ta, Fe et Mn. Le nombre total d'atomes de ces quatre éléments varie de 0,005 à 0,062 avec une moyenne de 0,020. Aucune inclusion n'a été observée dans ces cassitérites.

Les cassitérites du faciès II sont remarquablement riches en Nb, Ta, Fe, Mn, dont le nombre total d'atomes peut atteindre 0,088 par maille avec une moyenne de 0,031. Ces cassitérites renferment de nombreuses inclusions de columbotantalite.

Dans le faciès III, les teneurs totales des cassitérites en ces éléments oscillent entre 0,005 et 0,065 avec une moyenne 0,020. Les cassitérites contenant des inclusions sont beaucoup moins fréquentes et le nombre des inclusions beaucoup plus faible que dans le faciès II.

Les teneurs en Sc et W sont inconstantes et varient d'un faciès à l'autre de façon quelconque, Sc atteignant des teneurs plus élevées (1 à 2 %) que W (0,5 à 1 %) (fig. 1b).

#### b) Interprétation

Compte tenu de ces remarques, il est possible d'attribuer l'évolution des teneurs en éléments traces et en inclusions dans les cassitérites des trois faciès, d'une part à la variation de la composition globale du granite Rossi *et al.*, (ce volume), d'autre part à la variation de température de cristallisation, en supposant un abaissement de cette température du faciès III au faciès I, montré par les études expérimentales de Pichavant *et al.*, (ce volume).

Dans le faciès III, la teneur totale en Nb et Ta est faible (moyenne de 70 ppm). Cette faiblesse est reflétée par la pauvreté des cassitérites aussi bien en Nb et Ta qu'en inclusions de columbotantalites.

Dans le faciès II, le granite est plus riche en Nb et Ta que dans le faciès III. La teneur totale en Nb et Ta peut atteindre 120 ppm. Par conséquent, un liquide plus riche en Nb, Ta (et aussi en Sn) cristallise à températures encore hautes en donnant d'abord des cristaux homogènes de cassitérite. Puis les teneurs en Nb et Ta augmentent. La cassitérite qui cristallise, enrichie en ces éléments est alors pléochroïque. La température diminuant, il y a exsolution de Nb et Ta sous forme d'inclusions de columbotantalite dans les zones pléochroïques.

Nb et Ta continuent à s'enrichir dans le granite. Jusqu'au faciès I, les teneurs moyennes sont de 120 ppm pour Nb et de 137 ppm pour Ta, soit respectivement 6 et 65 fois supérieures aux clarkes (Nb : 20 - Ta : 2,1). La température devient alors probablement trop basse pour que Nb et Ta puissent entrer dans la cassitérite en cours de cristallisation ; ils cristallisent sous forme de columbotantalates indépendants.

