

L'ÉVOLUTION TARDI-MAGMATIQUE DES GRANITES À MÉTAUX RARES : L'EXEMPLE DE LA COUPOLE DE TIN-AMZI (HOGGAR - ALGÉRIE)

Mokrane KESRAOUI*, Christian MARIGNAC et Jean VERKAEREN*****

Résumé

Le granite de Tin-Amzi forme une coupole sub-affleurante mise en place, entre 525 Ma et 538 Ma, dans les gneiss granulitiques éburnéens de la région de Tamanrasset dans le Hoggar Central. Elle est constituée d'un granite à topaze et muscovite en profondeur et d'un granite à topaze et protolithionite au sommet de l'intrusion. Un microgranite porphyrique à topaze et muscovite affleure sous forme de dykes au-dessus de la coupole. Le granite à topaze et muscovite est à quartz, feldspath potassique, albite ($An_{1,2}$), topaze riche en fluor et le mica est une muscovite lithinifère. Les minéraux accessoires sont constitués par des minéraux à Nb-Ta, du rutile et du zircon. Le granite à topaze et protolithionite connaît une évolution minéralogique du bas vers le sommet de la coupole. Les proportions de quartz et de topaze augmentent, l'albite diminue tandis que le feldspath potassique disparaît. On y distingue deux générations de protolithionite. La protolithionite II, au toit du granite, s'altère en muscovite avec de la sidérite manganésifère dans ses clivages. Les minéraux accessoires reconnus dans les parties les plus profondes du granite sont les minéraux à Nb-Ta, le zircon, l'uraninite et le xénotime très rare. Le microgranite se distingue du granite à topaze et muscovite par sa texture microgrenue porphyrique et la présence de miaroles minéralisées en cassitérite, wolframoixiolite, wolframite et rare scheelite. Ces différents granites sont très siliceux et ont des teneurs en Na_2O+K_2O élevées avec $Na_2O > K_2O$. Ils sont très pauvres en TiO_2 , MnO , MgO , CaO et P_2O_5 . Ce sont des leucogranites peralumineux à «ferrous lithium micas». Leur projection dans le système Q-Ab-Or confirme leur appartenance à la classe des leucogranites riches en fluor et lithium mais indique une perte de ces deux éléments au profit d'une phase fluide dans les granites et microgranite à topaze et muscovite. En général, les teneurs en Ba, Sr, Be, Y, Zr, U et Th sont basses alors que celles du Rb, Ga, W, Sn, Ta et Nb sont élevées. Le microgranite se distingue par des teneurs en Ba, Sr et Eu anormalement supérieures à celles des autres granites. La somme des terres rares est très faible dans tous les faciès. L'allure des profils, surtout pour les granites, indiquerait une interaction fluides - magma. Ces fluides ont pu aussi extraire les T.R. à partir de niveaux inférieurs pour les reconcentrer au sommet de la coupole. Les minéraux porteurs de Nb et Ta du granite à topaze et muscovite sont des columbités ou bien des cristaux à assemblage

* Université des Sciences et de la Technologie -Institut des Sciences de la Terre.
Laboratoire de Géologie Minière, BP32, El-Alia 16111 Bab Ezzouar -Algérie.

**CRPG-CNRS, BP20, 54 501 Vandoeuvre Cedex, France et Ecole des Mines,
54 042 Nancy Cedex. France. e-mail : marignac@mines.u-nancy.fr

***Laboratoire de Géologie et de Minéralogie, 3, pl. Louis Pasteur,
Louvain La Neuve 1348 Belgique.

- Manuscrit déposé le 20 Décembre 1999, accepté après révision le 28 Mars 2000

complexe avec columbite au coeur puis wolframoixiolite et enfin wolframite en périphérie. Dans le granite à topaze et protolithionite on retrouve des columbites en profondeur, des wolframoixiolites en inclusions dans la protolithionite II à des niveaux intermédiaires et des wolframites au sommet. Les cassitérites des miaroles du microgranite sont tantalifères. L'évolution tardi-magmatique de ces granites nous montre deux exemples de transfert d'éléments à travers les fluides. Le premier mobilisant fortement l'étain dans le système miarolitique où le transfert se fait par vapeur ? Le deuxième, dans les granites, avec un fluide où le tungstène prédomine.

Mots clés : Granites à métaux rares - Evolution tardi-magmatique - Micas Li - Wolframoixiolite - Cassitérite - Coupole de Tin-Amzi (Hoggar - Algérie).

LATE MAGMATIC EVOLUTION OF RARE METALS GRANITES : THE EXEMPLE OF THE TIN-AMZI CUPOLA (HOGGAR- ALGERIA)

ABSTRACT

The Tin-Amzi granite form a sub-surface cupola emplaced, between 525Ma and 538Ma, in the Eburnean granulitic gneisses of the Tamanrasset area in the Central Hoggar. It is constituted of a topaz – muscovite granite in depth and a topaz – protolithionite granite at the top. Dykes of porphyritic topaz – muscovite microgranite crop out over the cupola. The topaz – muscovite granite is composed of quartz, K-feldspar, albite (An_{1-2}), fluorine rich topaz, and the mica is a Li-muscovite. Accessory minerals are Nb-Ta oxydes, rutile and zircon. A mineralogical evolution is observed in the protolithionite granite from the bottom to the top of the cupola. Quartz and topaz proportions increase, albite decreases whereas K-feldspar disappears. Two generations of protolithionite are distinguished. The protolithionite II, at the top of the granite, is altered to muscovite with manganeseiferous siderite in the mineral cleavage. The accessory minerals present at the bottom of the granite are Nb-Ta oxides, zircon, uraninite and scarce xenotime. The microgranite is distinct from the topaz-muscovite granite by its porphyritic microgranular texture and the presence of cassiterite in miarolitic cavities. These various granites are high-silica and have high Na_2O+K_2O content with $Na_2O > K_2O$. They are very poor in TiO_2 , MnO, MgO, CaO and P_2O_5 . They are «ferrous lithium mica» bearing peraluminous granites. Plotting on the Q-Ab-Or system proves that they belong to the Li-F leucogranites group but indicates a loss of these two elements for the benefit of a fluid phase in the topaz-muscovite granite and microgranite. As a general rule, Ba, Sr, Be, Y, Zr and U contents are low whereas Rb, Ga, W, Sn, Ta and Nb are high. The microgranite is distinguishable by anomalous Ba, Sr and Eu content, higher than those of other granites. The total Rare Earth Elements is very weak in all the facies. Their pattern, especially from granites, would indicate a fluid melt interaction. These fluids may have extracted the REE from lower levels and concentrate them to the top of the cupola. The Nb-Ta hosted minerals of the topaz and muscovite granite are columbite or complex assemblage with columbite in the core, wolframoixiolite and wolframite in the rim. Columbite is found in depth of topaz-protolithionite granite, wolframoixiolite included in protolithionite II at intermediate level, and wolframite at the top. Cassiterite from miarolitic cavities are tantaliferous. The late-magmatic evolution of these granites shows two examples of element transfert through fluids. The first strongly mobilizes tin in miarolitic system in which the transfert is made by vapour? The second, in the granite, with a fluid in which tungsten is prevalent.

Key words : Rare metals granites - Late magmatic evolution - Li micas - Wolframoixiolite - Cassiterite - Tin-Amzi cupola (Hoggar - Algeria).

INTRODUCTION

Les granites albitiques riches en Li et F sont dit spécialisés (Tishendorf, 1977) à cause de leur association avec les minéralisations à Sn-W. Ce sont aussi les granites à métaux rares (Raimbault, 1987) ou bien les granites à Tantale (Raimbault *et al.*, 1991). Ceux là représentent le cas extrême de spécialisation à l'exemple du granite à albite topaze et lépidolite de Beauvoir (Cuney *et al.*, 1992) et du Yichun en Chine (Yin *et al.*, 1991). Une origine magmatique leur est généralement attribuée depuis la découverte de leurs analogues subvolcaniques, les Ongonites de Mongolie (Kovalenko and Kovalenko, 1976) ou bien volcaniques, les "macusanites" (Pichavant *et al.*, 1987) et "topaz rhyolites" (Christiansen *et al.*, 1983). Ces granites sont souvent affectés par des phénomènes tardi à post-magmatiques qui oblitèrent leurs caractéristiques primaires.

Dans le Hoggar central, un lien spatial et génétique est établi, d'une manière générale, entre les minéralisations à Sn-W et des leucogranites à topaze (Bouabsa, 1987). A Tin Amzi ces derniers sont subaffleurements. Leur étude pétrographique, géochimique et minéralogique permet de mettre en évidence leur évolution tardi magmatique et de suivre le comportement des métaux rares (Sn, W, Ta, Nb, Li...) dont ils sont porteurs.

CADRE GÉOLOGIQUE

Le gisement de Tin Amzi est localisé à 35 Km au Sud de la ville de Tamanrasset, dans le Hoggar central (fig.1). Il a été découvert par la Sonarem (Société Nationale de Recherche Minière), en 1971. Cette Société y entreprend des travaux de prospection et d'évaluation jusqu'en 1973.

Ce gisement occupe une surface de 2500x250m. il se compose d'une dizaine de zones minéralisées constituées de filons quartzeux à

wolframite et cassitérite (Kesraoui, 1990). Ces derniers se mettent en place dans un encaissant gneissique de l'éburnéen (Kilian, 1932 ; Lelubre, 1952). Ces vieux gneiss qui ont subi une déformation et un métamorphisme éburnéens sont réactivés au panafricain avec la mise en place de grands plutons syntectoniques d'âge 629- 578 Ma (U-Pb) (Bertrand *et al.*, 1986).

Les leucogranites qui sont à albite-topaze et micas lithinifères constituent de petites coupoles isolées ou bien de petits pointements dans de grands massifs granitiques post tectoniques (In-Tounine et Ahelehedg) (fig.1). Dans la région du gisement de Tin-amzi, ces leucogranites n'affleurent que sous forme de dykes de microgranites porphyriques. Ils suivent sur une centaine de mètres deux directions N10° et N160°, avec un pendage vertical à subvertical et des épaisseurs variables de 0,9m à 10m.

Les âges des leucogranites, établis par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, varient d'un massif à un autre entre $525,5 \pm 2,2$ Ma et $538,7 \pm 2,4$ Ma alors qu'à Tin-Amzi les minéralisations sont estimées à $536 \pm 2,2$ Ma (Cheilletz *et al.*, 1992).

Une campagne de sondages inclinés de la Sonarem et les carottes récupérées, ont permis de reconstituer sur une coupe schématique (fig.2), le dispositif du gisement de Tin-Amzi. Une coupole de granite à topaze et protolithionite a été mise en évidence vers 100m de profondeur. Cette dernière est sensiblement allongée dans une direction subméridienne ce qui lui conférerait une forme elliptique. Les sondages recoupent, à 150m environ de la surface, le toit d'un granite à topaze et muscovite lithinifère intrusif dans le faciès précédent. Nous remarquons qu'aucune pegmatite de type stocksheider, pouvant séparer les granites à topaze de leur encaissant, n'est signalée dans les logs de sondage. Les données disponibles ne nous permettent pas d'établir une relation temporelle entre les dykes affleurants et les granites de la coupole.

