

LE COMPLEXE ANNULAIRE PANAFRICAIN DU TIN ERIT : UN EXEMPLE D'ÉVOLUTION SUBSOLVUS – HYPERSOLVUS D'UNE SUITE GRANITIQUE

Faten Bechiri-Benmerzoug* et Abla Azzouni-Sekkal**

RÉSUMÉ :

Le complexe granitique du Tin-Erit appartient à la suite Taourirt localisée dans le Hoggar occidental. Il se situe à la limite entre le " terrane " d'Iskel et celui d'In-Tedeïni. Ce massif est constitué par l'emboîtement de deux unités granitiques ; le granite central à deux feldspaths séparés (subsolvus) et le granite de la couronne à mésoperthite (hypersolvus).

L'étude géochimique a montré que le Tin-Erit est à caractère métalumineux, avec une couronne alcaline et un centre sub-alcalin potassique. Les corrélations oxydes/silice, Ba/Sr, Sr/Rb et REE militent en faveur d'une cristallisation fractionnée contrôlée par les feldspaths et les ferromagnésiens. Le Tin-Erit présente les caractères des granites de type A. Il se distingue des autres massifs granitiques Taourirt par une faible teneur en Rb et une évolution subsolvus → hypersolvus. La modélisation de la cristallisation fractionnée confirme l'hypothèse selon laquelle les deux familles de granites sont cogénitiques. Le Tin-Erit constitue avec les autres massifs "du fossé Pharusien", une suite magmatique qui se met en place au Cambrien supérieur. Ces massifs accompagnent les dernières déformations et scellent l'orogénèse Pan-africaine.

Mots clés : Hoggar - Granite - Structures concentriques - Subsolvus-hypersolvus - Cristallisation fractionnée - Modélisation géochimique.

THE PAN-AFRICAN ANNULAR COMPLEX OF TIN-ERIT: AN EXAMPLE OF SUBSOLVUS –HYPERSOLVUS EVOLUTION FROM THE GRANITIC SUITE

ABSTRACT:

The Tin-Erit granitic complex belongs to the Taourirt series located in the western Hoggar. It is situated at the limit between the Iskel and the In Tedeïni "terrane". This granitic massif is formed by an interacting of two granitic units; the central granite with two separated feldspars (subsolvus), and the ring with a mesoperthite granite (hypersolvus).

*Laboratoire de géologie, département de biologie, *Ecole Normale Supérieure, Vieux Kouba, Alger.*

**Laboratoire de pétrographie, Institut des Sciences de la Terre,
USTHB BP 32 El Alia 16111 Bab Ezzouar Alger.

- *Manuscrit déposé le 08 Avril 2000, accepté après révision le 11 Décembre 2000.*

The geochemical study showed that the Tin-Erit has a metaluminous character with an alkaline ring and a potassic sub-alkaline center. The correlation between Oxides/Silica, Ba/Sr, Sr/Rb and REE confirms a fractional crystallization process controlled by feldspars and ferromagnesian. The Tin-Erit presents an A-type granite character. It is a low Rb content and an evolution from subsolvus to hypersolvus distinguish it from the other Taourirt massifs. The fractional crystallization modeling reinforces consanguinity of the two granites families. The Tin-Erit and the other granites of the "Pharusian trench" form a magmatic serie taking place in the upper Cambrian. These granitic massifs go along with the last deformation and seal the Pan-African orogeny.

Key Words: Hoggar - Granite - Ring structures - Subsolvus-hypersolvus - Fractional crystallization - Geochemical modeling.

I - INTRODUCTION

Les granites post-tectoniques à structures circulaires affleurant dans le rameau occidental du fossé Pharusien (Hoggar) forment une province magmatique appelée la suite "Taourirt" (Boissonnas, 1973; Azzouni-Sekkal, 1989; Azzouni-Sekkal et Bonin, 1998). Ces complexes plutoniques occupent "les terranes" d'Iskel, d'In Tedeïni et certains d'entre eux sont sur la limite séparant ces deux "terrane" (fig. 1). La mise en place de la suite "Taourirt" marque la fin du dernier épisode orogénique Pan-africain à 650-570 Ma et la transition vers le début de la cratonisation de la région (Azzouni-Sekkal et Boissonnas, 1993). Les massifs intrusifs de la suite "Taourirt" sont des granites de types A (Azzouni-Sekkal, 1989) caractérisés par des structures concentriques emboîtées à évolution centrifuge ou centripète (Boissonnas, 1973).

La classification des granites "Taourirt" établie par Azzouni-Sekkal et Boissonnas (1993) met en évidence trois groupes de granites :

- Le groupe GI \Rightarrow Des monzogranites peu évolués.
- Le groupe GIIa \Rightarrow Des monzogranites et des syéno-granites évolués.
- GIIb \Rightarrow Granites à feldspaths alcalins et alaskites.
- Le groupe GIII \Rightarrow Des granites et syénites hypersolvus.

Ces groupes sont inégalement répartis dans les complexes étudiés et représentent une lignée

évolutive alcali-calcique GI \rightarrow GIIa \rightarrow GIIb. Le groupe GIII forme la lignée alcaline (Azzouni-Sekkal et Boissonnas, 1993; Bonin *et al.*, 1998).

Le complexe plutonique du Tin-Erit est particulier par rapport aux autres massifs étudiés (Bechiri-Benmerzoug, 1998). Sa singularité réside, dans sa faible teneur en rubidium et le fait que les deux lignées évolutives décrites dans les Taourirts sont peut être cogénitiques.

II - STRUCTURE DU COMPLEXE DU TIN-ERIT

Le massif du Tin-Erit est localisé à la limite séparant le "terrane" d'Iskel à l'est et celui d'In Tedeïni à l'ouest (fig. 1). Son grand axe, orienté NNO-SSE, s'allonge sur 19Km. Le Tin-Erit intrude les formations du Pharusien I.

La cartographie détaillée (fig. 2) du massif montre une structure plus au moins concentrique, typique des complexes annulaires post orogéniques. Ce massif est constitué par l'emboîtement de deux unités : une unité périphérique représentée par les grands reliefs de l'adras Tin-Erit et l'adras Tin-Echechen essentiellement composés d'un granite grossier de couleur rosâtre ou beige, avec de rares taches noires. Ces grands reliefs forment une demi-couronne entourant une plaine centrale occupée par la deuxième unité. Cette dernière est largement recouverte par le reg où seuls quelques affleurements épars et discontinus émergent sous