<u>Cassitérites</u>											
No :	Na2O	Nb2O5	Ta2O5	SnO2	TiO2	FeO	MnO	WO3	CaO	Sc2O3	Total :
01(3)	0,041	0,315	0,665	99,257	0,140	0,169	0,000	0,158	0,302	0,010	101,057
BI 02(2)	0,000	1,058	2,078	95,218	0,189	0,127	0,150	0,000	0,227	0,000	99,047
05(2)	0,032	0,175	0,930	99,182	0,157	0,158	0,032	0,000	0,237	0,439	101,342
18(2)	0,034	1,759	3,384	94,454	0,273	0,503	0,024	0,118	0,267	0,159	100,975
06(3)	0,026	1,004	1,973	97,327	0,069	0,170	0,175	0,042	0,292	0,000	101,078
08(5)	0,004	1,243	1,680	97,946	0,195	0,387	0,070	0,085	0,241	0,145	101,996
09(5)	0,004	0,749	1,244	97,927	0,376	0,390	0,000	0,199	0,229	0,243	101,361
BII 10(1)	0,000	2,037	3,155	94,345	0,179	0,717	0,000	0,000	0,310	0,000	100,743
12(1)	0,000	0,709	3,197	95,409	0,204	0,696	0,000	0,200	0,224	0,948	101,567
23(5)	0,035	0,681	1,014	98,615	0,235	0,216	0,029	0,280	0,241	0,671	102,117
25(1)	0,000	3,150	3,835	91,945	0,445	1,222	0,076	0,000	0,175	0,000	100,849
BIII 14(2)	0,003	1,939	2,707	95,413	0,185	0,760	0,003	0,025	0,231	0,000	101,266
16(9)	0,005	0,524	0,783	99,225	0,201	0,099	0,008	0,189	0,267	0,284	101,585
<u>Columbo-tantalites</u>											
01(3)	0,033	66,267	14,060	0,146	0,040	1,132	16,794	0,796	0,038	0,154	99,460
02(2)	0,000	64,119	16,275	0,141	0,057	0,793	17,046	0,439	0,012	0,103	99,016
BI 05(4)	0,012	59,457	21,494	0,150	0,230	3,424	14,696	0,671	0,029	0,000	100,176
17(5)	0,015	57,645	24,249	0,091	0,124	1,316	16,848	0,228	0,013	0,111	100,693
18(5)	0,026	63,103	16,469	0,119	0,204	1,189	17,594	0,680	0,000	0,486	99,870
0631(1)	0,000	25,564	55,526	0,000	0,414	1,088	14,512	0,000	0,000	0,498	97,604
081(1)**	0,000	64,408	11,128	1,310	2,097	4,519	13,265	1,634	0,000	2,226	100,587
082(2)**	0,000	51,770	22,776	1,730	2,067	2,211	15,037	2,989	0,026	0,737	99,343
084(1)	0,013	62,459	11,082	0,261	1,629	4,866	13,785	3,252	0,000	0,123	97,531
093(3)**	0,003	64,744	10,904	0,444	1,458	6,103	12,366	2,383	0,000	1,025	99,432
0941(2)	0,000	59,714	16,871	0,202	1,440	6,850	11,678	3,243	0,000	0,003	100,001
BII 0945(1)**	0,000	58,852	15,590	2,394	1,621	5,522	11,070	1,998	0,000	2,304	99,968
101(1)**	0,000	51,317	28,331	0,341	0,754	4,169	13,035	0,021	0,001	0,000	97,968
103(2)	0,017	66,937	10,158	0,232	1,420	5,208	13,818	2,123	0,092	0,262	100,267
121(2)	0,019	37,750	42,321	0,439	0,640	5,256	11,509	0,801	0,000	0,463	99,198
122(1)**	0,000	55,820	23,761	0,000	1,056	6,373	11,367	1,410	0,000	0,000	99,787
234(2)**	0,041	53,806	16,721	5,567	1,620	2,424	14,157	2,016	0,000	0,000	96,352
235(3)**	0,003	34,886	40,179	1,396	3,079	13,138	3,433	0,012	0,000	0,000	98,328
251(2)**	0,011	49,274	28,689	0,395	1,686	5,309	12,038	1,429	0,013	0,000	98,844
14(2)	0,007	30,169	51,426	0,374	0,755	4,124	12,023	0,138	0,000	0,046	99,062
161(1)**	0,000	45,549	31,363	0,621	1,630	2,856	14,071	0,335	0,046	0,000	99,472
BIII 166(7)	0,012	59,606	16,486	0,413	1,399	7,074	11,794	2,847	0,002	0,030	99,663
1661(1)**	0,000	53,120	21,274	1,891	2,811	5,072	12,541	1,970	0,000	0,426	99,105
<u>Microlites</u>											
Na2O	Nb2O5	Ta2O5	SnO2	TiO2	FeO	MnO	WO3	CaO	Sc2O3	F	Total :
0241	4,118	16,132	54,515	1,261	0,072	0,000	0,000	0,000	7,238	0,320	1,983 85,638
0361	0,830	9,558	64,305	0,375	0,080	0,043	0,000	0,000	1,992	2,257	0,456 79,895
0561	4,015	7,793	62,526	0,660	0,000	0,063	0,086	0,000	7,761	0,000	2,126 85,029
2123	5,390	17,015	56,193	0,401	0,103	0,021	0,000	0,000	3,468	9,314	0,000 3,906 95,810
1051	3,377	6,439	67,244	1,010	0,315	0,000	0,000	0,000	6,349	0,000	2,119 86,852
*---Inclusions primaires de columbite dans des cassitérites      ***---Ixiolites											
**---Exsolutions de columbite dans des cassitérites      (n) : Nombre d'analyse											

Tabl. 1. — Analyses chimiques à la microsonde des minéraux de Sn Nb, Ta du granite de Beauvoir

Le rapport Ta/Nb + Ta des cassitérites est constamment supérieur à celui de leurs inclusions dans le faciès II, inférieur dans le faciès III (fig. 2). Le rapport Mn/Fe + Mn est toujours inférieur dans les cassitérites par rapport à celui mesuré dans les inclusions. La structure de la cassitérite accepterait donc

Ta de préférence à Nb et Fe de préférence à Mn dans le faciès II ; seule semble subsister la préférence pour le fer à plus haute température (faciès III).

Une petite cassitérite (n° 0642) a été trouvée à 518 m, en inclusion dans un zircon, inclus lui-même dans une topaze.