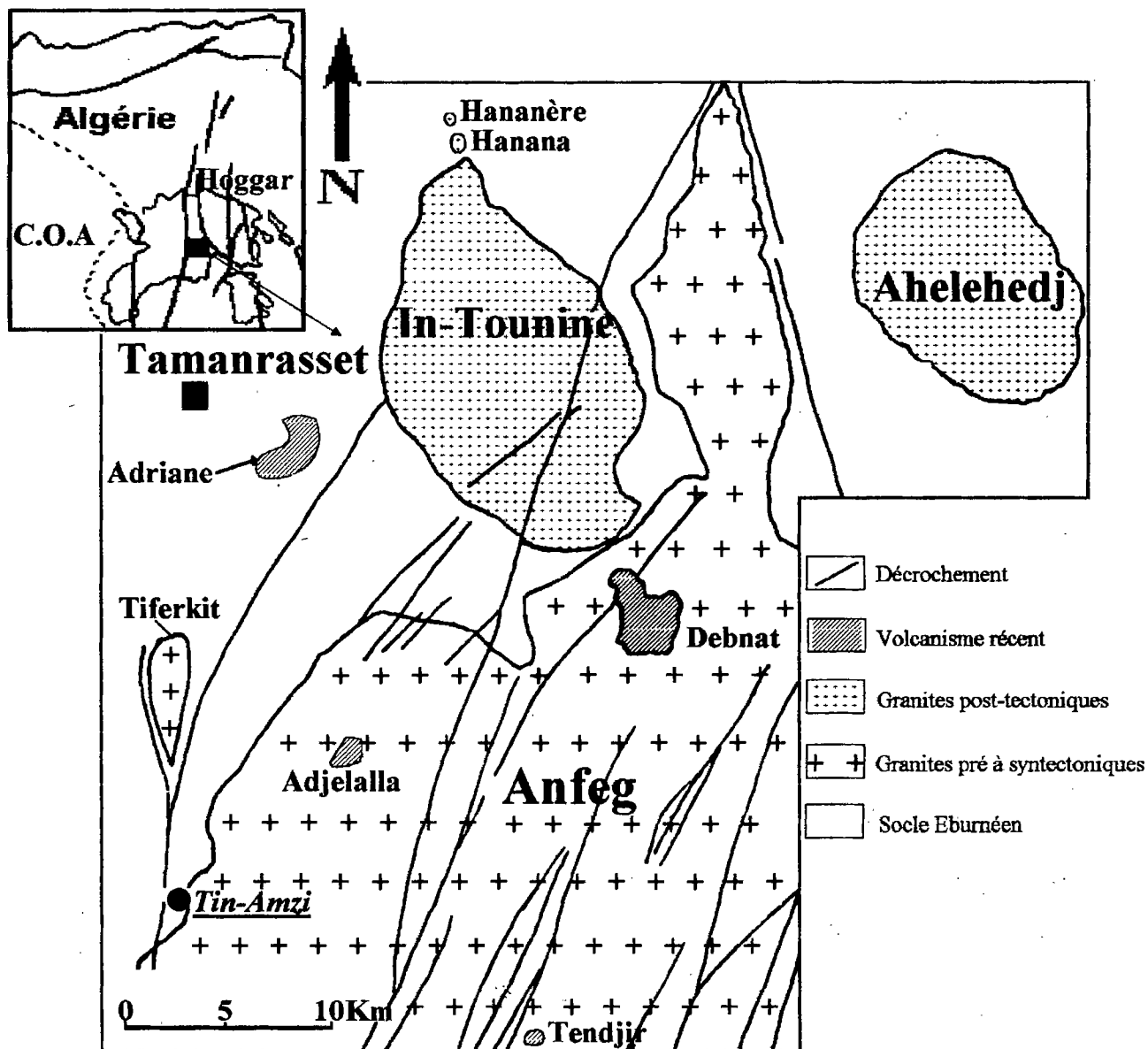


Fig. 1 - Carte de localisation du gisement de Tin-Amzi.
Emplacement map of the Tin-Amzi deposit.

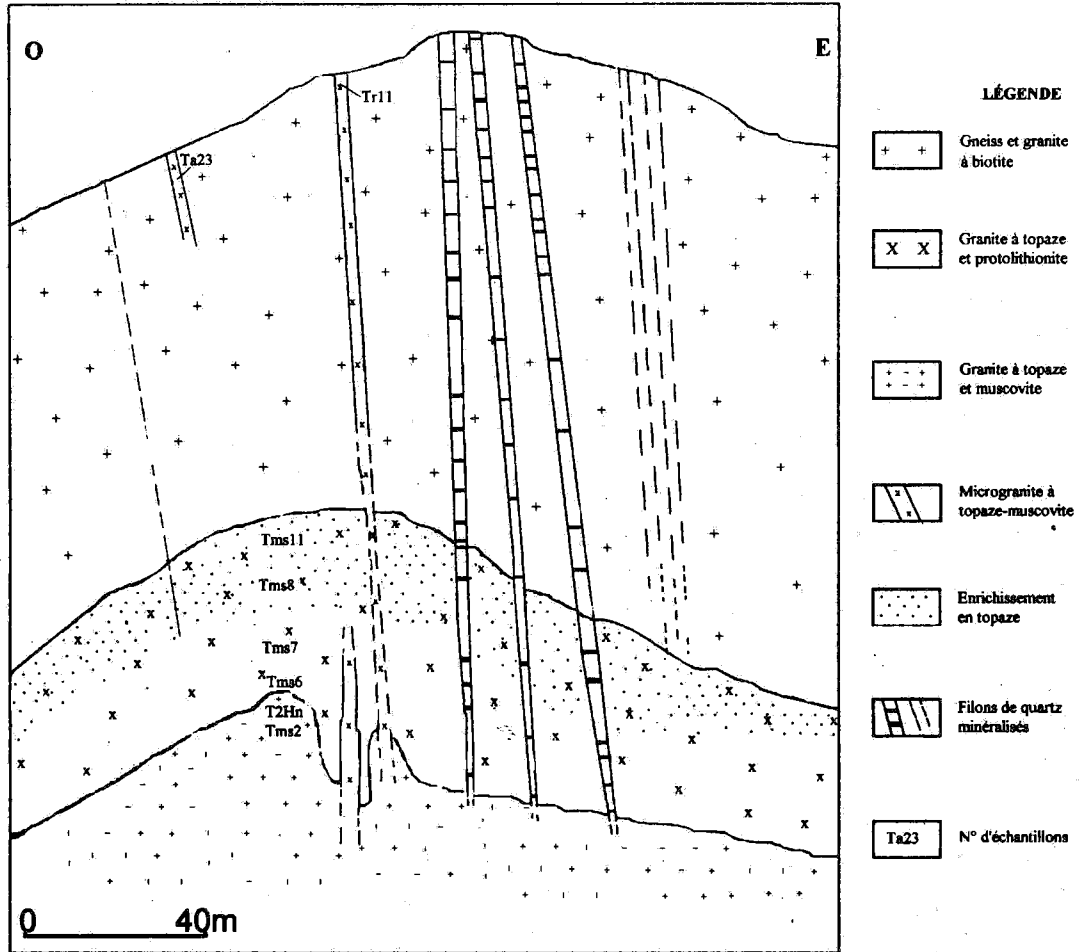


Fig. 2 - Coupe géologique E-O de la coupole granitique de Tin-amzi (d'après E.R.E.M. modifiée).

E-W geological cross-section of the Tin-Amzi granitic cupola (after E.R.E.M. modified).

Les filons de quartz minéralisés en cassitérite et wolframite prennent naissance dans le granite à topaze et muscovite lithinifère. Ce sont des remplissages de fractures orientées généralement N-S. Ils sont franchement sécants sur leur encaissant granitique et gneissique avec un pendage vertical à subvertical.

PÉTROGRAPHIE

a - Granite à topaze et protolithionite

Le granite à topaze et protolithionite est de couleur blanc-grisâtre avec de petites paillettes de micas noirs régulièrement disséminés dans la

roche (5% environ). Dans les 40 derniers mètres environ, au toit, il devient grisâtre avec de petites taches blanches de moins de 1 mm (Ech. TMS11). Cette variation de faciès est en liaison avec l'évolution minéralogique à partir du bas vers le sommet de la coupole.

La texture de ce granite est grenue à grain fin. Le quartz est en plages xénomorphes, rarement globuleux dans le granite en profondeur. Sa présence est constante dans tout le granite.

Le plagioclase est assez abondant dans les faciès clairs. C'est de l'albite ($An < 1\%$) sans variation de composition. Il se présente en lattes

automorphes ne dépassant pas les 500 μ et aussi en petites cristallites qui se trouvent en inclusion dans le quartz globuleux ainsi que dans la topaze et les micas. Au toit du granite, dans le faciès grisâtre, sa présence diminue considérablement. Il subsiste des lattes très corrodées par le mica, le quartz, et la topaze. On peut en observer quelques restes squelettiques dans la topaze.

Le feldspath potassique est peu abondant, en plages xénomorphes, très peu perthitiques mais à aspect trouble. Par endroit mais très rarement, il apparaît le quadrillage du microcline. Ses contours sont délimités par les lattes d'albite qu'il a tendance à mouler. Rarement il est observé en petits cristaux rectangulaires à hexagonaux en inclusion dans le quartz. Sa composition chimique se situe entre Or₉₇ et Or₉₈. Alors que dans les grandes plages on note un début d'altération en muscovite et quartz, il disparaît totalement dans les faciès grisâtres, au toit du granite.

Le mica est riche en fluor (tab. I). Cet élément a été dosé à la microsonde électronique et peut donc être sous-estimé à cause de son interférence avec le fer. Néanmoins il nous permet d'estimer les teneurs en Li₂O, grâce à la relation établie par Monier (1985). Dans le diagramme M²⁺-Li-Al (fig.3), ce mica est proche du pôle de la zinnwaldite, mais ses teneurs élevées en fer en font une protolithionite selon la classification de Foster (1960). De bas en haut du granite on en distingue deux générations :

- la protolithionite I (ech. TMS6) cristallise dans les faciès clairs, en profondeur. Elle est peu abondante et se présente en paillettes pseudo-hexagonales. Chimiquement elle se distingue par ses teneurs élevées en TiO₂ (0.35-0.63%) et en MgO (0.43-0.57%).

- la protolithionite II (ech. TMS8) forme de grandes plages dentelées ou interstitielles entre le feldspath potassique et l'albite. Elle est caractérisée par ses inclusions de petites lattes d'albite

Tableau I : Analyses sélectionnées de micas des granites et microgranites à topaze de Tin-Amzi

Selected analyses of Tin-Amzi granite and microgranite micas

1 - granite à topaze et muscovite (*topaze and muscovite granite*). 2 - microgranite à topaze et muscovite (*topaze and muscovite microgranite*). 3 - protolithionite I (*protolithionite I*). 4 - protolithionite II (*protolithionite II*) *valeurs estimées (*estimated values*) ** valeurs calculées (*calculated values*).