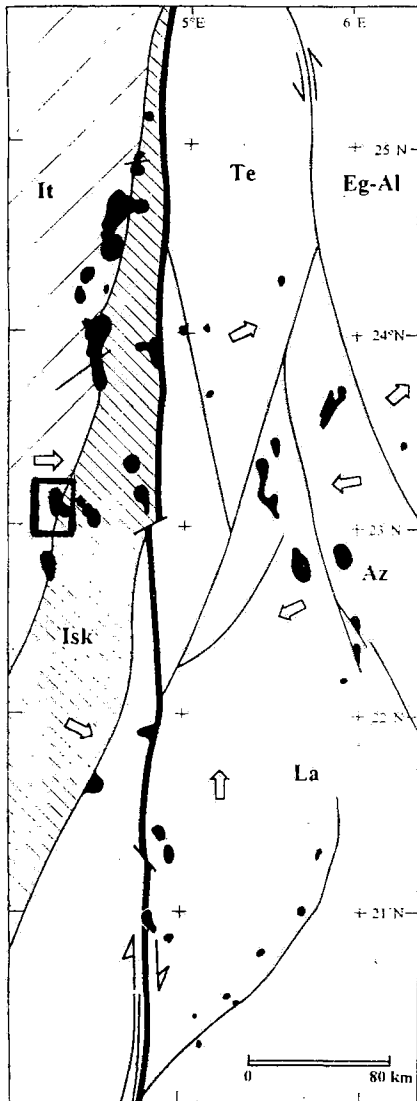


Fig. 1 - Cadre géodynamique de la suite Taourirt du Hoggar central (in Azzouni Sekkal et Bonin, 1998) modifiée)

Geodynamic setting of the Taourirt series in the central Hoggar (in Azzouni Sekkal and Bonin, 1998) modified

Complexes Taourirt (en noir). Terrains déplacés en figures divers (Taourirt complex (in black). Displaced terranes in different figures) It In -Tedeini : grauwacke dans le faciès des schistes verts, roches volcaniques et cataclastiques et granitoïdes calcoalcalins (650-550Ma) (Tedeini grauwacke in the facies of the green schist's, cataclastics and volcanic rocks and calc-alkaline granitoids (650-550Ma)); Isk -Iskel : roches sédimentaires de plate-forme dans le faciès des schistes verts, sills mafiques et ultramafiques, granitoïdes calcoalcalin (870Ma), granite et syénite potassiques (840Ma) et séquences volcanoclastiques (The sedimentary rocks platform of the green schist's facies, maficultra mafic sills, calco-alkaline granitoids (870Ma), granite and potassic syenite (840Ma), and volcanoclastic sequences); La - Laouni : gneiss dans le faciès des amphibolites (gneiss in the amphibolites facies); Te - Tefedest : socle gneissique dans le faciès des amphibolites et granitoïdes calcoalcalins (gneissic socle in the amphibolite facies and calc-alkaline granitoids); Eg - Al - Egere - Aleksod : gneiss granulitiques archéens et éburnéens. Séquences supracrustales, gneiss panafricain dans le faciès des amphibolites avec eclogite (archean and eburean granulitic gneiss, upper crustal sequences, panafrican gneiss in the amphibolite facies with eclogite); Az : Azrou-n-Fad : Semblable au terrane Eg-Al (similar to Eg-Al terrane).

□ Le Tin Erit (The Tin Erit)

forme de dalles à enclaves ou bien en dômes sculptés par l'érosion éolienne donnant de beaux taffonis. La cassure fraîche montre un beau granite porphyroïde peu grossier de couleur rose, moucheté. Il est parcouru par un réseau filonien dense dont le plus important occupe la zone orientale du massif, d'orientation E-O au sud devenant N-S à l'est. Ces filons sont courbes, de taille et nature différentes (alaskites, granodiorites, syénites ...etc.). Ce granite central renferme également des enclaves de nature et taille variables allant de quelques centimètres à des centaines de mètres (frag-

ments de socle, enclaves acides microgrenues, enclaves grenues intermédiaires à basiques, enclaves basiques à ultrabasiques) (Bechiri-Benmerzoug, 1998).

III- PÉTROGRAPHIE ET COMPOSITION CHIMIQUE DES MINÉRAUX

Les analyses des minéraux ont été déterminées à la microsonde électronique (Tension d'accélération 15kv, Intensité du courant 12nA, Temps de comptage 10s, Faisceau électronique

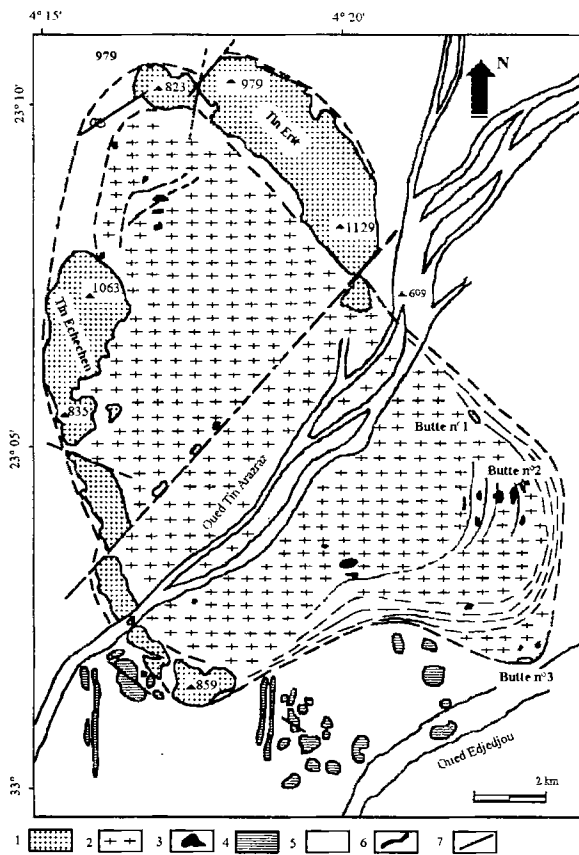


Fig. 2 - Carte géologique du complexe granitique de Tin-Erit

Geological map of the Tin-Erit plutonic complex

1 - Granite de la couronne (*crown granite*); 2 - Granite du centre (*center granite*); 3 - Enclaves basiques-ultrabasiques (*the center granite's basic-ultrabasic enclave*); 4 - complexe basique et ultrabasiques d'Edjedjou (*basic-ultrabasic's complex of the Edjedjou*); 5 - encaissant (*country rocks*); 6 - réseau filonien (*vein network*); 7 - Faille (*fault*).

focalisé à 2mm) de Jussieu (Camparis, Paris 6-7), complétées par de nouvelles analyses faites à l'université de Paris-Sud à Orsay (Tension d'accélération 15kv, Intensité du courant 5.8nA, Temps de comptage 40s, Faisceau électrique focalisé à 2mm) (tableaux I, II et III).

Le granite de la couronne est de type hypersolvus à mésoperthite. Il montre une texture porphyroïde à grain grossier avec de

grandes plages de mésoperthite (40 à 68%) souvent entourées par une frange d'albite secondaire et de microcline. Le quartz est précoce (24 à 44%), globuleux et inclut des sections automorphes de zircon. Le plagioclase (10 à 12%) montre un pourcentage en anorthite égal à 15% en moyenne. Les ferromagnésiens sont rares (< à 4%) et représentés par l'amphibole et la biotite. Le zircon (0.02 à 0.41%), l'allanite (0 à 0.48%), l'apatite (0 à 0.07%), le sphène (0 à 0.09%) et les oxydes opaques (0 à 1.38%) sont les phases accessoires.

