

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 (Échassières granitic massif).

The Beauvoir granite is one of three units of the Échassières 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 cassitérites et niobantalates et de suivre leur évolution minéralogique, chimique et cristallochimique 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 bipyramidiés 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 μm 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 columbites (voir plus loin).

2. — Éléments en trace et inclusions

43 analyses à la microsonde (CAMEBAX SX50, Toulose 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 columbantite.

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 columbantites.

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 columbantite 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 columbantalates indépendants.

<u>Cassitérites</u>												
No: : Na20 : Nb205: Ta205: Sn02 : Ti02 : Fe0 : Mn0 : W03 : Ca0 : Sc203 : 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												
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												
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 : 101,587												
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												
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												
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												
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												
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>												
Na20 : Nb205: Ta205: Sn02 : Ti02 : Fe0 : Mn0 : W03 : Ca0 : Sc203 : 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 : 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.

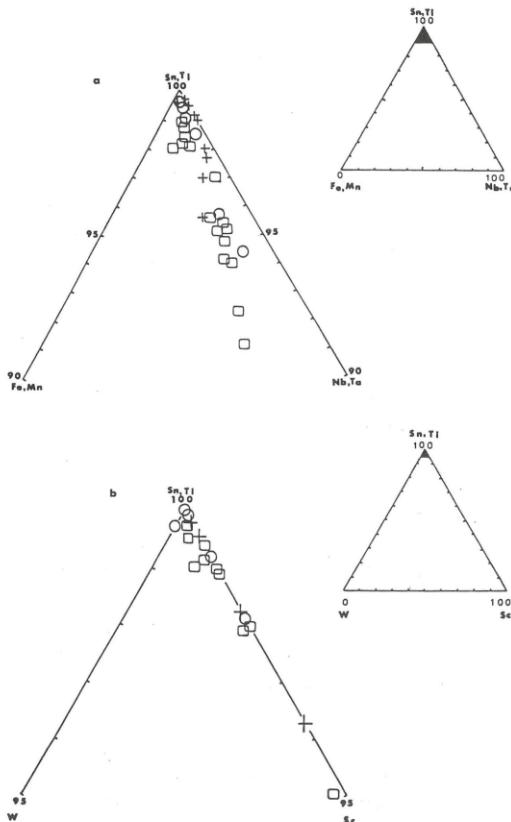


Fig. 1. - Composition des cassiterites du granite de Beauvoir dans le diagramme :

a-(Sn, Ti)-(Fe, Mn)-(Nb, Ta); b-(Sn, Ti)-W-Sc. B I (O), B II (○), B III (+).
Plusieurs cassiterites correspondent au pole 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.

Niobtantalates

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 cassiterites d'autre part.

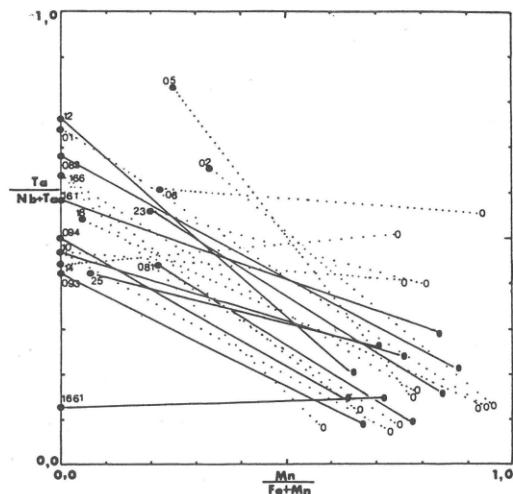


Fig. 2. - Composition des cassiterites (●), de leurs inclusions de columbite (○), et des columbites indépendantes associées (○), dans le quadrilatère columbite-tantalite.

Chiffre : Numéro de l'échantillon analysé.
Composition of the cassiterites (●), of their columbite inclusions (○), and the independent columbites associated (○), in the columbite-tantalite diagram.
Numerical: 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 cassiterite ont été rencontrées seulement dans le faciès III et II, et surtout dans ce dernier. Leur longueur est comprise entre 10 et 100 µm.

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 µm de long, 10 à 30 µm de large), alors que les inclusions en exsolutions se présentent sous forme de taches et veinules (10-20 µm de long, 2 à 12 µm de large). Les premières sont réparties irrégulièrement dans les cristaux voire « à cheval » sur le contact entre la cassiterite et le minéral adjacent, les secondes ont une disposition orientée dans les minéraux-hôtes.