N°	1	2	3	4
Ech.	T2H	TR11	TMS6	TMS11
N°analyse	140	157	1	99
SiO ₂	45.08	44.05	39.69	39.40
TiO ₂	0.33	0.04	0.35	0.09
Al ₂ O ₃	25.81	25.57	23.15	22.57
FeO	10.85	10.77	18.92	20.31
MnO	0.37	1.15	0.83	1.07
MgO	0.47	0.75	0.43	0.04
CaO	0	0	0	0
Na ₂ O	0.12	0.19	0.20	0.17
K ₂ O	10.90	10.60	10.13	9.99
Li ₂ O*	1.92	2.11	2.33	2.35
F	3.92	4.30	4.72	4.76
H ₂ O**	2.43	2.20	1.83	1.78
F=O	1.65	1.81	1.98	2.00
Total	100.55	99.93	100.60	100.53

Formules structurales sur la base de 24 oxygènes.				
Si	6.305	6.226	5.847	5.855
Ti	0.035	0.004	0.039	0.010
Al ₄	1.695	1.774	2.153	2.145
Al ₆	2.559	2.486	1.866	1.808
Fe	1.269	1.273	2.331	2.524
Mn	0.044	0.138	0.104	0.135
Mg	0.098	0.158	0.094	0.009
Ca	0	0	0	0
Na	0.033	0.052	0.057	0.049
K	1.945	1.911	1.904	1.894
Li	1.102	1.224	1.409	1.433
F	1.734	1.922	2.199	2.237
OH	2.266	2.078	1.801	1.763

corrodées et de "wolframioxiolite" (fig.9, a) qui provoquent des halos pléochroïques très intenses. Ses teneurs en TiO₂ et MgO sont très faibles, alors qu'elle s'enrichit en manganèse et césium (MnO~1.22%, Cs₂O~0.20%). Vers le toit de la coupole, elle s'altère en muscovite (appauvrissement en fer et fluor et augmentation des teneurs en SiO₂ et Al₂O₃). Cette altération débute au coeur des cristaux et se propage vers

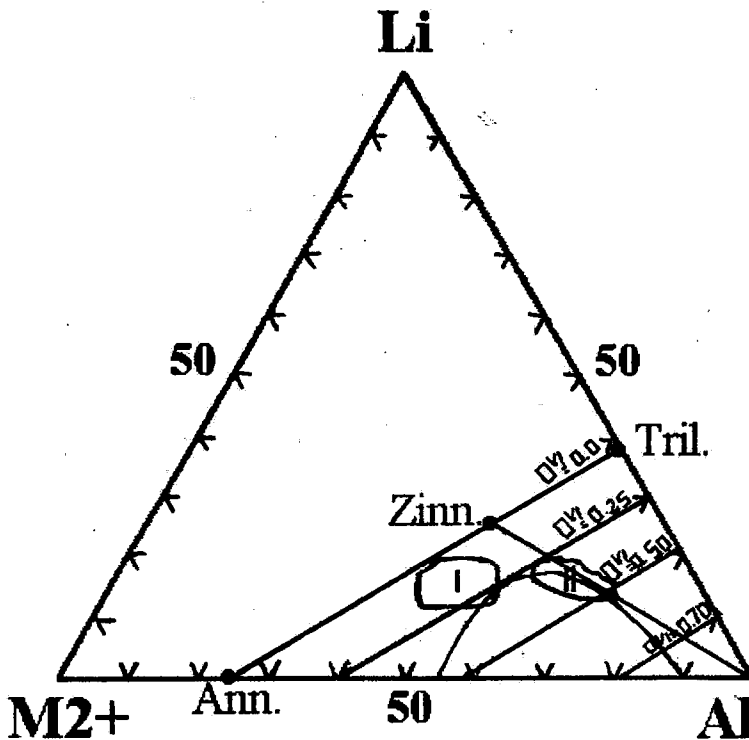


Fig. 3 - Projection des micas des granites et microgranites à topaze de Tin-Amzi dans le diagramme M2+- Li- Al (Monier, 1985).

Plot of the Tin-Amzi topaz granite and microgranite micas in the M2+- Li- Al diagram (Monier, 1985).

I - Granite et microgranite à muscovite (*Muscovite granite and microgranite*). II - Granites à protolithionite (*Protholithionite granite*).

la périphérie. Le fer est expulsé du réseau du minéral néoformé et va s'accumuler sous forme d'oxydes mais surtout de sidérite (fig.9, b). Cette dernière, légèrement manganésifère en profondeur (MnO ~1à3%) est très riche en cet élément vers le toit du granite (MnO~16%).

La topaze est présente dans tout le granite. Dans les faciès clairs en profondeur, elle cristallise en donnant des sections hexagonales ou bien prismatiques allongées de petite taille. Là, elle est moulée par le feldspath potassique ou bien en inclusion dans le quartz et contient de petites lattes d'albite et des minéraux aciculaires à Nb-Ta ainsi que des zircons. Sa proportion et sa taille augmentent considérablement vers le

sommet de la coupole. Elle devient xénomorphe et ne contient que de rares inclusions d'albite. Ses teneurs en fluor (19.51%) sont constamment élevées en comparaison avec celles des topazes des filons minéralisés (tab. II).

Les minéraux accessoires apparaissent dès le début de la cristallisation. Ils sont intimement liés les uns aux autres (fig.9, c) et leur détermination n'est possible qu'au microscope électronique à balayage muni du système EDS. Ce sont la colombo-tantalite, le zircon riche en hafnium et uranium (jusqu'à 74,71% UO₂), le xénotime très rare, l'uraninite thorifère (12,10% ThO₂) et la wolframite en tout petits cristaux. Cette dernière connaît un plus grand développement au toit du granite.

L' évolution post-magmatique du granite à topaze et protholithionite

L'évolution du granite à topaze et protholithionite au toit de la coupole tend à former une roche exclusivement à topaze, quartz avec des disséminations de wolframite. La texture franchement magmatique observée en profondeur avec protholithionite I et quartz globuleux disparaît avec la diminution sensible de l'albite, l'altération du mica et la disparition du feldspath potassique. Une roche similaire mais plus évoluée à topaze, quartz et wolframite est décrite à Torington, New South Wales, Australie. Une origine magmatique a été proposée (Eadington and Nashar, 1978), alors que de nouvelles données (Kleeman, 1985) montrent que cette roche nommée "silexite" est le résultat d'une altération post-magmatique d'un microgranite. Des données expérimentales (Kovalenko,

1978) montrent qu'un matériel granitique coexistant avec un fluide à teneur croissante en fluor peut perdre les micas et les feldspaths et produire un assemblage à quartz et topaze. Dans le cas de Tin-Amzi, les fluides, en plus du fluor, sont chargés en CO₂. Les données préliminaires de l'étude des inclusions fluides ainsi que la cristallisation de la sidérite l'attestent.

b-Granite à topaze et muscovite

Le granite à topaze et muscovite (ech. T2Hn) est de couleur rose. Sa texture est grenue avec des quartz globuleux subautomorphes de 3 à 5mm. Le plagioclase est une albite (An_{1,2}). Ses cristaux sont automorphes, le plus souvent allongés que trapus, ils gravitent autour du quartz formant la texture classique des leucogranites à topaze. On le retrouve aussi en inclusion sous forme de petites cristallites dans le quartz, la topaze, le feldspath potassique et la muscovite.

Le feldspath potassique est assez abondant dans la roche, en cristaux sub-automorphes. Il a un aspect trouble, et en quelques rares endroits, il présente un léger moirage du microcline et apparaît aussi sous forme de perthites. De petits cristaux rectangulaires peuvent être en inclusions dans le quartz.

La muscovite est répartie d'une manière très irrégulière. Elle se présente en grandes plages dentelées de 0,5 à 1mm qui remplacent le feldspath potassique et l'albite en la mouvant. Elle forme aussi dans le quartz globuleux de petites inclusions automorphes. Cette muscovite présente un léger pléochroïsme, elle est riche en fer et en fluor ce qui nous a permis de calculer les teneurs en lithium d'après la relation de Monier (1985) (tab. I). Elle appartient à la série des "ferrous aluminium lithium micas" (Monier, 1987), transitionnelle entre micas sans lithium et micas avec lithium. Elle est proche du joint muscovite-zinnwaldite. (fig.3).

Tableau II : Composition chimique des topazes

Chemical composition of topazes

- des granites à muscovite (1)(*muscovite granite*), des granites à protolithionite (2,3) (*protolithionite granite*), des greisens filoniens (4) (*and vein greisens*).

N°	1	2	3	4
Ech.	T2H	TMS6	TMS11	Z223
n° an.	134	26	89	2
SiO ₂	32.98	32.73	32.68	32.42
Al ₂ O ₃	56.02	55.78	55.97	56.02
F	20.37	19.51	20.58	15.68
O=F	-8.56	-8.19	-8.64	-6.59
Total	100.8	99.83	100.59	97.53
Formule structurale sur la base de 5 oxygènes.				
Si	0.999	0.997	0.994	0.989
Al	2.001	2.004	2.007	2.015
F	1.952	1.880	1.981	1.513
OH	0.048	0.120	0.019	0.487
F/F+OH	0.98	0.94	0.99	0.76

La topaze est automorphe, en sections allongées. Toujours fraîche et limpide, elle est à contours golfés et moulés par le quartz. Ses teneurs en fluor sont très élevées (20,37%, tab. II), bien que légèrement surestimées car dosées à la microsonde électronique. Elles atteignent le maximum théorique pour ce minéral qui est de 20,7% (Deer *et al.*, 1966) et attestent de sa cristallisation à un stade magmatique, dans un milieu pauvre en eau.

Les minéraux accessoires sont de petits minéraux opaques à Nb-Ta, le rutile, le zircon et rare uranothorite. Ces minéraux ne dépassent pas les 150µ et forment souvent des associations en équilibre entre eux, ils appartiennent à un même épisode de cristallisation. Ils sont en inclusions dans les micas où ils provoquent des halos pléochroïques ou bien dans la topaze et le quartz. Les cristaux de zircon sont prismatiques allongés à terminaison effilée. Ils sont incolores et transparents au microscope polarisant, riches en uranium (5.77% UO₂) et en thorium (1.04% ThO₂). Ils contiennent du hafnium (détecté au MEB), ce qui peut indiquer un caractère pegmatitique du granite (Wang *et al.*, 1992). La cassitérite n'a pas été observée dans ce faciès.

La course de cristallisation verrait l'apparition de l'albite en premier, suivie par le feldspath potassique. Le mica et la topaze cristalliseraient en même temps avec les minéraux accessoires et le quartz apparaîtrait en dernier.

Des passées feldspathiques (ech. TMS9) pauvres en quartz, sans mica et sans topaze, de 10 à 15 cm d'épaisseur sont signalées au toit de ce granite.

L'altération de ce granite consisterait en une légère muscovitisation du feldspath potassique et en un développement de fluorite dans les fissures.

c- Microgranite à topaze et muscovite

Le microgranite à topaze et muscovite, étudié à l'affleurement, montre des cristaux de quartz globuleux (de 2-3mm) sur un fond saccharoïde blanchâtre (ech. TA23). Le microgranite du dyke principal, au centre du gisement, est parsemé de taches brunâtres (de 3 à 5mm) représentant des mioles minéralisées en cassitérite.