L'amphibole a la composition d'une ferroédénite ou d'une hastingsite (fig. 3). Nous remarquons que les rapports Mg/Mg + Fe varient de 0.02 à 0.03 ce qui corrobore les résultats obtenus sur les amphiboles de l'unité hyperalcaline périphérique du Tioueïne où les amphiboles sont très ferrifères (Azzouni-Sekkal, 1995).

La biotite montre des valeurs élevées en fer (34.71 à 37.6%) et en titane (3.68 à 6.06%). Le rapport Fe/Fe+Mg est compris entre 0.97 et 0.99, ce qui la rapproche du pôle annite (fig. 4) comme les biotites du filon de syénite du massif du Tioueïne (Azzouni-Sekkal et Boissonnas, 1987; Azzouni-Sekkal, 1989). En effet, tous les minéraux ferromagnésiens sont très riches en fer dans les magmas alcalins et hyperalcalins.

La mésoperthite montre des teneurs en orthose variant entre 96 et 97%, quant au plagioclase ($An_{2.7}$ à An_0), il a la composition d'une albite.

Le granite central montre une texture grenue porphyroïde à grain moyen avec l'association minéralogique suivante : quartz (22 à 34%), feldspath alcalin (perthite, orthose perthitique et microcline, 55%), plagioclase (albite-oligoclase, 24 à 32%), amphibole (6%) et biotite (4%). Les minéraux accessoires sont représentés par le zircon (0.06 à 0.89%), l'apatite (traces), l'allanite (0.2 à 0.8%) et les oxydes opaques (0.53 à 4.51%). La muscovite, la chlorite et l'albite sont secondaires.

LE COMPLEXE ANNULAIRE PANAFRICAIN DU TIN ERIT : UN EXEMPLE D'ÉVOLUTION SUBSOLVUS – HYPERSOLVUS

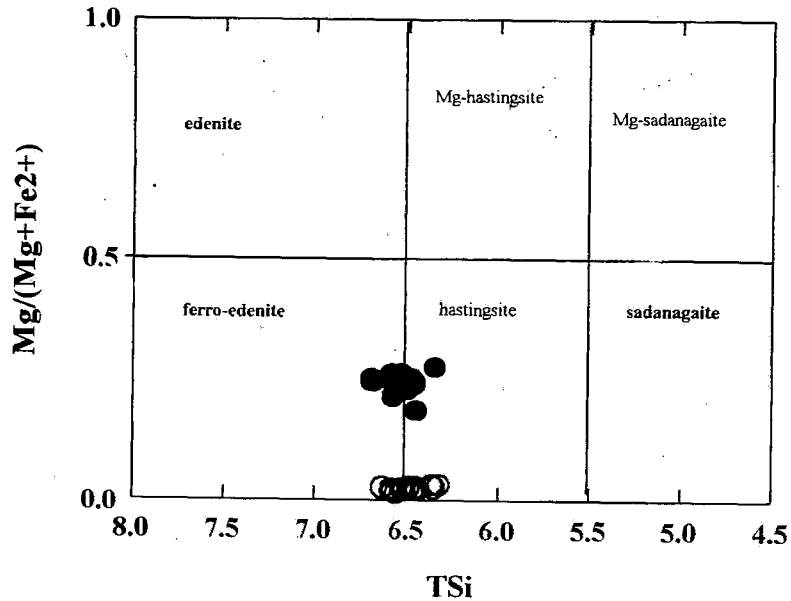


Fig. 3 - Diagramme Mg/(Mg+Fe)/Si [(Na+K)A>0.5; Ti<0.5; Fe3>AlVI] des amphiboles du massif du Tin-Erit (rond plein: granite central; rond vide, granite de la couronne; Leake *et al.*, 1997)

Mg/(Mg+Fe)/Si [(Na+K)>0.5 ; TI <0.5 et Fe3>Al^{VI}] diagram for the Tin-Erit's amphiboles complex (full circle : central granite, empty circle : granite of the crown, Leake and al., 1997)

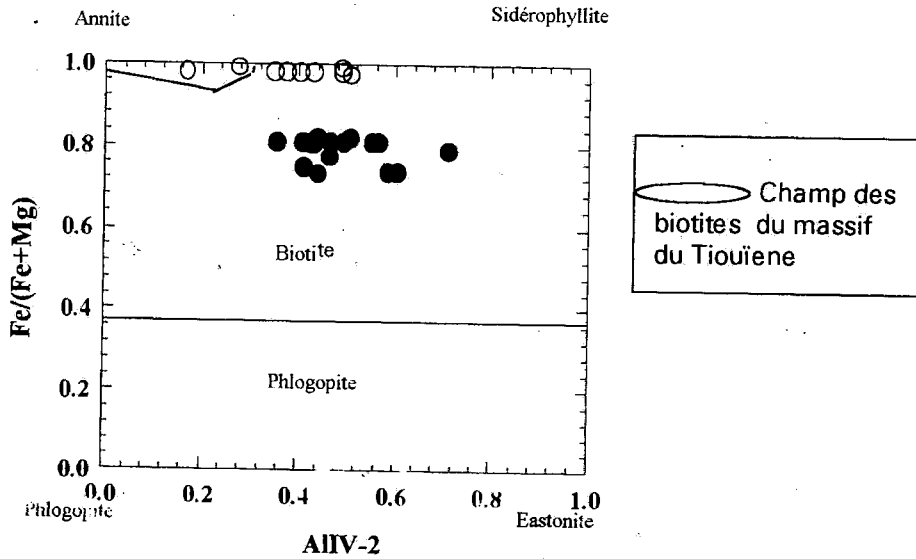


Fig. 4 - Diagramme Fe/Fe+Mg versus AIVI-2 des biotites du Tin-Erit (Deer *et al.*, 1966) même légende que figure 3
Fe/Fe+Mg versus Al^{IV}-2 diagram of the Tin-Erit's granites. (Deer and al., 1966) same legend of figure 3

L'amphibole a la composition d'une ferro-édénite ou d'une hastingsite avec un rapport $Mg/Mg + Fe$ compris entre 0.22 et 0.25 (fig. 3). La biotite du granite central se caractérise par des valeurs légèrement élevées en fer et en titane et faibles en silice et en aluminium (Ti dans le site tétraédrique). Elle occupe le champ des biotites (fig. 4) avec un rapport $Fe/Fe+Mg$ pratiquement stable (0.79 à 0.82).

De petites sections de zircon et d'apatite sont fréquemment englobées dans la biotite qui, parfois, s'altère en chlorite.

IV- Thermobarométrie

Le géothermobaromètre d'Anderson et Smith (1995), calibré pour les amphiboles à teneurs élevées en Fe^{3+} , a l'avantage de donner, en plus de T et P, des indications sur la fugacité de l'oxygène. L'amphibole des deux granites (central et couronne) aurait cristallisé à des températures comprises entre 600°C et 750°C. Quant à la pression, elle est comprise entre 3.5 et 5kbar pour le centre et comprise entre 3 et 4.5kbar pour la couronne. La fO_2 est faible.