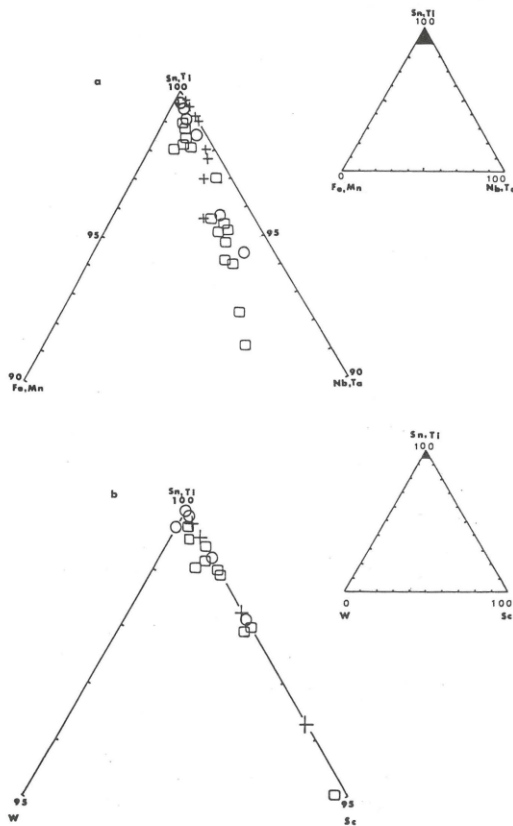


Fig. 1. - Composition des cassitérites du granite de Beauvoir dans le diagramme :

a-(Sn, Ti)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta); b-(Sn, Ti)--W--Sc. B I (O), B II (±), B III (+).

Plusieurs cassitérites correspondent au pôle 100% (Sn, Ti) dans le diagramme 1b.

Composition of the cassiterites from the Beauvoir granite in the diagram : a-(Sn, Ti)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta); b-(Sn, Ti)--W--Sc. B I (O), B II (±), B III (+).

Several cassiterites correspond to the 100% (Sn, Ti) pole in the diagram 1b.

## Niobotantalates

### A. - Columbo-tantalite

#### 1. - Morphologie, types de population, distribution dans les faciès du granite

Les columbotantalites ont été trouvées sur toute la hauteur du sondage profond. Elles se répartissent en cristaux indépendants d'une part, et en inclusions dans des cassitérites d'autre part.

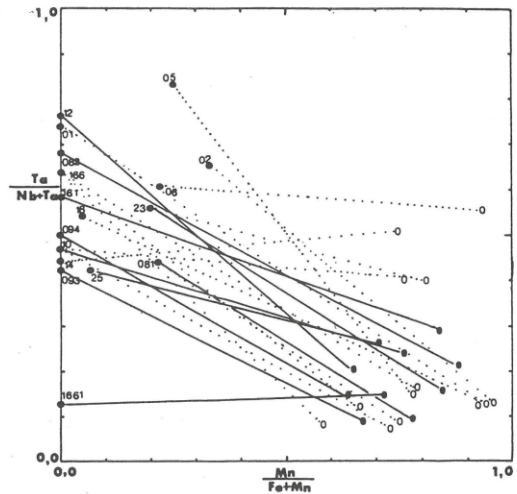


Fig. 2. - Composition des cassitérites (●), de leurs inclusions de columbite (◐), et des columbites indépendantes associées (○), dans le quadrilatère columbite-tantalite.

Chiffre : Numéro de l'échantillon analysé.

Composition of the cassiterites (●), of their columbite inclusions (◐), and the independent columbites associated (○), in the columbite-tantalite diagram.

Numeral : Number of the analysed sample.

Les columbotantalites indépendantes se présentent sous forme prismatique. L'abondance et les dimensions des cristaux augmentent du faciès III (longueur 0,1 à 0,2 mm) au faciès I (longueur 1 à 1,5 mm).

Les inclusions dans la cassitérite ont été rencontrées seulement dans le faciès III et II, et surtout dans ce dernier. Leur longueur est comprise entre 10 et 100  $\mu$ m.

Bien que peu nombreuses, ces inclusions peuvent être classées, par des critères morphologiques texturaux et chimiques, en deux types : inclusions primaires et inclusions orientées que nous supposons correspondre à des exsolutions. Du point de vue morphologique, les inclusions primaires sont automorphes (prismatiques) à subautomorphes (50 - 100  $\mu$ m de long, 10 à 30  $\mu$ m de large), alors que les inclusions en exsolutions se présentent sous forme de taches et veinules (10-20  $\mu$ m de long, 2 à 12  $\mu$ m de large). Les premières sont réparties irrégulièrement dans les cristaux voire « à cheval » sur le contact entre la cassitérite et le minéral adjacent, les secondes ont une disposition orientée dans les minéraux-hôtes.

Une ixolite xénomorphe (analyses n° 2346, 2351, 2352) a été observée en syncristallisation avec une cassitérite contenant de nombreuses exsolutions de columbite.

#### 2. - Compositions chimiques

55 analyses portant sur 28 columbotantalites ont été réalisées à la microsonde (tabl. I).