Au microscope, la texture est microgrenue porphyrique. Les phénocristaux sont représentés par le quartz, la topaze, quelques albites, le feldspath potassique et plus rarement le mica. Le fond microgrenu est constitué des mêmes minéraux en petits cristaux xénomorphes.

Les phénocristaux de quartz montrent des sections hexagonales ou bien bipyramidées. Ils contiennent en inclusion des cristallites d'albite, elles mêmes moulées par de petits feldspaths potassiques de forme rectangulaire, et plus rarement des cristaux automorphes de micas présentant un léger pléochroïsme accentué par de petits minéraux à Nb-Ta, allongés le long des clivages, et des zircons.

Le feldspath potassique est plus rare. De forme géométrique, il contient en inclusion parallèlement à ses cotés des lattes d'albite.

L'albite est le plus petit des phénocristaux. Elle est toujours automorphe et a une composition de $An_{1.2}$.

Les phénocristaux de topaze ont des sections losangiques ou bien allongées. Ils sont parcourus de cassures selon lesquelles se propage leur altération en gilbertite. Ils contiennent en inclusion quelques petites albites ainsi que des minéraux aciculaires à Nb-Ta. La fluorite peut cristalliser, en petits cristaux xénomorphes, à ses dépens.

Dans les mioles nous retrouvons :

-Le quartz en plages irrégulières.

-L'albite et le feldspath très corrodés par la pâte microgrenue. L'albite est parfois sous forme de fragments anguleux.

-Le mica qui forme de grandes plages bordées d'un liseré fin de muscovite phengitique. Il a la même composition que celui du granite à topaze muscovite (tab. I, fig. 3), mais il présente des teneurs un peu plus élevées en MgO (0,75%) et en MnO (1,15%) au cœur des cristaux. Il contient l'essentiel des cristaux de cassitérite, ainsi que de rares grains trapus de wolframite ou bien de wolframite et de scheelite plus rares.

La coloration brunâtre des mioles est donnée en grande partie par des hydroxydes de fer qui sont les produits d'altération d'anciennes arsénopyrites.

La course de cristallisation, en ce qui concerne les phénocristaux, est la même que celle du granite à muscovite. Les mioles indiquent une sursaturation en phase fluide en fin de cristallisation du microgranite.

GÉOCHIMIE

Les éléments majeurs et traces pour les granites et microgranites de la coupole de Tin-Amzi ont été déterminés au C.R.P.G. de Nancy. Les échantillons ont été analysés par I.C.P.-M.S. pour les éléments majeurs, les traces (Rb, Nb, Ta, Ba, Sr, Be, Zr, Y, Ga, U et Th) et les terres rares et par voie humide pour Li, Sn, W et

F. Le tantale n'a malheureusement pas été dosé pour tous les échantillons. Les résultats représentatifs des différents faciès sont donnés dans le tableau N° III.

Éléments majeurs

Les différents granites et microgranites de la coupole de Tin-Amzi montrent des similitudes dans le comportement des éléments majeurs. Ils sont très siliceux et ont des teneurs très basses en TiO_2 , MnO , MgO et CaO .

Les teneurs en fer total sont très faibles mais montrent une augmentation significative au sommet du granite à topaze et protolithionite (accroissement des proportions de micas et de wolframite).

Les alcalins (Na_2O+K_2O) sont légèrement plus importants dans les granites et microgranites à topaze et muscovite avec des valeurs variant de 8,54 à 9,44% par rapport au granite à topaze et protolithionite (8,18-8,31%). Les teneurs en Na_2O sont largement supérieures à celles de K_2O et reflètent la prédominance de l'albite sur le feldspath potassique dans tous les faciès. Une surimposition de phénomènes tardi à post magmatiques au sommet du granite à topaze et protolithionite se traduit par une baisse des teneurs en Na_2O (2,62%) et une augmentation de la perte au feu (1,71%).

Tous les échantillons analysés sont peralumineux ($A/CNK > 1,10$) et leur représentation dans le diagramme de Debon et Le Fort (1988) le confirme (fig.4). Ils se rapprochent plutôt du sous type à "ferrous lithium micas" représenté par les granites à zinnwaldite de l'Erzebirge à AI (aluminium index) intermédiaire que du sous type à "aluminium lithium micas" (Forster, 1960) représenté par le granite à lépidolite de Beauvoir à AI élevé (Cuney *et al.*, 1994). Les échantillons du granite à topaze et protolithionite montrent une augmentation du paramètre B

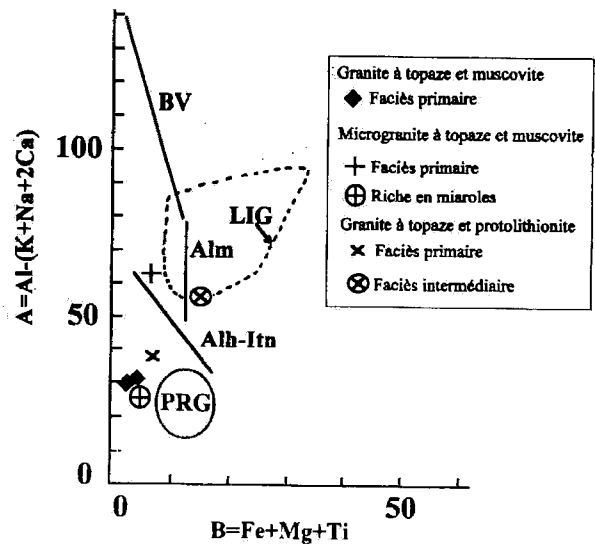


Fig. 4 - Position des granites et microgranites de la coupole de Tin-Amzi dans le diagramme A-B de Debon et Lefort (1988). Les domaines des autres granites à topaze sont donnés pour comparaison. BV : Beauvoir (Cuney *et al.*, 1992); Alh-Itn : Aheleheg, In-Tounine, Hoggar (Cheilletz *et al.*, 1992); Alm : Alameda, Hoggar (Chalal et Marignac, 1997); PRG : Pleasant Ridge (Taylor, 1992); Lig : Erzebirge (Cuney *et al.*, 1992).

Location of the Tin-amzi cupola granites and microgranite in the diagram A-B of Debon and Lefort (1988). Fields of the other topaz granites are given for comparison. BV : Beauvoir (Cuney and al., 1992); Alh-Itn : Aheleheg, In-Tounine, Hoggar (Cheilletz and al., 1992); Alm : Alameda, Hoggar (Chalal and Marignac, 1997); PRG : Pleasant Ridge (Taylor, 1992); Lig : Erzebirge (Cuney and al., 1992).

($DI=Fe+Ti+Mg$) en même temps que le paramètre A ($Al/(K+Na+2Ca)$) ce qui souligne les processus tardi à post-magmatiques auxquels ils sont soumis.

Les teneurs en phosphore sont basses ($0,08\% < P_2O_5 < 0,15\%$). Elles sont dues à l'absence d'apatite, la rareté du xénotime dans le granite à topaze et protolithionite, mais surtout aux faibles teneurs en P_2O_5 dans les albites, les plus riches atteignant seulement 0,08% en cet

Tableau III - Données géochimiques sur roches totales des granites et microgranites à topaze de Tin-Amzi.

Whole rock geochemical data on the Tin-amzi cupola topaz granites and microgranites.

1,2 : granite (*topaze and muscovite granite*). 3, 4: microgranite à topaze et muscovite (*microgranite*).
5,6,7,8 : granite à topaze et protolithionite (*topaze and protolithionite granite*).

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Ech.	TMS2	T2Hn	TA23	TR11n	TMS6	TMS7	TMS8	TMS11
SiO ₂	76,79	73,43	74,22	73,91	75,31	73,65	75,62	72,34
Al ₂ O ₃	13,83	15,81	15,58	15,4	14,53	15,3	14,03	15,41
Fe ₂ O ₃	0,28	0,16	0,37	0,26	0,55	1,16	0,96	4,57
MnO	0,02	tr	0,04	0,03	tr	0,02	0,02	0,22
MgO	0,02	0,02	0,08	0,02	tr	tr	tr	tr
CaO	0,43	0,45	0,08	0,33	0,39	0,3	0,2	0,48
Na ₂ O	5,17	5,81	5,17	6,12	5,16	5,44	3,54	2,62
K ₂ O	2,72	3,63	3,37	3,07	3,15	2,81	4,64	1,72
TiO ₂	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
P ₂ O ₅	0,11	0,11	0,15	0,08	0,12	0,11	0,12	0,08
P.F.	0,47	0,56	0,64	0,67	0,61	1,03	0,63	1,71
Total	99,84	99,98	99,7	99,89	99,82	99,82	99,76	99,15
A/CNK	1,13	1,11	1,27	1,10	1,15	1,22	1,25	2,19
F%	0,76	0,83	0,82	0,31	0,71	0,85	1,01	2,94
Li ppm	92	39	160	90	134	149	181	804
Sn	10,4	14,1	158	636	13	18	28	60
Nb	23,19	63,93	28,02	35,72	47	74	55	44
Ta	13,89	29,91	19,67	24,6	nd	nd	nd	nd
W	19,9	130	14,8	188	90	105	256	655
Rb	430,7	489,3	581	433,1	469	440	830	716
Ba	33	27	175	331	29	18	15	13
Sr	15	18,4	226	99,4	38	9	153	23
Be	4,33	4,31	5,84	3,83	2,2	1,79	2	1,29
Zr	20	39	28,6	42,7	14	21	29	20
Y	16,9	12,1	9,64	4,84	8,32	4,83	7,75	15,48
Ga	33,9	42,4	42	45,1	42	48	40	53
U	29,5	21,4	1,72	1,9	16,44	15,69	9	13,34
Th	6,57	6,78	3,11	2,49	4,84	5,06	4,57	8,47
U/Th	4,49	3,16	0,55	0,76	3,40	3,10	1,97	1,57
La	1,823	1,500	6,440	2,690	1,320	0,93	1,140	2,520
Ce	5,57	4,240	10,920	3,930	3,650	3,47	2,060	7,020
Pr	0,768	0,581	1,660	0,662	nd	nd	nd	nd
Nd	2,954	2,353	6,410	2,401	2,650	1,85	1,810	4,200
Sm	2,01	1,800	2,010	1,089	1,820	1,06	1,200	2,600
Eu	0,053	0,028	0,211	0,152	0,090	0,01	0,010	0,080
Gd	1,707	1,265	1,658	0,821	1,780	0,93	0,940	2,050
Tb	0,42	0,366	0,346	0,236	nd	nd	nd	nd
Dy	2,61	1,985	1,798	0,882	1,800	1,18	1,410	2,860
Ho	0,396	0,285	0,238	0,131	nd	nd	nd	nd
Er	1,197	0,767	0,634	0,433	0,970	0,54	0,620	1,270
Tm	0,33	0,225	0,132	0,260	nd	nd	nd	nd
Yb	2,87	2,340	1,052	0,841	1,910	1,33	1,520	2,660
Lu	0,43	0,350	0,144	0,210	0,310	0,21	0,220	0,410
Total	23,14	18,085	33,653	14,738	16,300	11,510	10,930	25,670
Eu/Eu*	0,09	0,06	0,35	0,49	0,15	0,03	0,03	0,11
La/YbN	0,46	0,46	4,39	2,29	0,50	0,50	0,54	0,68
La/SmN	0,59	0,54	2,07	1,59	0,47	0,57	0,61	0,63
Gd/YbN	0,49	0,45	1,30	0,81	0,77	0,58	0,51	0,64

oxyde. L'albite peut en effet contribuer à l'enrichissement en phosphore dans les granites (Yin *et al.*, 1995) notamment dans les faciès à topaze et lépidolite du gisement à Ta - Nb - Li du Yichun où ce minéral contient plus de 0.30% en P_2O_5 (Pollard et Taylor, 1991).