Le géothermomètre de Blundy et Holland (1990) a été utilisé pour le granite du centre où coexistent plagioclase et amphibole dans la même roche.

Nous avons obtenu des températures de l'ordre de 750°C pour une pression moyenne de 4kbar.

La température de cristallisation de la biotite a été calculée d'après la méthode de Wones et Eugster (1965). Pour le granite central les températures sont de l'ordre de 775°C ($fO_2 = 10^{-15}$ à 10^{-16}). Quant au granite de la couronne, il donne des températures, plus faibles, d'environ 450°C ($fO_2 = 10^{-17}$ à 10^{-19}).

En tenant compte de la pression, la chambre magmatique peut être estimée à 15km de profondeur.

V- Géochimie

Les roches totales ont été analysées par fluorescence X au C.R.P.G de Nancy (France) et par absorption atomique au laboratoire de pétrologie-volcanologie d'Orsay (Paris-Sud).

Les analyses d'éléments majeurs et en trace sont données dans le tableau IV.

Le calcul de l'indice de différenciation ID montre que le granite de la couronne est plus différencié ($92 < ID < 96$) que celui du centre ($85 < ID < 90$). Les roches de la couronne sont à caractère alcalin, celles du centre sont sub-alcalines potassiques et toutes sont métalu-mineuses (fig. 5).

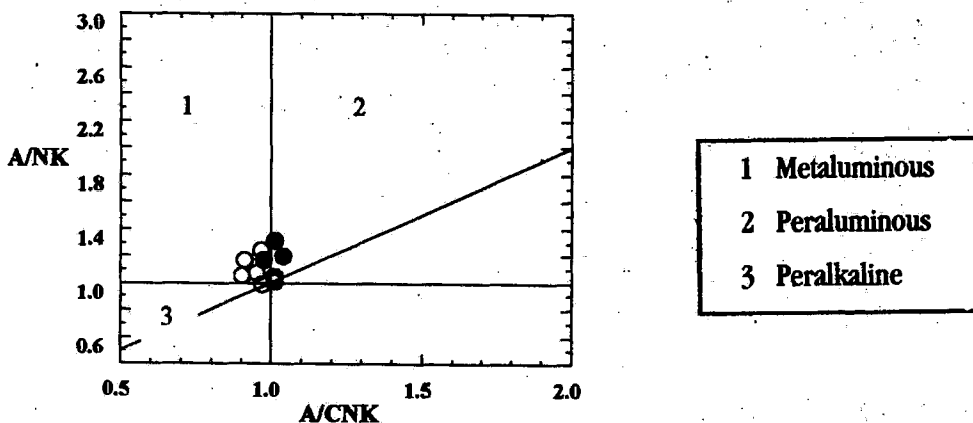


Fig. 5 - Diagramme $(A/NK)/(A/CNK)$ pour les granites du Tin-Erit (Maniar et Piccoli, 1989).
 $(A/NK)/(A/CNK)$ diagram of the Tin-Erit's granites (Maniar and Piccoli, 1989).

Sur les diagrammes binaires oxydes/silice (fig. 6), Ba/Sr et Sr/Rb (fig. 7a et 7b) les corrélations sont linéaires, ce qui plaide en faveur d'une évolution par cristallisation fractionnée contrôlée par les feldspaths, les deux granites étant peut être cogénétiques ?. Cependant, les teneurs en K₂O sont identiques pour les deux types de granites et relativement constantes, les feldspaths ayant subis une microclinisation importante. L'enrichissement en Na₂O dans le granite de la couronne exprime la forte albitisation de ses feldspaths. Nous constatons que le Tin-Erit présente des valeurs anormalement faibles en Rb (il varie en effet de 46 à 72 ppm pour le granite central et de 62 à 101 ppm pour le granite de la couronne) comparativement aux autres granites "Taourirts", qui montrent des teneurs nettement plus élevées. Elles sont de l'ordre de 250 ppm en moyenne pour le groupe GIIa, auquel se raccorde le granite du centre, et de 190 ppm pour le groupe GIII auquel se rattache le granite de la couronne. Cette anomalie reste pour le moment inexpliquée.

Les spectres des terres rares présentent un fort enrichissement en LREE par rapport aux chondrites (C1) pour les deux granites. *Le granite central* ($\Sigma\text{REE} = 301 \text{ à } 592 \text{ ppm}$) montre un beau fractionnement (le rapport $(\text{La}/\text{Yb})_n \approx 27$) des LREE (300 à 600 x les chondrites) (fig. 8a) avec une anomalie négative en Eu (fractionnement des feldspaths). Les HREE sont moins enrichis et moins fractionnés (10 à 20 x les chondrites). *Le granite de la couronne* ($\Sigma\text{REE} = 96 \text{ à } 388.57 \text{ ppm}$) est moins fractionné $(\text{La}/\text{Yb})_n \approx 14$ et en général moins enrichi en LREE que le granite central (100 à 400 x les chondrites), l'anomalie négative en Eu est plus forte par contre le comportement des HREE est presque identique (fig. 8). Les spectres de terres rares du granite de la couronne (GIII) sont semblables aux granites GIII de la suite "Taourirt", ceux du granite central (GIIa) sont plus riches en LREE et plus pauvres en HREE que les GIIa de cette même suite.

Dans les diagrammes de classifications (Maniar et Piccoli, 1989; Eby, 1992; Pearce *et al.*, 1984; Whalen *et al.*, 1987), le Tin-Erit montre les caractères des granites de type A, post-orogéniques et intraplaques (fig. 9-12).

VI- Discussion - conclusion

Les caractères structuraux, minéralogiques et géochimiques, en particulier les terres rares et les éléments en traces, du complexe du Tin-Erit sont en faveur d'une évolution par cristallisation fractionnée, contrôlée essentiellement par le feldspath alcalin (anomalie négative en Eu et $\text{Eu}/\text{Eu}^* < 1$). Les minéraux accessoires, riches en terres rares, tels que l'allanite et le sphène jouent un rôle non négligeable dans l'évolution du magma (fig. 13), c'est le cas de tous les granites "Taourirt" (Azzouni-Sekkal et Bonin, 1998).

Le Tin-Erit est caractérisé par une structure concentrique à évolution centrifuge, le granite central (le moins différencié) serait le premier à se mettre en place suivi par le granite de la couronne et les filons courbes (plus différenciés).

Le granite central est de type subsolvus à deux feldspaths séparés et se rattache au groupe GIIa. Il se distingue des autres faciès appartenant au groupe GIIa de la suite "Taourirt" (*cf.* Bechiri-Benmerzoug, 1998) par l'enrichissement des LREE et l'appauvrissement des HREE ainsi qu'une faible anomalie négative en Eu. Ceci va dans le sens d'une faible évolution de ce granite. Le granite de la couronne est de type hypersolvus à mésoperthite et appartient au groupe GIII. Il montre un caractère plus évolué que les granites et syénites du Tiouéïne appartenant au même groupe.