Une ixiolite xénomorphe (analyses n° 2346, 2351, 2352) a été observée en syncristallisation avec une cassiterite 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 regroupées 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.

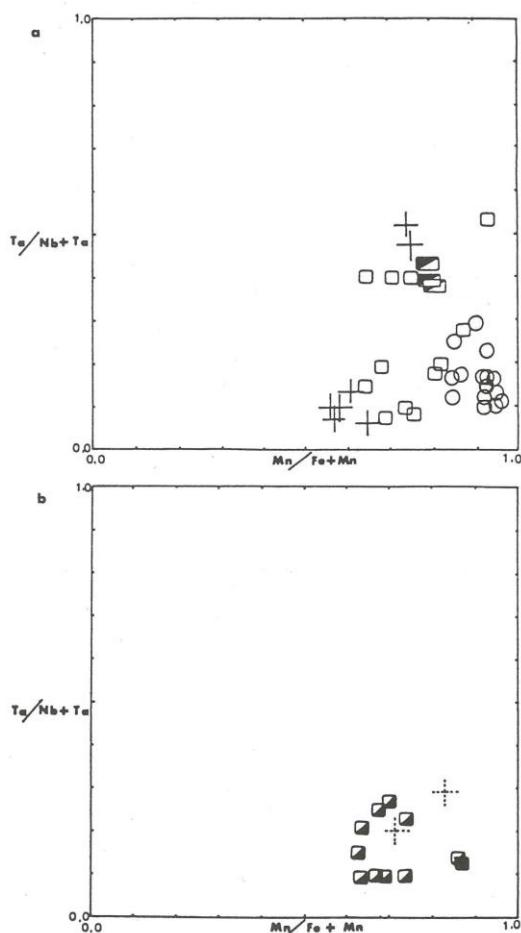


Fig. 3. a. — Composition des columbites indépendantes dans le quadrilatère columbite-tantalite. Symboles comme dans la fig. 1 sauf ixiolite (●). b. — composition des inclusions de columbite dans le quadrilatère columbite-tantalite. B II (▲), B III (×).
a - Composition of the independent columbites in the columbite-tantalite square diagram. Symbols as in the fig. 1 unless ixiolite (●).
b - Composition of the columbite 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 tantalite, 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 : $0,009$).

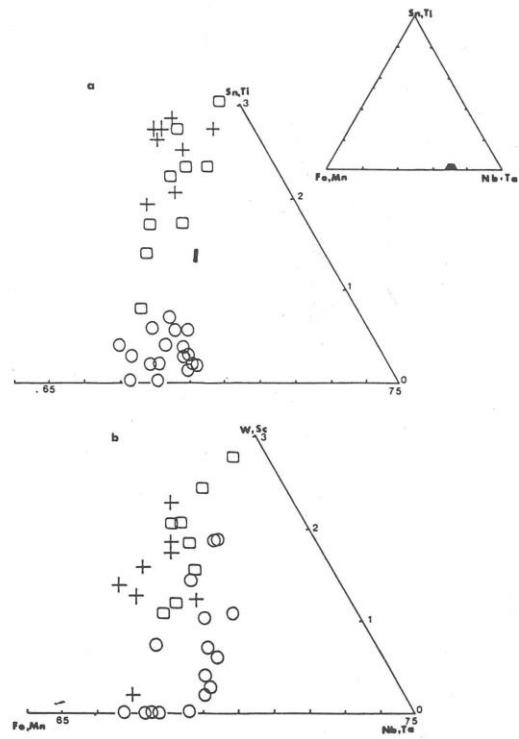


Fig. 4. — Composition des columbites indépendantes dans le diagramme : a-(Sn, Ti)-(Fe, Mn)-(Nb, Ta); b-(W, Sc)-(Fe, Mn)-(Nb, Ta). Symboles comme dans la fig. 1.
Composition of the independent columbites in the diagram : a-(Sn, Ti)-(Fe, Mn)-(Nb, Ta); b-(W, Sc)-(Fe, Mn)-(Nb, Ta). Symbols as in the fig.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

Une même évolution décroissante des teneurs en Sn et Ti semble exister pour les deux types d'inclusions de columbites : $\text{Sn} + \text{Ti} = 0,167$ (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 columbites sont en conformité avec les substitutions forme :



relation qui rend compte de l'incorporation de $\text{Sn}, \text{Ti}^{4+}$ dans les columbites, 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 columbites de BI que dans celles des autres faciès.