Le lithium présente des valeurs moyennes, devenant plus importantes dans le granite à topaze et protolithionite, atteignant un maximum au sommet du granite (Ech.TMS11) où la roche est à prédominance de quartz, topaze et mica.

Dans le système Q-Ab-Or (fig.5), les granites et microgranites de Tin-Amzi se projettent du côté Q - Ab par rapport aux minimums ternaires avec ajout de fluor (Pichavant et Maning, 1984)

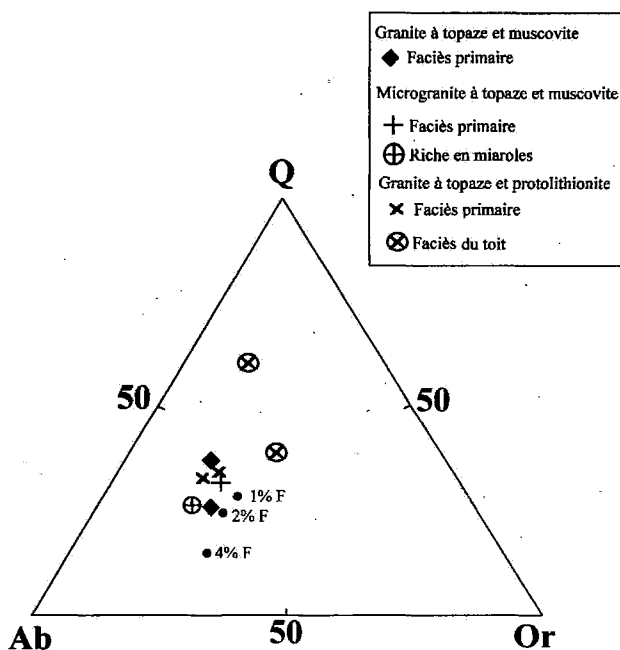


Fig. 5 - Projection des granites et microgranites de la coupole de Tin-Amzi dans le diagramme Q-Ab-Or. Les ronds pleins montrent les minimums dans le système avec ajout de fluor à 1%, 2% et 4% (Maning, 1981).

Q-Ab-Or plot of Tin-Amzi cupola granites and microgranites. Solids dots show the minima for the system with 1%, 2% and 4% added fluorine (Maning, 1981).

confirmant ainsi leur appartenance à la classe des leucogranites riches en fluor et lithium (Weidner et Martin, 1987). Paradoxalement c'est l'échantillon le moins riche en fluor : ech. TR11n (microgranite à miaroles minéralisées) et l'échantillon le moins riche en lithium : ech. T2Hn (granite à muscovite du toit), qui se rapprochent du pôle Ab au niveau du minimum m2 avec ajout de 2%F. Ceci indique certainement une perte de Fluor et dans une moindre mesure de lithium dans le système miarolitique et au sommet du granite à topaze-muscovite au profit d'une phase fluide. Les greisens fissuraux du dessus de la coupole sont à topaze et protolithionite.

Eléments traces

Le granite à topaze muscovite est pauvre en Ba, Sr, Be, Y, Zr. Il a des teneurs extrêmement basses en Li (39-92 ppm). Dans ce granite, les faibles proportions de micas suggèrent que la plus grande partie du Li (ainsi que du Fluor) a été expulsée dans la phase fluide (Fuge, 1977). Les éléments qui présentent des teneurs élevées sont le Rb, Ga, W, Sn, Ta et Nb. L'uranium a des teneurs élevées par rapport au thorium avec un rapport U/Th > 3.15.

Le granite à topaze protolithionite montre le même comportement des éléments traces. On note cependant un fort accroissement des teneurs en Li (134-804ppm) et W (90-655ppm) de la profondeur vers le toit du granite.

Le microgranite à topaze muscovite est pauvre en Be, Y, Zr, U, Th. Il a des rapports U/Th très faibles (0.55-0.76). Il est riche en Rb, Ga, Nb et Ta avec un rapport Ta/Nb=0.70. Avec la fréquence des miaroles, on note l'accroissement des teneurs en Sn et W ainsi qu'un appauvrissement en Li.

Le microgranite à topaze muscovite est enrichi en Ba, Sr, Eu, ce qui est inhabituel pour les roches aussi évoluées à topaze. La même

remarque est faite dans le granite de Beauvoir pour le Sr (Cuney *et al.*, 1994). Il faut cependant noter que les dykes de Tin Amzi sont mis en place dans un milieu gneissique riche en ces éléments. Mais cela peut indiquer aussi l'intervention d'un fluide aqueux lors de leur cristallisation.

Terres rares

Les analyses de terres rares (TR), ainsi que les rapports TR légères/TR lourdes, sont reportées dans le tableau III. Les profils normalisés à la chondrite C1 sont représentés dans la figure 6.

Les profils montrent clairement deux lignées magmatiques différentes. Nous avons :

-Les microgranites à topaze-muscovite avec un profil très perturbé (fig. 6a). Leur somme de TR est très variable ($14,738 \text{ ppm} < S_{14TR} < 33,653 \text{ ppm}$), mais reste assez basse, le microgranite riche en miaroles étant le plus appauvri. Ils montrent une anomalie négative en Eu peu prononcée ($0,35 < \text{Eu}/\text{Eu}^* < 0,49$), un léger enrichissement en TR légères ($2,29 < \text{La}/\text{YbN} < 4,39$) et une concavité assez prononcée au niveau de Ho et Er.

-Le granite à topaze muscovite présente un profil identique à celui du granite à topaze-protolithionite (fig. 6b). Ce profil est du type mouette avec une anomalie en Eu très prononcée ($0,03 < \text{Eu}/\text{Eu}^* < 0,15$). Sa pente est légèrement inverse par rapport à celui du microgranite ($0,46 < \text{La}/\text{YbN} < 0,15$). Le zircon présent dans les deux faciès peut être le porteur des TR lourdes (Watson, 1979) avec une prédominance de Yb et Lu qui peuvent être attribués à l'Uraninite (Fryer and Taylor, 1987). Mais ce qui est intéressant c'est que l'allure de ces profils se rapprochent beaucoup de celui du granite de Cinovec (Cocherie *et al.*, 1991) en montrant un "tetrad effect" qui indiquerait une interaction fluide-magma comme pour les leucogranites qui montrent des spectres de TR

similaires (Masuda and Agaki, 1989). Cette interaction explique dans une certaine mesure la différence entre les leucogranites à topaze de la région de Tamanrasset (Cheilletz *et al.*, 1992, Chalal et Marignac, 1997) qui ont un spectre plat avec forte anomalie en Eu, pauvres en phosphore et riches en TR avec ceux de Tin Amzi, spectre en mouette pauvres en Phosphore mais pauvres en TR. Ceci expliquerait, par lessivage, la pauvreté en TR des granites de Tin-Amzi. Ces granites appartiennent tous à la même sous classe des granites à métaux rares, pauvres en phosphore de Raimbault *et al.*, (1991).

L'échantillon TMS11, représentant l'altération post-magmatique au sommet du granite à topaze protolithionite, est le plus enrichi en TR ($S_{10TR} = 25,67 \text{ ppm}$). Cela prouve que les fluides ont aussi extrait les TR à partir de niveaux inférieurs pour les reconcentrer au sommet de la coupole, les carbonates (sidérite) pouvant piéger les TR lourdes (Derré *et al.*, 1987).

MINÉRAUX À Nb, Ta, W, Sn, Ti

Les minéraux porteurs de ces éléments sont essentiellement la columbo-tantalite, la wolframioxiolite, la wolframite, la cassitérite et le rutile. Ils ont été observés au M.E.B. et analysés à la microsonde électronique du «Service Commun de Microanalyses», Université Henri Poincaré Nancy I. Les conditions d'analyses sont: tension d'accélération = 20 KV, courant = 10 nA. Quelques analyses représentatives sont données dans le tableau IV.

Dans le granite à topaze -muscovite, on trouve deux microparagèneses :

- La première est à rutile, columbo-tantalite et wolframite (fig. 9, d). Elle se rencontre à des niveaux inférieurs du granite et constitue un assemblage magmatique probable. Le rutile montre au M.E.B. des zonations complexes. Il est niobifère (6,69% Nb_2O_5), tantalifère (2,26%

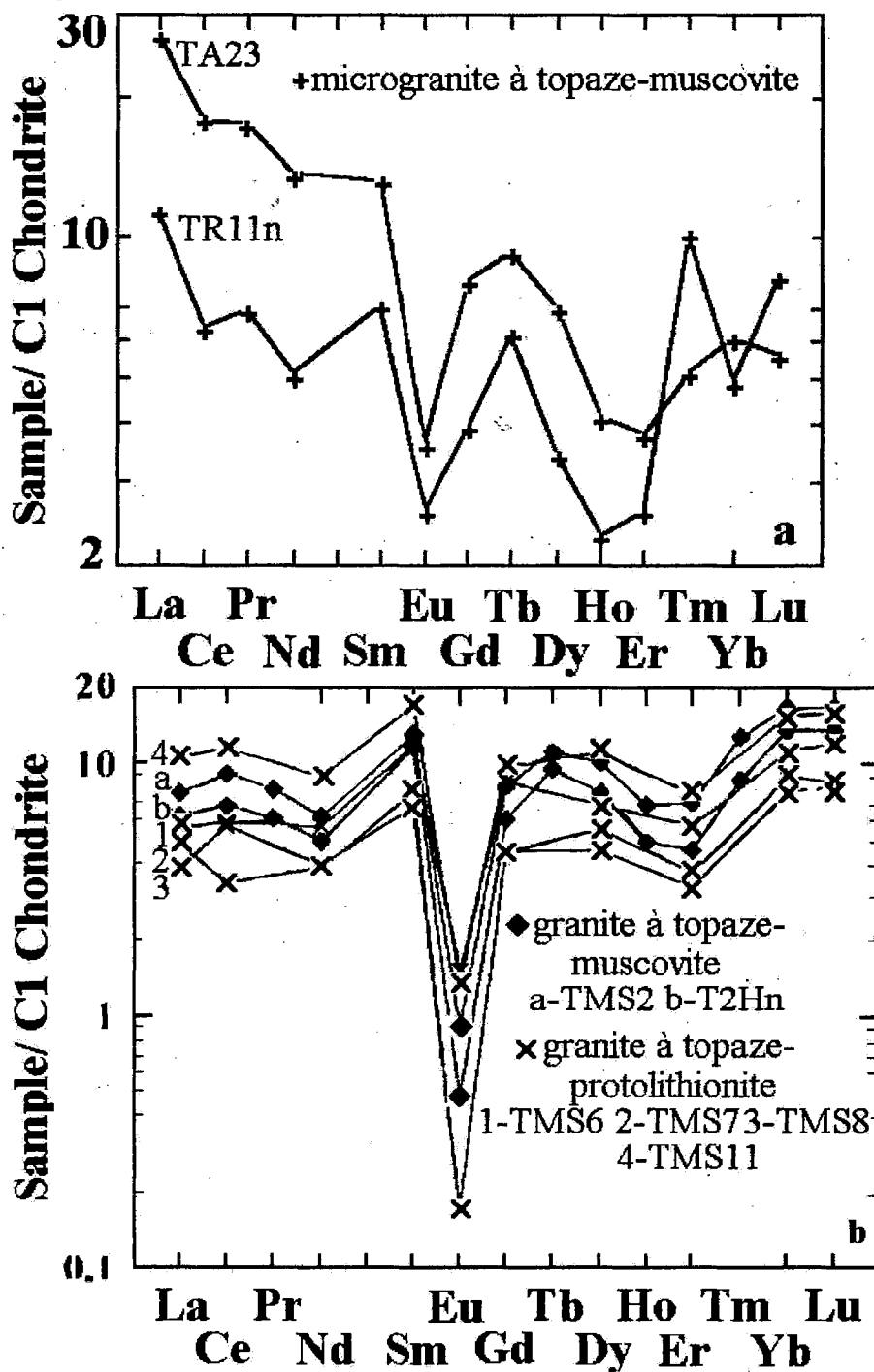


Fig. 6 - Diagrammes des Terres Rares (normalisées à la chondrite C1),
a- pour les microgranites b- pour les granites, de la coupole de Tin-amzi.