La province magmatique "Taourirt" est représentée par deux séries magmatiques, la plus importante est d'affinité alcali-calcique, représentée par de rares gabbros et diorites et surtout

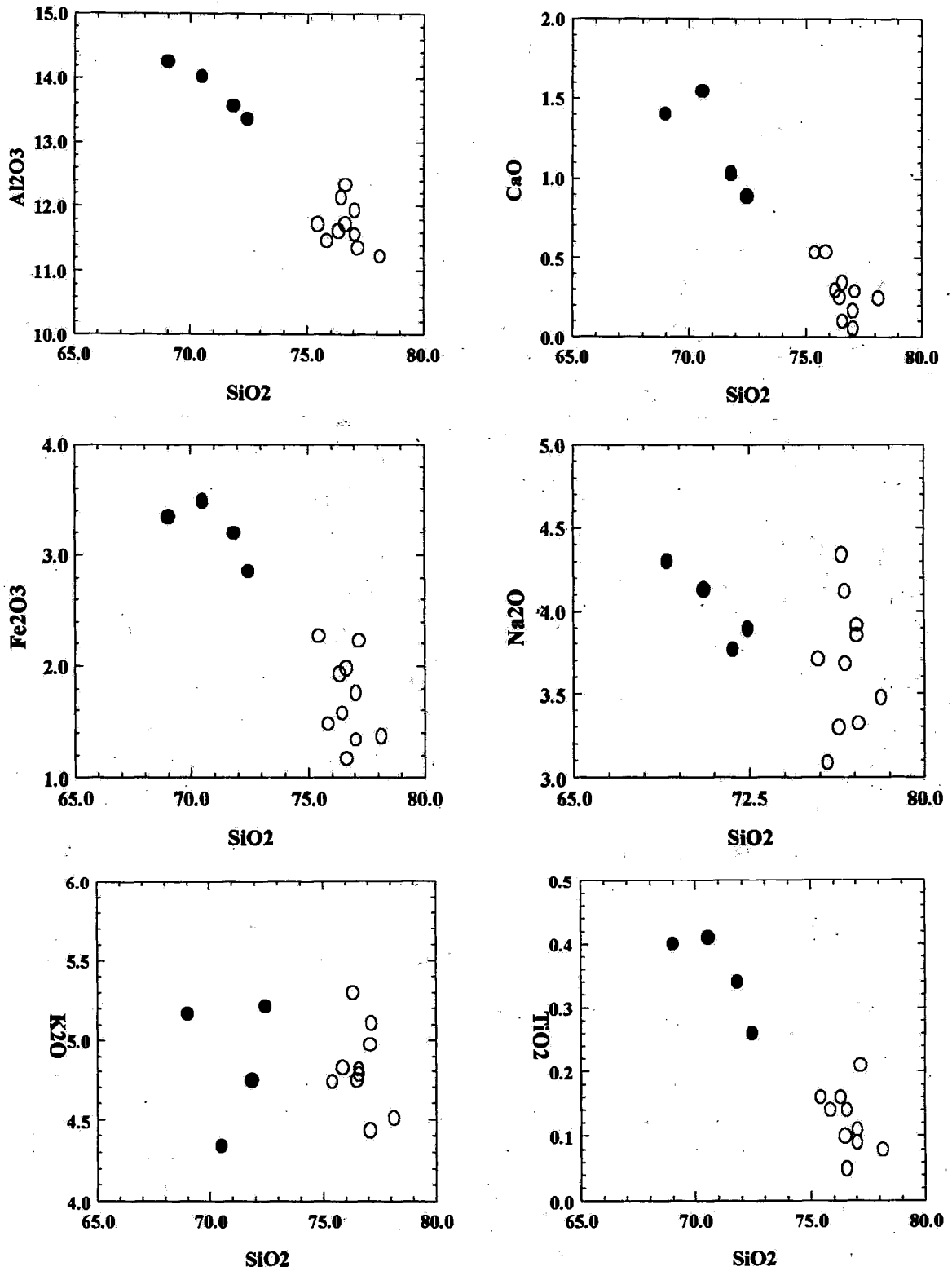


Fig. 6 - Diagrammes de Harker pour les granites du Tin-Erit

Harker's diagram for the Tin-Erit's granites

LE COMPLEXE ANNULAIRE PANAFRICAIN DU TIN ERIT : UN EXEMPLE D'ÉVOLUTION SUBSOLVUS – HYPERSOLVUS

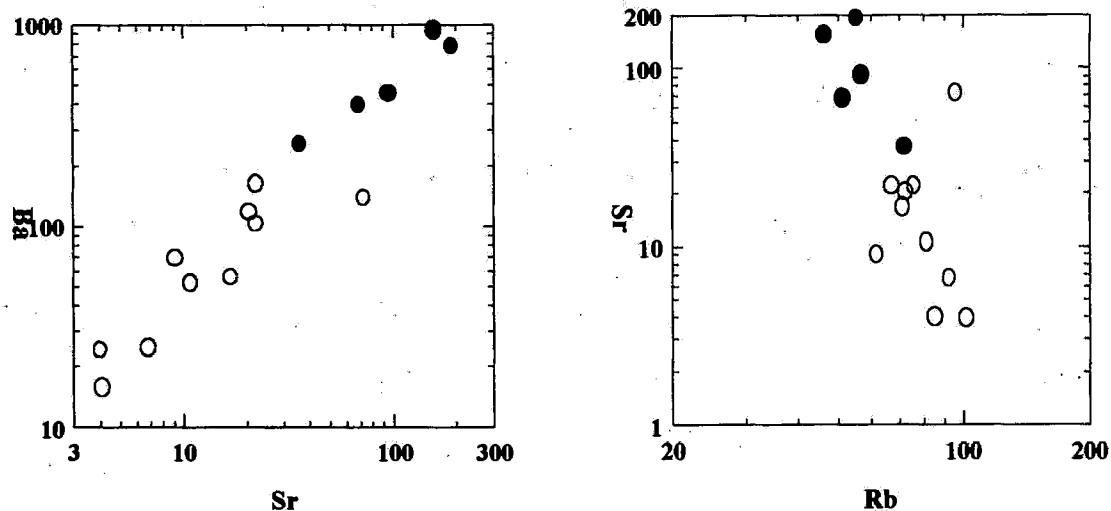


Fig. 7 - Diagrammes logarithmiques Ba/Sr (a) et Sr/Rb (b) pour les granites du Tin-Erit.