**a) Evolution des rapports Ta/Nb + Ta et Mn/Fe + Mn**

Dans le diagramme atomique Ta/Nb + Ta et Mn/Fe + Mn les columbotantalites indépendantes sont toutes groupées dans le domaine des mangano-columbites (fig. 3a). On constate que ces columbites évoluent d'une façon générale du faciès III au faciès I. Cette évolution se traduit par la croissance des rapports Ta/Nb + Ta et Mn/Fe + Mn. Cependant, quelques columbites des faciès II et III ont les rapports Ta/Nb + Ta plus élevés que les autres ; leur composition particulière pourrait être liée à une concentration locale en Ta dans le magma. Quant aux inclusions de columbotantalite (primaires ou en exsolution), il s'agit aussi de mangano-columbites d'après la figure 3b. Mais, du faciès III au faciès II, les rapports Ta/Nb + Ta et Mn/Fe + Mn des inclusions décroissent.

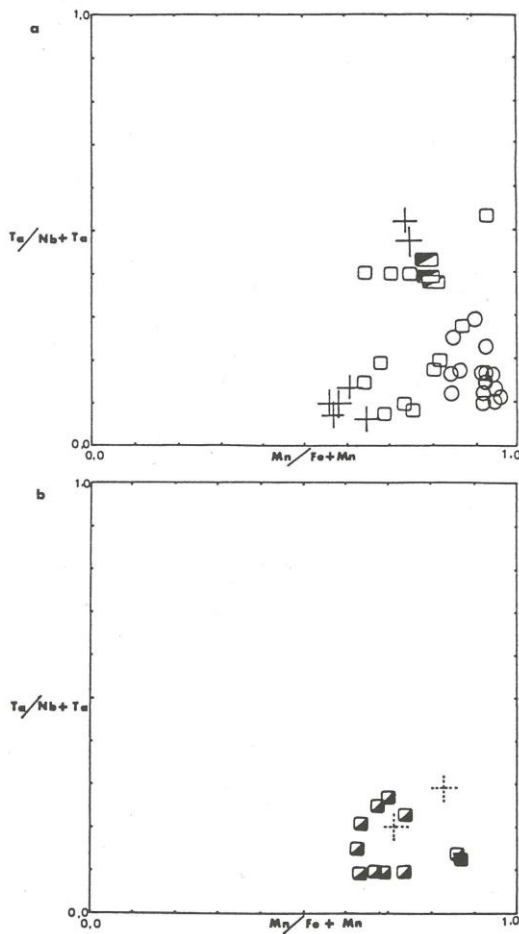


Fig. 3. a. — Composition des columbites indépendantes dans le quadrilatère columbite-tantalite. Symboles comme dans la fig. 1 sauf ixiolite (◐).  
 b. — Composition des inclusions de columbite dans le quadrilatère columbite-tantalite. B II (◐), B III (+).  
 a. — Composition of the independent columbitic in the columbite-tantalite square diagram. Symbols as in the fig. 1 unless ixiolite (◐).  
 b. — Composition of the columbitic inclusions in the columbite-tantalite square diagram.

Cette évolution, inverse de celle des columbites indépendantes mérite de retenir l'attention et d'être vérifiée par des analyses complémentaires. Elle confirmerait en effet la moindre préférence pour Ta de la structure de la cassitérite à haute température (fig. 2). Dans le faciès III, le tantale, qui est au moins accepté dans la structure de la cassitérite, se loge avec le niobium dans le réseau des inclusions de la cassitérite, provoquant un rapport Ta/Nb + Ta élevé des inclusions. Au contraire de Ta, Fe est plus facilement accueilli par la structure de la cassitérite et moins facilement dans les inclusions, à haute température, comme le montre la figure 2. A moindre température, Mn augmente par rapport à Fe dans la structure et diminue dans les inclusions.

**b) Evolution des teneurs en Sn, Ti, W et Sc**

Les éléments mineurs, notamment Sn, Ti, W et Sc sont fréquemment présents dans des columbites indépendantes comme dans celles en inclusions.

Dans la figure 4a, on constate une évolution décroissante des teneurs totales en Sn et Ti depuis les columbites indépendantes du faciès III (Sn + Ti = 0,038 à 0,081 atomes par maille, avec une moyenne de 0,069), par l'intermédiaire de celles du faciès II (Sn + Ti = 0,023 à 0,089 ; moyenne : 0,059), jusqu'à celles du faciès I (Sn + Ti = 0,000 à 0,021 ; moyenne : 0,009).