*Rare Earth element normalized patterns of the Tin-Amzi cupola
a- microgranites, b- granites.*

Tableau IV - Analyses sélectionnées de columbo-tantalites (1,2), wolframioxiolites (3,4), wolframites (5,6,7,8), rutile (9,10) et cassitérites (11,12).*Selected analyses of columbite-tantalites (1,2), wolframioxiolites (3,4), wolframites (5,6,7,8), rutile (9,10) et cassiterites (11,12).***T2H, TMS10** : granite à topaze et muscovite (*topaze and muscovite granite*); **TMS6, TMS11** : granite à topaze et protolithionite (*topaze and protolithionite granite*); **TR11** : microgranite à topaze et muscovite (*topaze and muscovite microgranite*); **Z223, GC1** : greisen filonien (*veined greisen*).

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ech												
N°An.	T2H 21	TMS6 2	T2H 18	TMS11 50	T2H 102	TMS6 4	TMS11 34	Z223 1	TMS10 22	GC1 83	TR11 37	GC1 82
WO ₃	4.81	5.70	26.69	34.96	72.9	69.93	71.82	76.35	0	0	0.02	0
Nb ₂ O ₅	47.94	52.27	36.79	27.07	1.56	4.37	1.55	0	6.69	0	1.28	0
Ta ₂ O ₅	25.07	19.27	14.73	14.48	1.12	1.13	1.35	0	2.26	0	3.07	0.24
SnO ₂	0.26	0.02	0	0.14	0.15	0.18	0.22	0.08	0.43	3.09	94.56	100.3
TiO ₂	3.71	2.11	0.42	0.36	0.07	0.42	0.06	0	87.35	94.54	1.07	0
FeO	11.16	10.94	12.76	11.3	15.39	14.60	13.54	12.94	3.32	0.60	0.84	0.13
MnO	6.79	7.78	7.74	9.07	7.59	7.75	9.49	11.25	0.03	0	0.07	0
CaO	0.04	0	0	0	0.06	0.04	0	0.01	0.03	0.08	0.34	0.09
Total	99.78	98.09	99.13	97.38	98.84	99.37	98.03	100.6	100.1	98.31	101.2	100.7
Base	6ox.	6ox.	8ox.	8ox.	4ox.	4ox.	4ox.	4ox.	2ox.	2ox.	2ox.	2ox.
W	0.078	0.09	0.61	0.85	0.96	0.91	0.95	0.99	0	0	0	0
Nb	1.356	1.48	1.48	1.15	0.04	0.10	0.04	0	0.04	0	0.01	0
Ta	0.427	0.33	0.36	0.37	0.02	0.02	0.02	0	0.01	0	0	0
Sn	0.012	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.02	0.95	1.00
Ti	0.175	0.10	0.03	0.01	0	0.02	0	0	0.91	0.98	0.02	0
Fe	0.584	0.575	0.946	0.885	0.653	0.613	0.580	0.543	0.038	0.007	0.013	0.003
Mn	0.360	0.414	0.581	0.72	0.326	0.330	0.412	0.478	0	0	0.001	0
Ca	0.003	0	0	0	0.003	0.002	0	0.001	0	0.001	0.001	0.002

Ta₂O₅) et ferrifère (3,32 % FeO). La columbo-tantalite peut être sous forme de petits cristaux effilés en inclusion dans les micas ou bien xénomorphes accolés au rutile. Elle est riche en tungstène (6,78% WO₃), riche en titane (4,85% TiO₂) et est plus niobifère que tantalifère (Ta/Ta+Nb=0,14) avec un rapport Mn/Mn+Fe voisin de 0,5. La wolframite est associée au rutile en petits cristaux rares. Elle est niobifère (2,30% Nb₂O₅), titanifère (1,47% TiO₂) et a des teneurs élevées en Zr (0,89% ZrO₂).

- La deuxième se rencontre à des niveaux supérieurs (au toit) du granite. Elle forme de petits cristaux (150µ) (fig. 9, e) montrant une séquence à columbo-tantalite au centre, puis une phase fibreuse et enfin wolframite. La columbo-tantalite est légèrement zonée. Par rapport à celle qui

cristallise en profondeur, ses teneurs en Ta sont plus élevées (Ta/Ta+Nb= 0,23), elle est plus ferifère et est toujours tungstifère. Le minéral fibreuse est à composition de wolframioxiolite au sens de Cerny et Ercit (1985). Il est riche en tungstène et niobium avec de fortes teneurs en Ta (tableau IV) avec un rapport Mn/Mn+Fe variant de 0,35 à 0,45. Leurs compositions chimiques reportées dans les figures 7 et 8 montrent que seul un léger hiatus les sépare des columbo-tantalites. Elles sont intermédiaires entre un pôle à composition de wolframite et un pôle de columbo-tantalite en montrant une légère dérive vers les columbo-tantalites tungstifères (fig. 8). Ce minéral dont la nature structurale est encore peu connue (Ginsburg, 1969; Amichba and Dubakina, 1969) a été documenté notamment:

* Dans les filons minéralisés au voisinage de la coupole de granite à albite et topaze de Beauvoir. Il s'agit du remaniement d'une minéralisation ancienne à ferbélite par des fluides magmatiques issus du granite (Aïssa *et al.*, 1987).

* Dans les granites et pegmatites de Thaïlande où elle peuvent cristalliser à des stades magmatiques, tardi-magmatiques ou post-magmatiques (Suwinmonprecha *et al.*, 1995).

* Dans les microgranites d'Alemeda (Hoggar), où elles cristallisent dans la matrice comme des microlites ou bien dans les lithophyses albitiques considérées comme des manifestations tardi ou post-magmatiques (Chalal et Marignac, 1997).

La wolframite a des teneurs appréciables en Nb_2O_5 et Ta_2O_5 , elle est légèrement plus niobifère que tantalifère.

Dans les granites à topaze et protolithionite, nous distinguons trois paragénèses correspondant à trois stades d'évolution :

- Dans le faciès sain profond, en inclusion dans la protolithionite il y a un assemblage, probablement magmatique, à columbo-tantalite, wolframite, xénotime et zircon trapu à section quadratique. La columbo-tantalite est plus niobifère que tantalifère avec un rapport $Ta/(Ta+Nb)=0,18$. La wolframite est en petits cristaux, assez riches en Nb (4,37% Nb_2O_5).

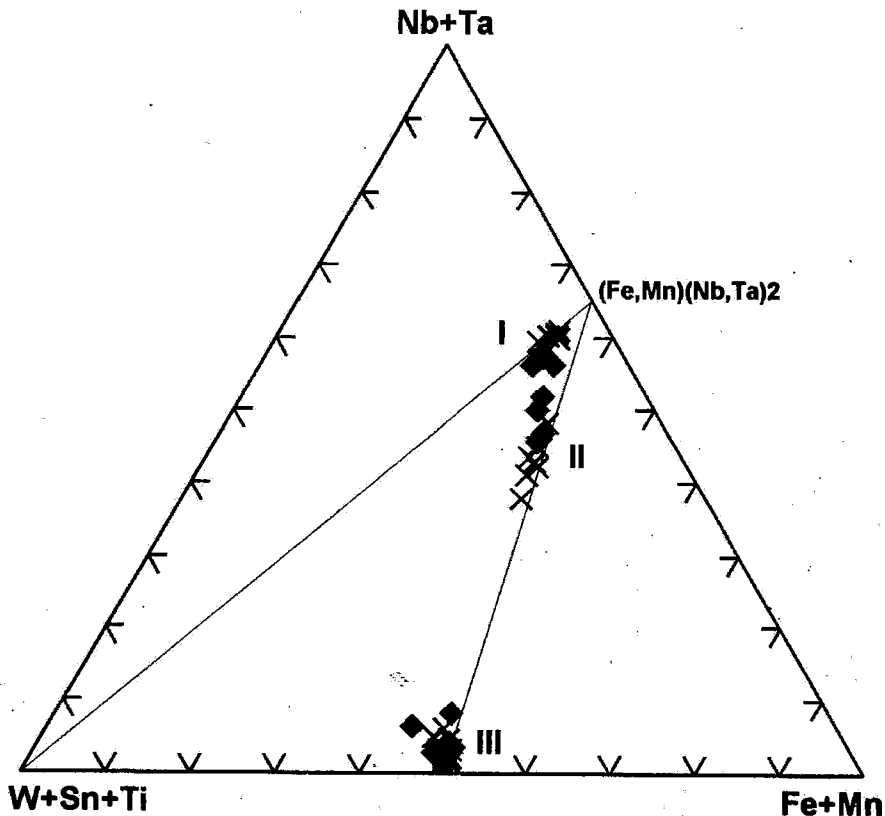


Fig. 7 - Compositions chimiques des columbo-tantalites (I), wolframioxiolites (II) et wolframites (III) des granites à muscovite (losanges pleins) et granites à protolithionite (croix).

Chemical compositions of columbite-tantalites (I), wolframioxiolites (II) and wolframites in the muscovite granite (solid diamonds) and the protolithionite granite (crosses).