Ba/Sr (a) Sr/Rb (b) logarithmic diagrams for the Tin-Erit's granites

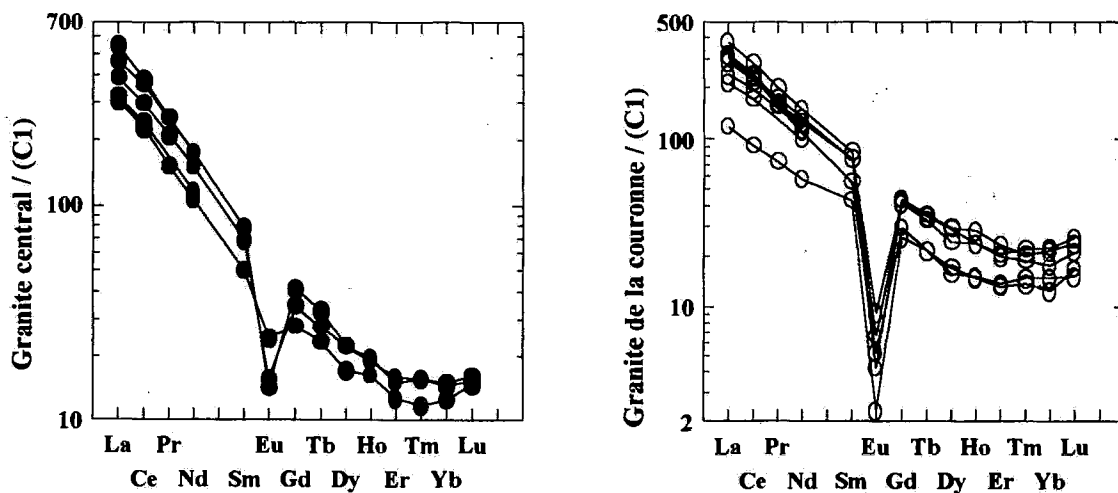


Fig. 8 - Spectres des terres rares normalisées aux chondrites (C1) pour les granites du Tin-Erit.

REE patterns normalized to the chondrite (C1) for the Tin-Erit's granites.

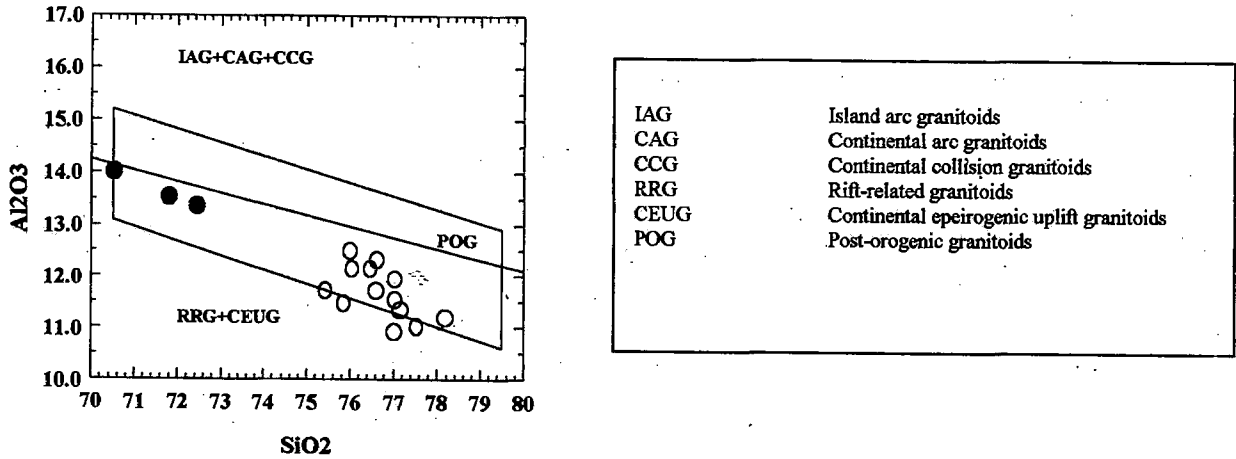


Fig. 9 - Diagramme Al_2O_3/SiO_2 pour le Tin-Erit, (•) granite central, (o) granite de la couronne
 Al_2O_3/SiO_2 diagram for the Tin-Erit's granites, (•) center granite, (o) crown granite

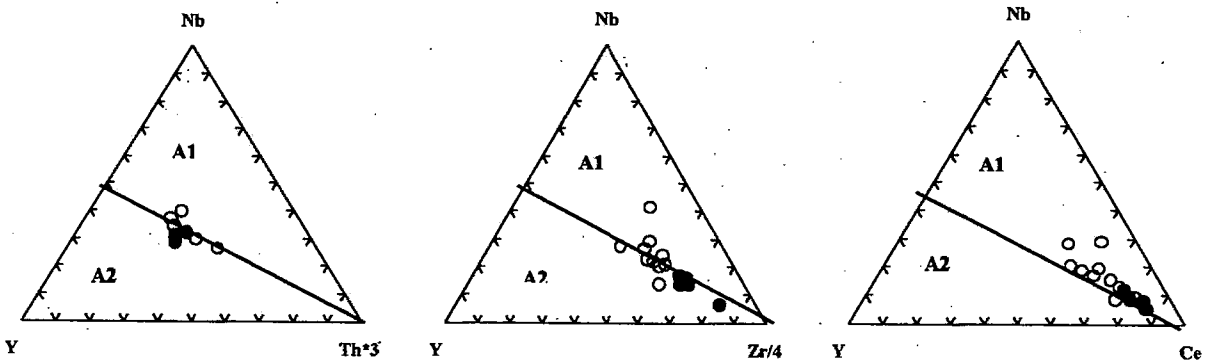


Fig. 10 - Diagrammes discriminants de Eby (1992)
 Eby's discrimination diagrams (1992)

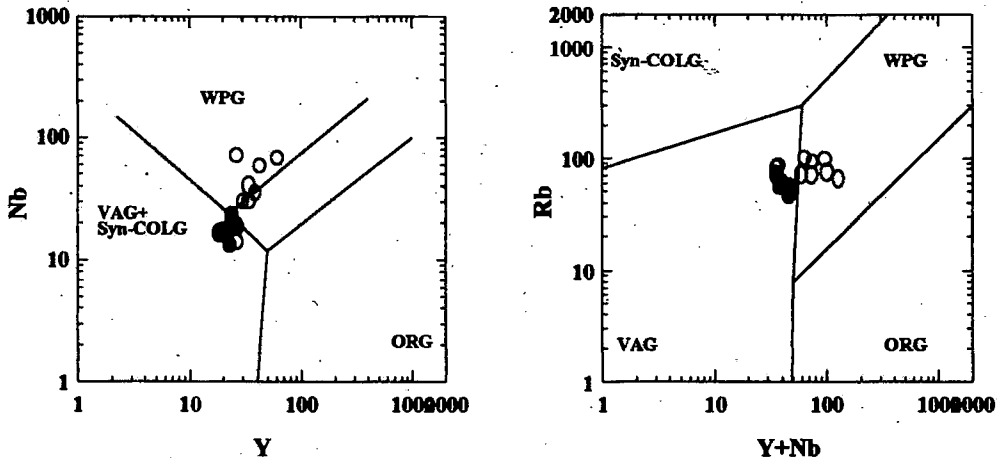


Fig. 11 - Diagrammes $Rb/Y+Nb$ (a) et Nb/Y (b) pour le Tin-Erit (Pearce *et al.*, 1984)
 $Rb/Y+Nb$ (a) and Nb/Y (b) diagrams for the Tin-Erit's granites (Pearce and al., 1984)