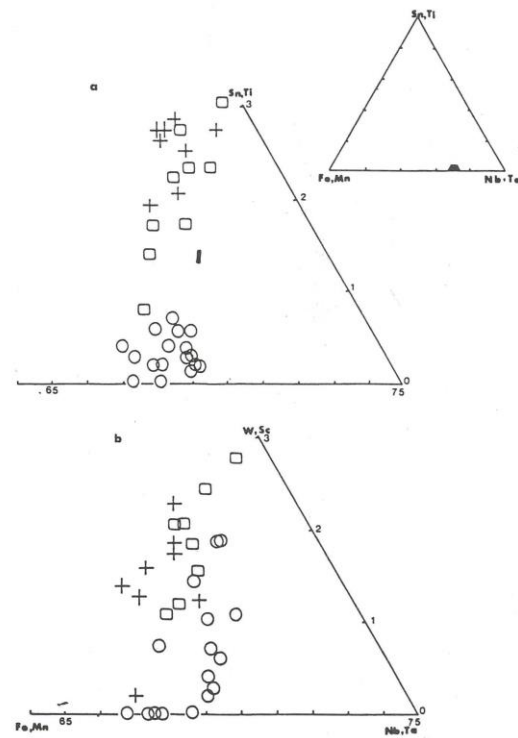


Fig. 4. — Composition des columbites indépendantes dans le diagramme : a-(Sn, Ti)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta) ; b-(W, Sc)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta).  
 Symbols as in the fig. 1.  
 Composition of the independent columbitic in the diagram : a-(Sn, Ti)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta) ; b-(W, Sc)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta).  
 Symbols as in the fig. 1.

Une même évolution décroissante des teneurs en Sn et Ti semble exister pour les deux types d'inclusions de columbités :  $\text{Sn} + \text{Ti} = 0,167$  (moyenne sur 2 analyses) pour les inclusions du faciès III, et  $\text{Sn} + \text{Ti} = 0,117$  (moyenne sur 11 analyses) pour celles du faciès II (fig. 5).

Les proportions en Nb, Ta, Fe, Mn, Sn (et Ti) dans les cassitérites et les columbités sont en conformité avec les substitutions forme :



relation qui rend compte de l'incorporation de  $\text{Sn}, \text{Ti}^{4+}$  dans les columbités, et de  $(\text{Nb}, \text{Ta})^{5+} + (\text{Fe}, \text{Mn})^{2+}$  dans les cassitérites.

Les échanges chimiques entre ces deux groupes d'éléments s'affaiblissent avec la décroissance de la température, dans la cassitérite comme dans la columbite.

La figure 4b montre que les teneurs en W + Sc sont plus élevées dans les columbités de BI que dans celles des autres faciès.

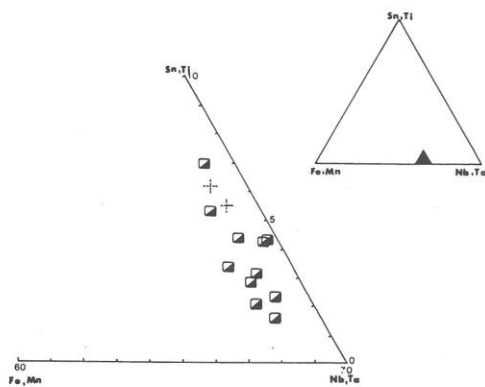
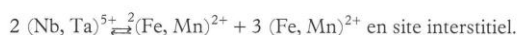


Fig. 5. — Composition des inclusions de columbite dans le diagramme (Sn, Ti)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta).  
Symboles comme dans la fig. 3.  
Composition of the columbite inclusions in the (Sn, Ti)--(Fe, Mn)--(Nb, Ta) diagram.  
Symbols as in the fig. 3.

### c) Echanges entre (Nb + Ta) et (Fe-Mn)

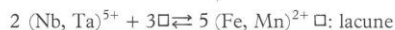
Des échanges s'établissent également entre (Nb-Ta) et (Fe-Mn) dans les columbités indépendantes ou en inclusions, comme l'indique la variation du rapport  $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn}$  (fig. 6). Il y a substitution de Nb-Ta par Fe-Mn dans les columbités de la partie inférieure du granite (BIII ;  $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn} < 2,00$ ) et substitution inverse dans la partie supérieure (BI et BII ;  $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn} > 2,0$ ).

Le remplacement de Nb-Ta par Fe-Mn demande l'introduction de  $(\text{Fe}, \text{Mn})^{2+}$  en site interstitiel pour équilibrer les charges :



L'excès des groupes cationiques des columbités de la partie inférieure, calculé à partir des analyses, est conforme à ce modèle de substitution.

A l'inverse, le remplacement de (Fe, Mn) par (Nb, Ta) nécessite la présence de lacunes pour l'équilibre atomique.



Le déficit des cations des columbités de la partie supérieure, calculé à partir des analyses correspond à ce modèle de substitution.