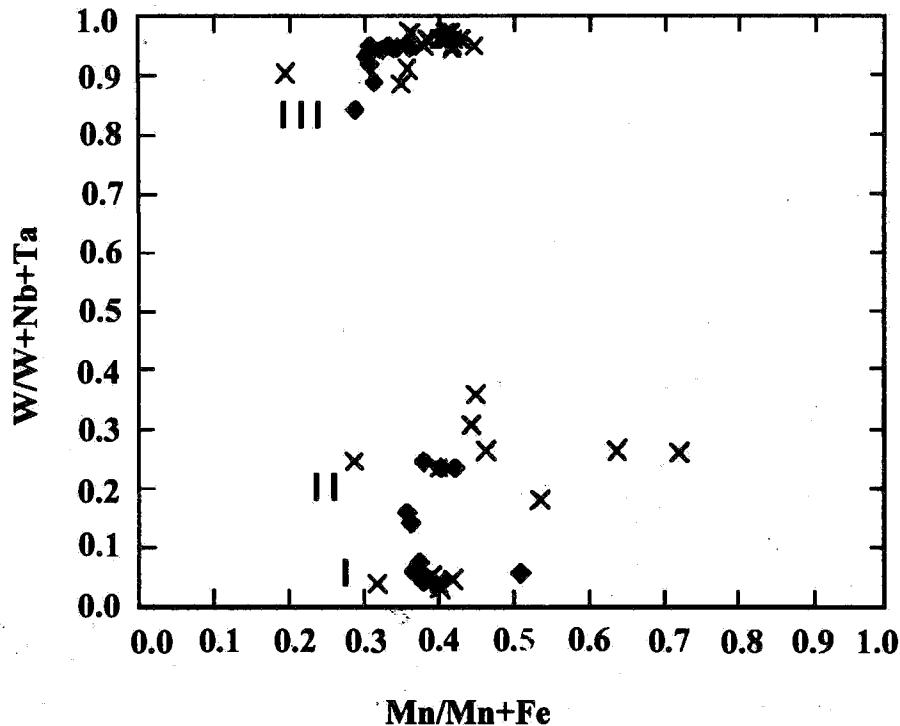


Fig. 8 - Projection des columbo-tantalites (I), wolframoïxolites (II), wolframites (III), cassitérites et rutile dans le diagramme triangulaire (Nb+Ta) – (W+Ti+Sn) – (Fe+Mn) de Cerny et Ercit (1985).

Plot of the columbite-tantalites (I), wolframoïxolites (II), wolframites (III), cassiterites and rutile in the triangular diagram (Nb+Ta) – (W+Ti+Sn) – (Fe+Mn) of Cerny and Ercit (1985).

- Dans le faciès intermédiaire, un assemblage "magmatique hydrothermal" (cf. discussion) est constitué de la protolithionite II avec en inclusion la wolframoïxolite qui forme de petits cristaux plus ou moins automorphes provoquant des halos pléochroïques. Cette dernière est plus ou moins zonée avec une composition chimique assez comparable à celle du granite à topaze et muscovite mais avec un rapport Mn/Mn+Fe variant largement de 0,28 à 0,73 (fig.7).

- Au toit du granite, nous avons un assemblage franchement hydrothermal à wolframite dans laquelle se retrouvent des wolframoïxolites en reliques plus riches en tungstène que celles des autres faciès (fig.9, f), muscovite et sidérite. La wolframite se présente en disséminations assez régulières de cristaux tabulaires de plus de 200 μ et a des teneurs appréciables en Nb et Ta (1,55% Nb₂O₅, 1,35% Ta₂O₅).

Dans les microgranites, la cassitérite est le minéral prédominant dans les miaroles. Elle est associée à la muscovite en grandes plages, à une rare wolframite ou bien wolframoïxolite et à des cristaux automorphes d'arsénopyrite. Cette cassitérite est tantalifère (jusqu'à 3,07% Ta₂O₅), elle est aussi niobifère et titanifère (tab. IV, éch. TR11). Cette composition chimique est sujette à de légères variations entraînant des zonations faiblement distinguées au M.E.B.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les granites de la coupole de Tin Amzi ainsi que le microgranite qui affleurent en dykes, par leurs caractères pétrographique et géochimique, peuvent se ranger dans la grande classe des granites à topaze. Avec leurs teneurs élevées

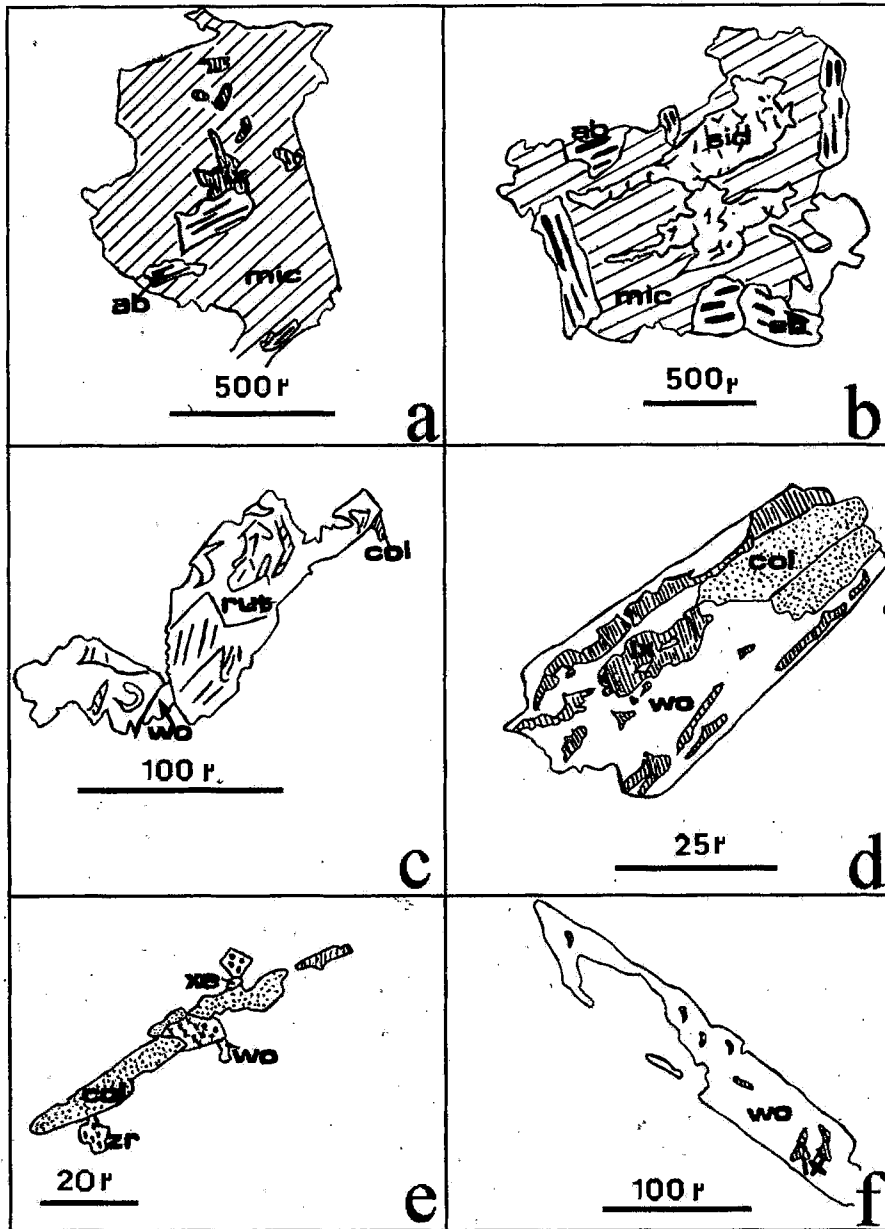


Fig. 9 - a) inclusions de wolframioxiolite dans la protolithionite II. b) sidérite dans la protolithionite II. c) rutile zoné dans le granite à topaze et muscovite. d) paragenèse à wolframioxiolite (Ix), columbo-tantalite (col) et wolframite (Wo) dans le granite à topaze et muscovite. e) association de minéraux accessoires dans le granite à topaze et protolithionite (xe- xénotime et zr- zircon). f) wolframite en dissémination au toit du granite à topaze et protolithionite.

a) inclusions of wolframioxiolite in the protolithionite II. b) siderite in the protolithionite II. c) zoned rutile in the topaze and muscovite granite. d) paragenesis with wolframioxiolite (Ix), columbite-tantalite (col) and wolframite (Wo) in the topaze and muscovite granite. e) accessory minerals association in the topaze and protolithionite granite (xe- xenotime and zr- zircon). f) dissemination of wolframite in the roof of the topaze and protolithionite granite.

Tableau V - Comportement du fluor et des éléments en traces dans le microgranite et le système miarolitique au cours de l'évolution tardi-magmatique.

Behaviour of fluorine and trace elements in the microgranite and the miarolitic system during the late magmatic evolution.

éléments	Microgranite et système miarolitique		
	Fluides magmatiques	Piégeage dans miaroles	Sortie
F	→	↓	→
Li	→	↓	→
Ta	→	~	?
Nb	→	~	?
Sn	→	↓	?
W	→	↓	?

en SiO_2 (>73%) et très faibles en P_2O_5 (<0,4%), ils seraient du sous-type «pauvre en phosphore» (Taylor, 1992). Néanmoins, certains critères, tels que la richesse en T.R., en Y, en Th, ainsi que des teneurs plus faibles en Al_2O_3 , propres à ce sous-type ne s'observent pas dans les échantillons étudiés. Cela est certainement dû à l'empreinte de leur évolution tardi-magmatique.

Nous sommes en présence de trois granites représentant deux lignées magmatiques distinctes :

- La première est constituée du microgranite à topaze et muscovite, elle est tantalifère avec des teneurs élevées en Sn et basses en W. Dans le système miarolitique, le transfert pourrait se faire par vapeur? Il mobilise fortement Sn, Li, W, F et Rb, mais très peu le Ta et le Nb. Le bilan (tab. V) entre un microgranite pauvre en miaroles (ech. TA23) et un autre qui en est riche (ech. TR11) montre l'extraction nette hors du magma du fluor et du lithium.

-La deuxième comprend le granite à topaze et muscovite ainsi que le granite à topaze et protolithionite. Elle est à tantale et tungstène et est caractérisée par un rapport W/Sn élevé. C'est une lignée relativement "nouvelle" que

l'on pourrait nommer "granites à tungstène" et comparable à Dajishan (Chine) et au faciès B'' de Beauvoir (Raimbault *et al.*, 1991; 1995). L'étude de ces granites met en évidence un transfert de métaux dans la transition magmatique-hydrothermale attesté par les changements de composition et la nature des minéraux accessoires. On observe une mobilisation très forte de W, F, Rb, Li, mais modérée de Sn. Le Nb et probablement le Ta sont peu mobiles. Cela se traduit par la séquence à columbo-tantalite tungstifère puis wolframoixiolite et enfin wolframite. La domination du W dans le fluide est nette. Le caractère exemplaire du granite à topaze et protolithionite est à souligner avec le passage d'un assemblage magmatique à un assemblage magmatique-hydrothermal:

- D'une protolithionite I, nous passons à une protolithionite II s'appauvrissant en Mg, Ti et s'enrichissant en Mn (Mn/Fe élevé) et Cs. Le fluide était en équilibre avec un magma très évolué.

- Puis à un assemblage purement hydrothermal (clairement subsolidus) avec la cristallisation de muscovite aux dépens de la protolithionite, de sidérite et de wolframite.

Dans le granite à topaze et muscovite, la même interprétation peut être faite pour le transport des métaux. L'enrichissement en Ta du fluide est mis en évidence par l'augmentation du rapport Ta/(Ta+Nb) dans les columbo-tantalites.