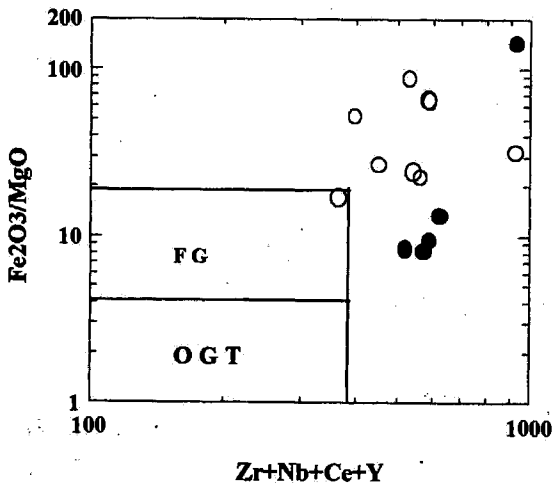


Fig. 12 - Diagramme $(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO})/\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$
(Whalen *et al.*, 1987)

*(Fe₂O₃/MgO)/Zr+Nb+Ce+Y diagram for the
Tin-Erit's granites (Whalen and al, 1987)*

des monzogranites, syénites et granites à feldspaths alcalins. La deuxième série est représentée par de très rares roches ultrabasiques (cortlandites) et basiques (gabbros) (Bechiri, travaux en cours) des syénites et granites hypersolvus, d'affinité alcaline à hyperalcaline. Les deux séries peuvent exister dans un même massif et indiquer une même origine (Azzouni *et al.*, 1999), c'est le cas du Tin-Erit.

Le modèle pétrogénétique de la suite "Taourirt" suggère que le liquide granitique résiduel dérive d'une chambre magmatique crustale à partir d'un magma intermédiaire par le fractionnement des phases anhydres (plagioclase) et hydratées (la biotite pour la série alcali-calcique et l'amphibole pour la série alcaline). Le magma parent serait d'origine mixte entre le manteau primitif et la croûte inférieure (Azzouni *et al.*, 1999; Belaïdi-Zinet, 1999).

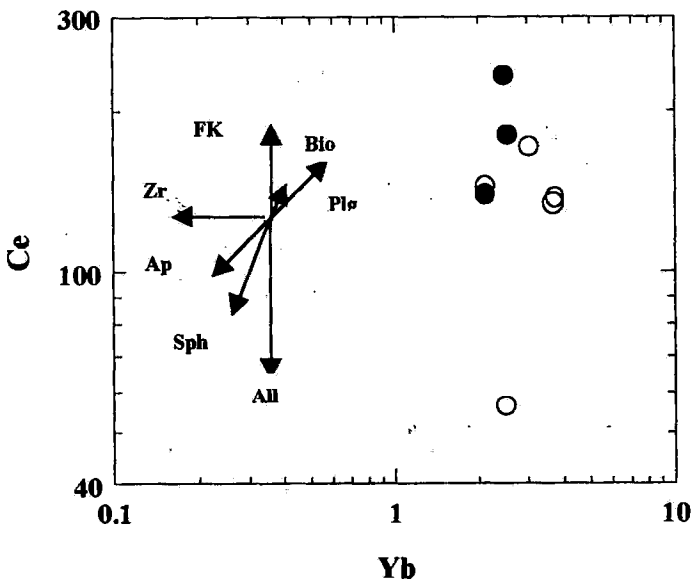


Fig. 13 - Diagramme logarithmique Ce/Yb
pour les granites du Tin-Erit

*Ce/Yb logarithmic diagram
for the Tin-Erit's granites*

L'étude de géochimie isotopique faite sur trois complexes Teg'Orak, Tesnou et Aït Oklan a révélé que les valeurs obtenues pour Sri (0.703 à 0.706) et ϵ_{Nd} (-1.4 à -9.7 à 525 Ma) excluent une participation significative d'une croûte continentale supérieure. Deux sources sont à l'origine de ces complexes, le manteau appauvri, le manteau enrichi type EMI et la croûte continentale inférieure (Azzouni *et al.*, 1999).

Le modèle pétrogénétique que nous proposons pour le Tin-Erit suggère que le granite central et le granite de la couronne sont cogénétiques. Le magma parent serait de nature syénitique issu de la différenciation d'un magma d'origine mixte (manteau primitif et croûte inférieure). Pour la quantification du modèle de cristallisation fractionnée (Tableau V) nous avons utilisé le logiciel "Genesis de Léo R. Teixeira, 1996" pour les éléments majeurs. L'échantillon TE42 a été choisi pour représenter le magma initial ($\text{SiO}_2 = 70.52\%$). La première étape fait intervenir l'amphibole (24.5%), le plagioclase (70.57%),

le FK (3.03%) et le mica (1.91%) avec un taux de cristallisation de 13.99 % et une somme des carrés des résidus de 0.577. Le liquide résiduel correspond à l'échantillon TE17. Dans la deuxième étape nous passons du granite central à celui de la couronne. L'amphibole intervient avec 10.4%, la biotite (2.19%), le FK (41.53%), le plagioclase (45.84%) et le taux de cristallisation passe à 23.6%. La somme des carrés des résidus est de 0.187. Le liquide résiduel correspond à l'échantillon TE1. A la troisième étape, les ferromagnésiens disparaissent et le FK devient prépondérant (63.95%) avec le plagioclase (36.05%). On arrive à l'échantillon le plus évolué TE 52 ($\text{SiO}_2 = 77.05\%$) avec un taux de cristallisation égal à 8.15%.

Partant des données du tableau V, nous avons essayé de modéliser la cristallisation fractionnée par les terres rares. La modélisation se complique par la présence de minéraux accessoires très riches en terres rares comme l'allanite, le sphène, le zircon, qui perturbent les terres rares. En tenant compte de ces minéraux, nous obtenons des spectres de terres rares comparables pour les terres rares légères et intermédiaires tandis que les terres rares lourdes sont plus ou moins perturbées selon les étapes (fig. 14). En fait, la cristallisation fractionnée est faussée par la présence de fluides hydrothermaux, très abondants dans ce type de magma, qui maintiennent les terres rares lourdes dans des complexes fluorés. L'évolution des complexes granitiques annulaires de la suite "Taourirt" serait donc contrôlée, en grande partie, par un processus de cristallisation fractionnée (Azzouni et Boissonnas, 1993; Azzouni, 1995; Belaïdi-Zinet, 1999).

Les filons d'alaskites qui affleurent dans le Tin Erit seraient le résultat de la cristallisation du dernier liquide. L'évolution serait donc

centrifuge. Les inconvénients majeurs de ce modèle sont les suivants: comment un granite subsolvus riche en eau peut-il donner un magma de type hypersolvus relativement sec, où est passée l'eau ? Y a-t-il eu refusion ? Est-ce le résultat de "l'effet amphibole" (Bardintzeff et Bonin, 1987). En effet, la précipitation de l'amphibole provoque la sursaturation du magma en silice et l'appauvrissement en eau. Boissonnas (1973) propose "un assèchement brusque du magma résiduel par départ de l'eau dans les fissures". En ce qui nous concerne, nous optons pour la précipitation des amphiboles. En effet, ce minéral abondant dans le granite central devient très rare voire absent dans le granite de la couronne.