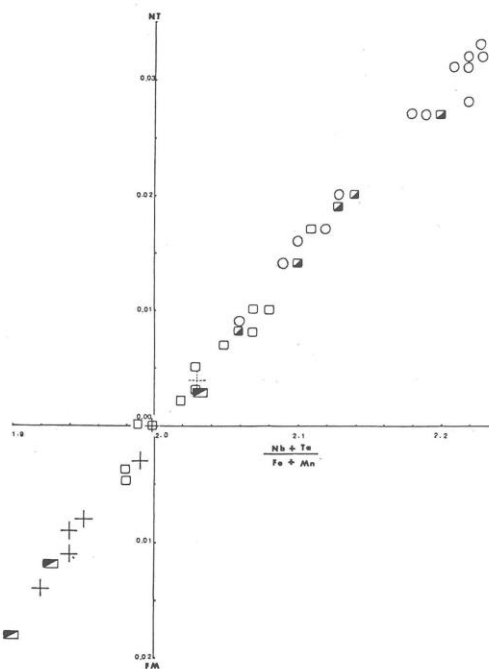


Fig. 6. — Excès de Nb et Ta (NT) et de Fe et Mn (FM) dans les formules structurales de niobotantalates en fonction des rapports  $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn}$ . Représentation dans les trois faciès.

Symboles comme dans la fig. 3.  
NT : excès par rapport à 2 de Nb et Ta, occupant le site (Fe, Mn) ;  
FM : excès par rapport à 1 de Fe et Mn, occupant le site (Nb, Ta).  
(Nb, Ta) excess (NT) and (Fe, Mn) excess (FM) in the structural formulae of the columbotantalates dependent of the  $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn}$  ratios. Representation in the three faciès.  
Symbols as in the fig. 3.  
NT : (Nb, Ta) excess, in comparison with 2, occupying the (Fe, Mn) site ;  
FM : (Fe, Mn) excess, in comparison with 1, occupying the (Nb, Ta) site.

Les échanges se traduisent par conséquent par une évolution croissante des rapports  $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn}$  des columbités indépendantes, du BIII (moyenne : 1,98) au BII (moyenne : 2,05), puis au BI (moyenne : 2,15), et des columbités en inclusions, du BIII (moyenne : 2,02) au BII (moyenne : 2,08). Cette évolution peut résulter soit de l'abaissement de la température, soit de la variation des teneurs du magma en ces éléments, soit des deux facteurs réunis.

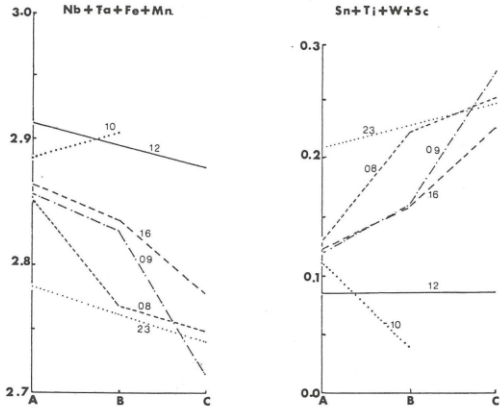


Fig. 7. — Différences chimiques entre inclusions primaires (B) et exsolutions (C) dans les cassitérites, et comparaison avec les columbités indépendantes associées (A) dans le domaine de (Nb+Ta+Fe+Mn) et (Sn+Ti+W+Sc).  
Chiffre : Numéro de l'échantillon analysé.  
Chemical differences between primary inclusions (B) and exsolutions (C) in the cassiterite, and comparison with the independent columbités associated (A) in the terms of (Nb+Ta+Fe+Mn) and (Sn+Ti+W+Sc).  
Numeral : Number of the analysed sample.