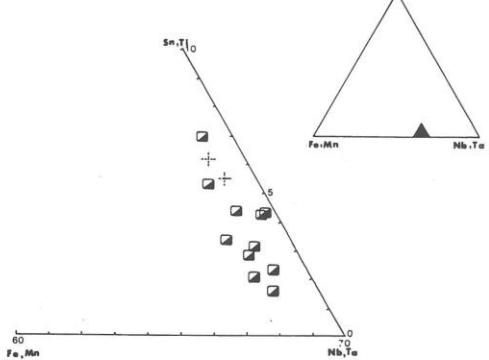
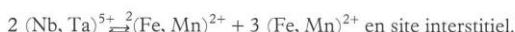


Fig. 5. — Composition des inclusions de columbite dans le diagramme (Sn, Ti)-(Fe, Mn)-(Nb, Ta).
Symboles comme dans la fig. 3.
Composition of the columbite inclusions in the (Sn, Ti)-(Fe, Mn)-(Nb, Ta) diagram.
Symbols as in the fig. 3.

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

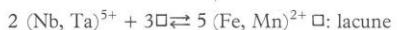
Des échanges s'établissent également entre (Nb-Ta) et (Fe-Mn) dans les columbites indépendantes ou en inclusions, comme l'indique la variation du rapport $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn}$ (fig. 6). Il y a substitution de Nb-Ta par Fe-Mn dans les columbites de la partie inférieure du granite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

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



L'excès des groupes cationiques des columbites 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 columbites de la partie supérieure, calculé à partir des analyses correspond à ce modèle de substitution.

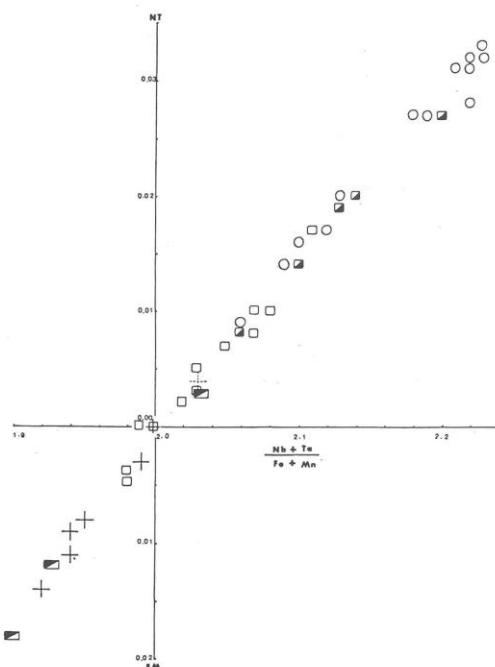


Fig. 6. — Excès de Nb et Ta (NT) et de Fe et Mn (FM) dans les formules structurales de niobotantalates en fonction des rapports $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn}$.
Représentation dans les trois faciès.
Symboles comme dans la fig. 3.

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 columbantantalates dependent of the $\text{Nb} + \text{Ta}/\text{Fe} + \text{Mn}$ ratios. Representation in the three facies.
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 columbites indépendantes, du B III (moyenne : 1,98) au B II (moyenne : 2,05), puis au B I (moyenne : 2,15), et des columbites en inclusions, du B III (moyenne : 2,02) au B II (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.

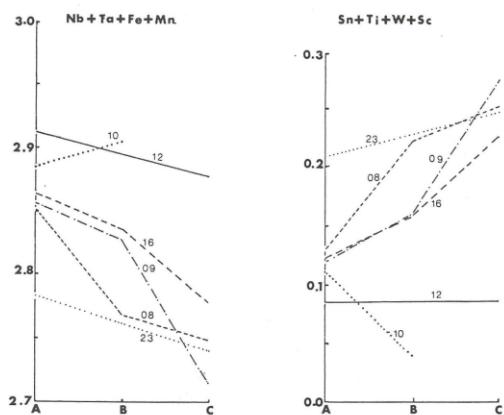


Fig. 7. — Différences chimiques entre inclusions primaires (B) et exsolutions (C) dans les cassiterites, et comparaison avec les columbites indépendantes associées (A) dans le domaine de $(\text{Nb} + \text{Ta} + \text{Fe} + \text{Mn})$ et $(\text{Sn} + \text{Ti} + \text{W} + \text{Sc})$.
Chiffre : Numéro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