Le processus de transfert de métaux rares et leur expression purement magmatique à purement hydrothermale peut apparaître plus ou moins complète à Tin-Amzi. Les wolframoixiolites ont déjà été décrites à Aledema, Hoggar (Chalal et Marignac, 1997) comme de cristallisation magmatique (microlites dans les microgranites) et tardi-magmatique (dans des litophyses albitiques). L'expression de l'extraction et du transport hors du magma par des fluides magmatiques a été documentée à Beauvoir (Aïssa *et*

al., 1987). La séquence de dépôt avec ferberite puis wolframoixiolite et enfin columbite qui y est décrite est l'inverse de celles observées à Tin-Amzi.

Remerciements : Ce travail qui se veut une contribution à l'étude des granites à métaux rares du Hoggar a été réalisé au Laboratoire de Géologie et de Minéralogie de Louvain La Neuve, à l' Ecole des Mines de Nancy, au C.R.P.G. Nancy et à l'I.S.T. de l'U.S.T.H.B. Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous nos amis de l'O.R.G.M. sans lesquels les missions de terrain auraient été impossibles, K. Ouzegane et D.E. Aïssa pour la lecture critique du manuscrit, M.R. Aïte et J.P. Gelard de l'université du Maine (Le Mans) pour leur accueil chaleureux et toute leur aide.

BIBLIOGRAPHIE

- AISSA, M., MARIGNAC, CH. AND WEISBROD, A., 1987. Le stockwerk à ferberite d'Echassières : évolution spatiale et temporelle ; cristallogénie des ferberites. *Géologie de la France*, 2-3, pp. 311-333.
- AMICHIBA T.M. AND DUBAKINA L.S., 1977. Wolframioixiolite in ores of tin-tungsten deposits of Yakutia. In: *The American Mineralogist*, 62, N° 11-12, 1262p.
- BERTRAND, J.M., MICHARD, A., BOULIER, A.M. AND DAUTEL, D., 1986. Structure and U-Pb geochronology of the Central Hoggar (Algeria). A reappraisal of its Pan-African evolution. *Tectonics*, 5, pp.955-972.
- BOUABSA L., 1987. Intrusions granitiques à albite-topaze : minéralisations stannio-wolframifères et altérations hydrothermales associées. L'exemple du Hoggar central, Algérie. *Thèse 3° cycle Univ. Nancy I*, 193 p.
- CERNY, P., AND ERCIT, T.S., 1985. Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. *Bulletin de Mineralogie*, 108, pp.499-532.
- CHALAL, Y. ET MARIGNAC, CH., 1997. Découverte de wolframoixiolite dans les microgranites à albite-topaze d'Aleméda (Hoggar central, Algérie) : implications métallogéniques. *Bull. Serv. Carte Géol. Algérie*, 8, n°1, pp. 71-79.
- CHEILLETZ, A., BERTRAND, J.M., CHAROY, B., MOULAHOU, O., BOUABSA, L., FARRAR, E., ZIMMERMANN, J.L., DAUTEL, D., ARCHIBALD, D.A. ET BOULIER, A.M., 1992. Géochimie et géochronologie Rb-Sr, K-Ar et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ des complexes granitiques Pan-africains de la région de Tamanrasset (Algérie) : relations avec les minéralisations Sn - W associées et l'évolution tectonique du Hoggar central. *Bull. Soc. Géol. France*, 163, n° 6, pp. 733-750.
- COCHERIE, A., JOHAN, V., ROSSI, P. AND STEMPROK, M., 1991. Trace element variations and lanthanide tetrad effect studied in a Variscan lithium albite granite: case of the Cinovec granite (Czechoslovakia). In : Pagel, M. & Leroy, J.L. eds., *Source, Transport and Deposition of Metals*, Balkema, Rotterdam, pp. 745-749.
- CHRISTIANSEN, E.H., BURT, D.H., SHERIDAN, M.F. AND WILSON, R.T., 1983. The petrogenesis of topaz rhyolites from the Western united States. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 83, pp. 16-30.
- CUNNEY, M., MARIGNAC, C. AND WEISBROD, A. 1992. The Beauvoir topaz-lepidolite-albite granite (Massif Central, France): the disseminated magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be mineralization. *Economic Geology*, 87, pp. 1766-1794.
- CUNNEY, M., STUSSI, J.M. AND MARIGNAC, C., 1994. A geochemical comparison between West and Central-European granites : implication for the origin of rare metal mineralization. In *Metallogeny of collisional orogens*. Seltmann, Kämpf and Möller (eds). *Czech. Geological Survey*, Prague, pp. 96-102.
- DEBON F., LEFORT P., 1988. A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations : principle, methode, applications. *Bull. Mineral.*, 111, pp. 493-510.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. ET ZUSSMAN, J., 1966. An introduction to the rock forming minerals. *Longmans* (eds.) London.
- DERRÉ, C., LECOLLE, M., MAUREL-PALACIN, D., NORONHA, F. ET ROGER, G., 1987. Evolution granitique et minéralisations filonniennes à Sn-W dans le Nord du Portugal. *Chron. Rech. Min.*, 487, pp. 63-74.

- RAIMBAULT, L., CUNNEY, M., AZENCOTT, C., DUTHOU, J.L. AND, JORON, J.L., 1995.** Geochemical Evidence for a multistage Magmatic Genesis of Ta-Sn-Li Minéralisation in the Granite at Beauvoir, French Massif Central. *Economic Geology*, 90, pp. 548-576.
- SUWINMONPRECHA, P., CERNY, P. AND FRIEDRICH, G., 1995.** Rare metal mineralization related to granites and pegmatites, Phuket, Thailand. *Econ. Geol.*, 90, 3, pp. 603-615.
- TAYLOR, R. P., 1992.** Petrological and geochemical characteristics of the Pleasant Ridge zinnwaldite-topaz granite, Southern New Brunswick, and comparisons with other topaz-bearing felsic rocks. *Canadian Mineralogist*, 30, pp. 895-921.
- TISHENDORF, 1977.** Geochemical and petrographic characteristics of silicic magmatic rocks associated with rare element mineralization. In : Stemprok, M., Burnol, L. and Tishendorf, G. (eds) MAWAM, *Geological Survey*, Prague, 2, pp. 41-96.
- WANG RU CHENG, FONTAN, F. ET MONCHOUX, P., 1992.** Minéraux disséminés comme indicateurs du caractère pegmatitique du granite de Beauvoir, Massif d'Echassières, Allier, France. *Canadian Mineralogist*, 30, pp. 763-770.
- WATSON, E.B., 1979.** Zircon saturation in felsic liquids : experimental results and applications to trace element geochemistry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70, pp. 407-419.
- WEIDNER, J.R. AND MARTIN, R.F., 1987.** Phase equilibria of a fluorine-rich leucogranite from the St Austell pluton, Cornwall. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 51, pp. 1591-1597.
- YIN LIN, POLLARD, P.J., HU SHOUXI AND TAYLOR, R.G., 1995.** Geologic and Geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li Deposit, Jiangxi Province, South China. *Economic Geology*, 90, pp. 577-585.

- EADINGTON, P.J. AND NASHAR, B., 1978. Evidence for the magmatic origin of quartz-topaz rocks from the New England Batholith, Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 67, pp. 433-438.
- E.R.E.M. 1973. Résultats des travaux géologiques exécutés en 1972-1973 sur le gisement de Tin Amzi et d'El-Karoussa. *Rapport interne*.
- FOSTER, M.D., 1960. Interpretation of the lithium mica. *US. Geological Survey*, Washington prof. Pap. 354 E, pp. 115-147.
- FRYER, B.J. AND TAYLOR, R.P. 1987. Rare earth element distributions in uraninites: implications for ore genesis. *Chem. Geol.*, 63, pp. 101-108.
- FUGE, R. 1977. On the behaviour of fluorine and chlorine during magmatic differentiation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 61, pp. 245-249.
- GINSBURG, A.I., GAZHEVSKAYA, S.A., SIDORENKO, G.A. AND UKHINA, T.A., 1969. Wolframioxiolite a new variety of ixiolite. *Zap. Vses. Mineral. Obshest.*, 98, pp. 63-73 (in Russian).
- KESRAOUI, M., 1990. Greisenisation et minéralisations W-Sn à Tin-Amzi (Hoggar central). Typomorphisme des minéraux et aspect géochimiques. *Thèse de Magister*, I.S.T./U.S.T.H.B., 180p.
- KILLIAN, C., 1932. Sur des conglomérats précambriens du Sahara central: le Pharusien et le Sugarien. *C.R. somm. Soc. Géol. Fr.*, 4, 87p.
- KLEEMAN, J.D., 1985. Origin of disseminated wolframite-bearing quartz-topaz rock at Torrington, New South Wales, Australia, in High Heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis: *The Inst. Min. Metall.*, London, pp. 197-201.
- KOVALENKO, V.I. 1978. The genesis of rare metal granitoids and related ore deposits. In MAWAM (Mineralization Associated With Acid Magmatism), V.3, Stempok, M., Burnol, L. and Tishendorf, G. (eds). *Geological Survey Czechoslovakia*, Prague, V. 2, pp. 41-96.
- KOVALENKO, V.I. AND KOVALENKO, N.I., 1976. Ongonites (topaz bearing quartz keratophyre)-subvolcanic analogues of rare-metal LI-F granites. *Naouka*. Moscow. (in Russian), 124 p.
- LELUBRE, M., 1952. Recherches sur la géologie de l'Ahaggar central et occidental (Sahara Central). *Bull. Serv. Carte Géol. Algérie*, 2, n° 22, 2 tomes.
- MASUDA, A. AND AGAKI, T., 1989. Lanthanide tetrad effect observed in leucogranites from China. *Geochemical Journal*, 23, pp. 245-253.
- MONIER, G., 1985. Cristallogénèse des micas des leucogranites. Nouvelles données expérimentales et applications pétrologiques. Géologie et Géochimie de l'Uranium. Nancy, *Mémoire* 14, 347 pp.
- PICHAVANT, M. ET MANING, D.A.C., 1984. Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites: the contribution of experimental data. *Physics Earth Planet Interiors*, 35, pp. 31-50.
- PICHAVANT, M., HERRERA, J.V., BOULMIER, S., BRIQUEU, L., JORON, J.L., JUTEAU, M., MARIN, L., MICHARD, A., SHEPPARD, S.M.F., TREUIL, M. AND VERNET, M., 1987. The Macusani glasses, S.E. Peru: Evidence of geochemical fractionation in peraluminous magmas. *Geochemical Society (London) special publication*, 1, pp. 359-374.
- POLLARD, P.J. AND TAYLOR, R.P., 1991. Petrogenetic and metallogenic implications of the occurrence of topaz-Li mica granite at the Yichun Ta-Nb-Li mine Jianxi Province, south China. In Pagel, M. & Leroy, J.L. eds., *Source, Transport and Deposition of Metals*, Balkema, Rotterdam, p. 789-791.
- RAIMBAULT, L., 1987. Genèse des granites à métaux rares: revue comparative des modèles géochimiques. *Géologie de la France*, 2-3, pp. 101-110.
- RAIMBAULT, L., CHAROY, B., CUNNEY, M. AND POLLARD, P.J., 1991. Comparative geochemistry of Ta-bearing granites. In Pagel, M. & Leroy, J.L. eds., *Source, Transport and Deposition of Metals*, Balkema, Rotterdam, pp. 793-796.