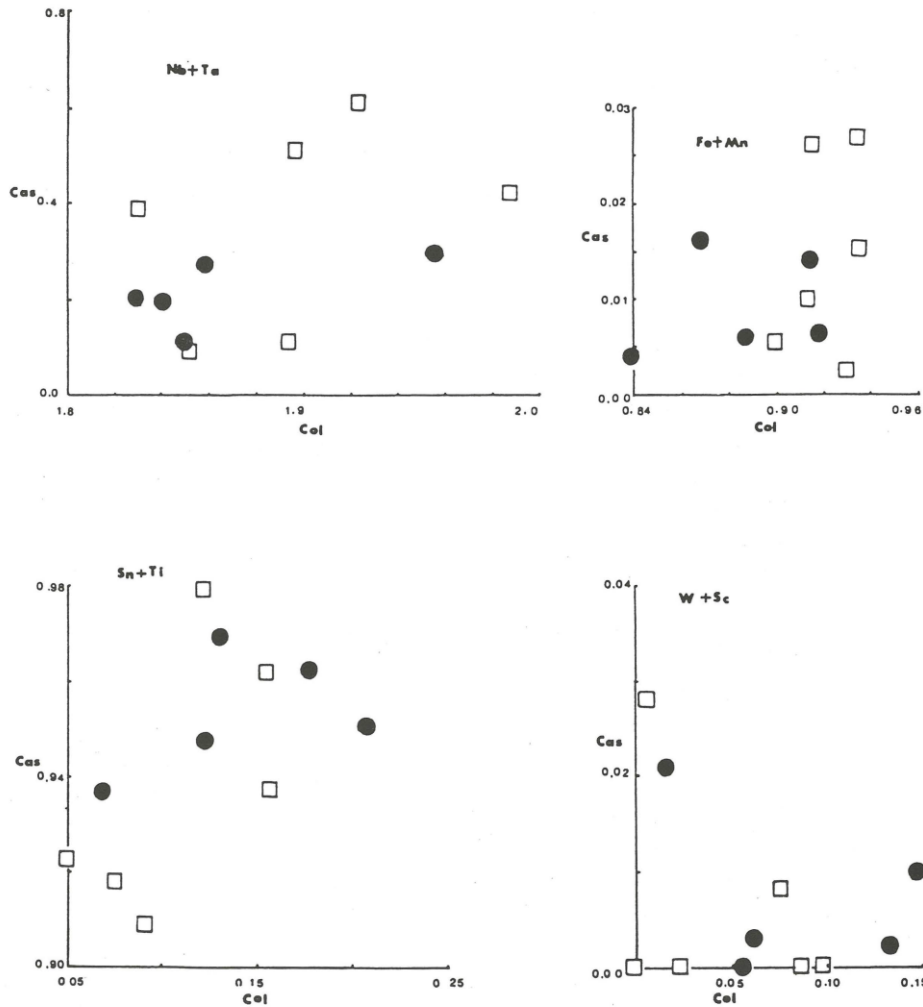


Fig. 8. — Comparaison des compositions des cassitérites (Cas) et leurs inclusions de columbite (Col) primaires (□) et en exsolution (●).  
Composition comparison of the cassiterites (Cas) and their columbite inclusions (Col) primary (□) and as exsolution (●).

### 3. – Différences chimiques entre inclusions primaires et exsolutions

Chimiquement, les inclusions des deux types décrites plus haut sont nettement différentes.

Si l'on compare les compositions des columbités indépendantes, en inclusions primaires et en exsolution (fig. 7), on constate, dans cet ordre, une évolution décroissante des teneurs en (Nb + Ta + Fe + Mn) et une évolution croissante des teneurs en (Sn + Ti + W + Sc). Si on considère que les exsolutions sont en équilibre chimique avec les cassitérites-hôtes, on peut supposer que les inclusions primaires formées d'abord indépendamment de la cassitérite, ont ensuite été englobées par elle (comme en témoignent les columbités partiellement incluses) et ont évolué chimiquement par diffusion, vers une composition plus proche de l'équilibre avec la cassitérite hôte.

Les diagrammes de la figure 8 montrent une légère tendance de relation des teneurs en Nb + Ta, Fe + Mn et Sn + Ti entre la cassitérite et ses inclusions, cette tendance étant plus nette pour les exsolutions que pour les inclusions primaires.

Ceci refléterait un équilibre chimique de la cassitérite meilleur avec ses exsolutions qu'avec ses inclusions primaires.

## B. Microlite

La microlite est dispersée principalement dans le faciès I, dont elle reflète la forte teneur en Ta, et rarement dans le faciès II.

13 analyses chimiques à la microsonde sur 5 cristaux de microlite (4 pour BI, 1 pour BII), données dans le tableau I, montrent un rapport  $Ta_2O_5/Nb_2O_5$  oscillant entre 2,7 et 10,5 ce qui le situe pratiquement dans un intervalle de valeurs de 2 à 10 indiqué par Kosakevitch (1985).

Le tungstène et le scandium sont en teneurs très variables atteignant respectivement 3,5 % de  $WO_3$  et 2,3 % de  $Sc_2O_3$ .

Un cristal subautomorphe de 500  $\mu m$  de diamètre (BI) présente une zonation concentrique visible au microscope par réflexion : une zone externe et une zone centrale, d'aspect identique, sont séparées par une bande à pouvoir réflecteur plus faible et réflexions internes plus claires (fig. 9a). La microsonde révèle une zonation chimique (fig. 9b), marquée principalement par une diminution des teneurs en Ta, Ca, Na et F et une augmentation de la teneur en Nb dans les zones externe et centrale par rapport à la bande intermédiaire, dont la composition est proche du pôle tantalifère.

Comme l'indique Kosakevitch (1985), certains cristaux de microlite voient leurs teneurs en Na et Ca chuter sur leurs bordures ; F diminue également ; par contre Nb et Ta restent stables.

Microlite et columbite sont le plus souvent indépendantes l'une de l'autre. Un seul exemple a été observé de contact direct entre ces deux minéraux (BII) ; la columbite est alors anormalement riche en Ta (42 % de  $Ta_2O_5$ ).