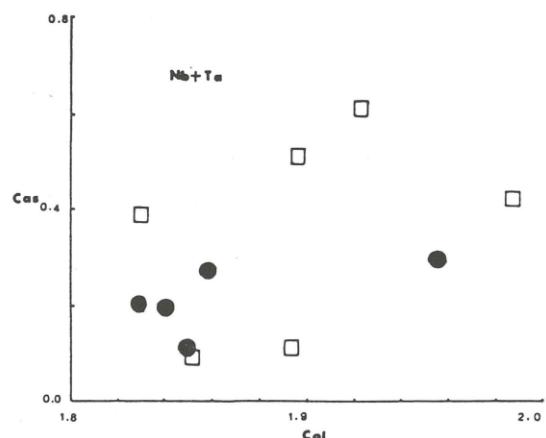
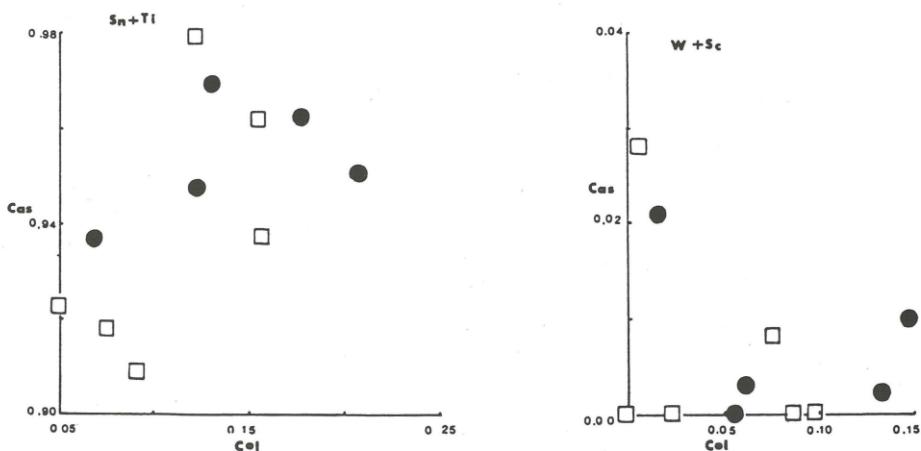


Fig. 8. — Comparaison des compositions des cassiterites (Cas) et leurs inclusions de columbite (Col) primaires (□) et en exsolution (●).
Composition comparison of the cassiterites (Cas) and their columbite inclusions (Col) primary (□) and as exsolution (●).



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 columbites 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 columbites 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 B I, 1 pour B II), 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 (B I) 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 (B II) ; la columbite est alors anormalement riche en Ta (42 % de Ta_2O_5).

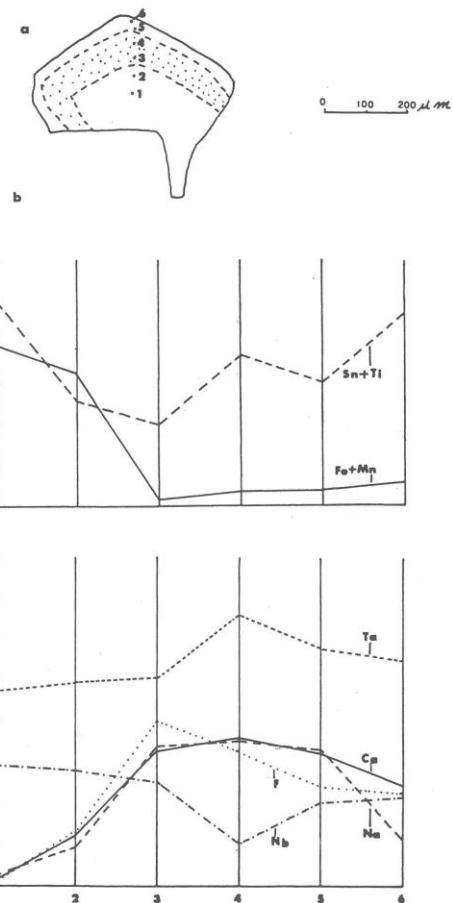


Fig. 9. — a - Cristal zoné de microlite ;
b - Variation des compositions dans les différentes zones.
a - Zoned microlite crystal;
b - Compositional variations in the different zones.

Conclusion

L'étude des cassitérites et des columbites 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 columbites 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 Aissa 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.
- CUNAY 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).