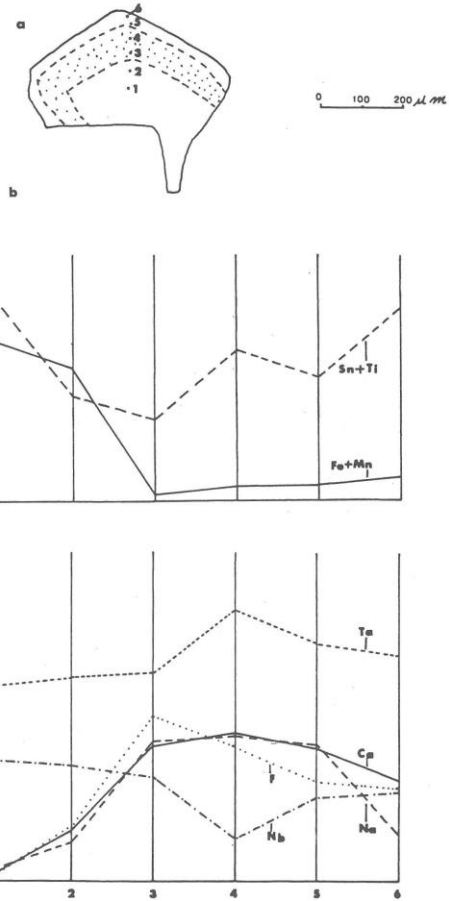


Fig. 9. — a - Cristal zoné de microlite;  
b - Variation des compositions dans les différentes zones.  
a - Zoned microlite crystal;  
b - Compositional variations in the different zones.

## Conclusion

L'étude des cassitérites et des columbités du granite de Beauvoir montre que l'abondance et la composition de ces minéraux varient avec la profondeur, d'où l'intérêt de la réalisation du sondage GPF qui donne accès à des faciès non représentés en surface et fournit une échelle précise des profondeurs. Deux facteurs principaux semblent commander cette évolution : les teneurs globales du granite en Sn, Nb, Ta, Fe et Mn et les températures de cristallisation et de diffusion.

Ainsi cassitérite et columbite sont de plus en plus abondantes (nombre et dimension de cristaux) de la base au sommet. De même les teneurs en Nb et Ta augmentent dans les columbités entre les faciès III et I, dans les cassitérites entre les faciès III et II, conformément à la composition du granite.



En admettant une diminution de température de cristallisation du faciès III au faciès I, la température semble régir l'intégration de Nb et Ta au réseau de la cassitérite, ce qui expliquerait la pauvreté en ces éléments de la cassitérite du faciès I. De même la température commande probablement les rapports Ta/Nb et Mn/Fe ainsi que les échanges entre (Sn, Ti) et (Nb, Ta) (Fe, Mn) et entre (Nb, Ta) et (Fe, Mn) dans les minéraux. Enfin les exsolutions de columbite dans les cassitérites au sommet du faciès II se formeraient à température décroissante à partir de cassitérites riches en Nb et Ta.

Des analyses complémentaires sont nécessaires pour confirmer ces interprétations. Pour caler les températures correspondant aux divers stades d'évolution des minéraux, une étude des inclusions fluides est engagée, prenant appui sur le travail de base de Aïssa et al., 1987.

---

### Références bibliographiques

---

- AISSA M., WEISBROD A. et MARIGNAC C. (1987). — Caractéristiques chimiques et thermodynamiques des circulations hydrothermales du site d'Echassières (Massif central français), ce volume.
- AUBERT G. (1969). — Les coupoles granitiques de Montebras et d'Echassières (Massif central français) et la genèse de leurs minéralisations en Sn, W, Li et Be. *Mém. B.R.G.M.* n° 46, 345 p.
- CUNNEY M., AUTRAN A. et BURNOL L. (1985). — Premiers résultats apportés par le sondage GPF de 900 m réalisé sur le granite sodolithique et fluoré à minéralisation disséminée de Beauvoir (complexe granitique d'Echassières, Massif central, France). *Chron. Rech. Min.*, 481, pp. 59-63.
- KOSAKEVITCH A. (1976). — Evolution de la minéralisation en Li, Ta et Nb dans la coupole granitique de Beauvoir (Massif d'Echassières, Allier). Rapport B.R.G.M. 76, SGN 316 MGA.
- KOSAKEVITCH A. (1985). — Mise au point sur l'état des connaissances de la minéralisation en Li, Sn, Ta, Nb et U du granite de Beauvoir. Rapport BRGM n° 100, pp. 94-102.
- LU H.-Z., SHI J.-X. and YU C.-M. (1975). — Temperatures of petrogenesis and metallogenesis for a certain tantalum-niobium-bearing granite. *Geochimica*, 3, pp. 210-221 (in chinese with english abstract).