La mise en place du Tin-Erit dans le socle gneissique s'est faite de façon passive (pas de métamorphisme de contact observé) par subsidence souterraine.

Le complexe du Tin-Erit reste un massif très particulier de la suite "Taourirt" par l'association pétrographique (présence de roches ultra basiques en enclaves, essaim de filons circulaires dans la partie sud-est du massif) annonçant la fissuration annulaire que l'on retrouve uniquement dans le complexe du Tioueïne, le seul avec le Tin-Erit à présenter les deux séries (alcali-calcique et alcaline). Une autre particularité de ce massif est la très faible teneur en Rb des ses roches.

Remerciements. Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'accord programme 94 MDU 4282 en collaboration avec le Professeur B. Bonin de l'université de Paris-Sud (Orsay) que nous remercions vivement pour l'apport matériel et scientifique. Nous remercions également M. Megartsi et M. Bechiri pour leur aide et remarques sur le terrain, le personnel de l'O.R.G.M en particulier M. Bitam, M. Briedj et M. Hamis pour les moyens mis à notre disposition sur le terrain. Nous remercions les professeurs J.R. Kienast et J. Hernandez pour les critiques constructives de la première version du manuscrit.

LE COMPLEXE ANNULAIRE PANAFRICAIN DU TIN ERIT : UN EXEMPLE D'ÉVOLUTION SUBSOLVUS – HYPERSOLVUS

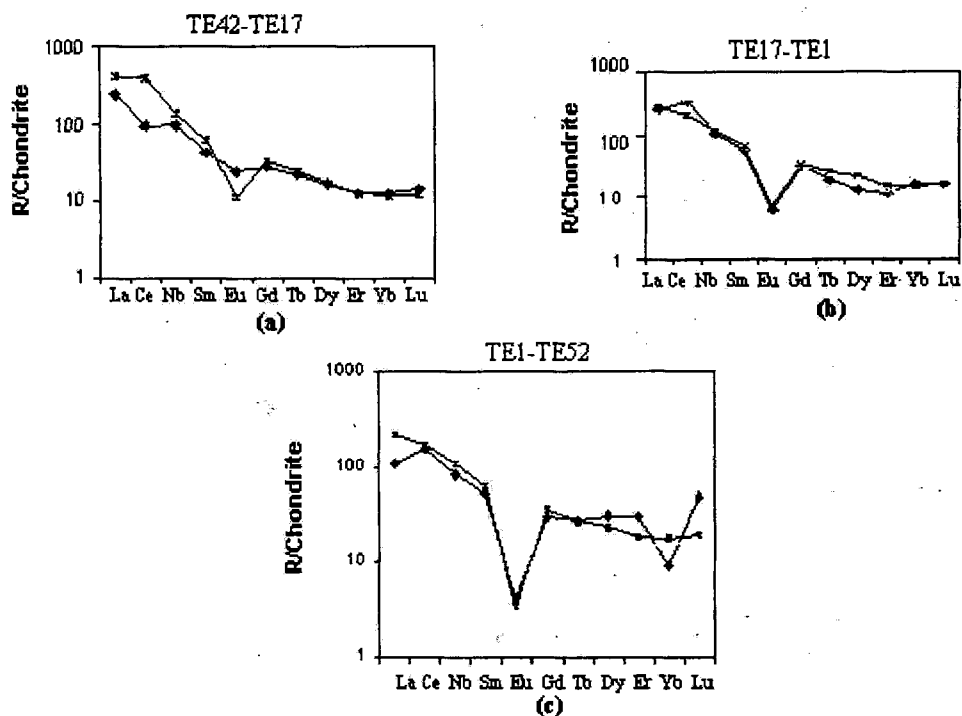


Fig. 14 - Diagrammes de distribution des teneurs en terres rares calculées selon le modèle de cristallisation fractionnée pour les trois stades.

Distribution diagrams of rare earths calculated according to fractional crystallization for the three stages.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON, J.L. ET SMITH, D.R., 1995. The effect of temperature and fO_2 on the Al-Hornblende barometer. *Amer. Mineral.*, 80, 549-559.
- AZZOUNI-SEKKAL, A., 1989. Pétrologie et géochimie des granites de type "Taourirt" : un exemple de province magmatique de transition entre les régimes orogéniques et anorogéniques, au Pan-africain (Hoggar, Algérie). *Thèse Doctorat d'Etat, Alger*, 667p. - *Mém. du SGA n° 7*, 1995, 269p.
- AZZOUNI-SEKKAL, A. ET BOISSONNAS, J., 1987. Geochemistry of the Tiouéine Pan-African granite complex (Hoggar, Algérie). *Geological Journal*, 22, 213-224.
- AZZOUNI-SEKKAL, A. ET BOISSONNAS, J., 1993. Une province magmatique de transition du calco-alcalin à l'alcalin : les granitoïdes Pan-Africains à structures annulaires de la chaîne pharusienne du Hoggar (Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 164, 4, 597-608.
- AZZOUNI-SEKKAL, A. ET BONIN, B., 1998. Les minéraux accessoires des granites de la suite "Taourirt" Hoggar (Algérie) : conséquences pétrogénétiques. *J. Afr. Earth Sci.*, 26, n°1, 1165-1187.
- AZZOUNI-SEKKAL, A., BONIN, B., LIÉGEAIS, J.P., BELAÏD-ZINET, S., FERRAG, S. ET KACIOULI, F., 1999. The Taourirt suite of Occidental Hoggar (Algeria) : evolution and structural settings at the very end of the Pan-African orogeny. The origin of granites and related rocks, *IVth symposium, Hutton, Clermont-Ferrand, France*, p. 125.

- BARDINTZEFF, J.M. ET BONIN, B., 1987.** The amphibole effect : a possible mechanism for triggering explosive eruption. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 33, 255-262.
- BECHIRI-BENMERZOUG, F., 1998.** Le complexe plutonique du Tin-Erit ; cartographie, pétrographie, géochimie et minéralogie (Fossé Pharusien, Hoggar occidental (Algérie)). *Thèse de magistère, USTHB, Alger, 142p.*
- BELAIDI-ZINET, S., 1999.** Géochimie et géochronologie des granites Pan-Africain «Post collision» de type A, éléments en traces et isotopes du Sr et Nd: l'exemple des complexes d'Aït-Oklan et Tesnou (Hoggar, Algérie). *Thèse de magistère, USTHB, Alger, 116p.*
- BLUNDY, J.D. ET HOLLAND, T.J., 1990.** Calcic amphibole equilibria and new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104, 208-224.
- BOISSONNAS, J., 1973.** Les granites à structures concentriques et quelques autres granites tardifs de la chaîne pan-africaine en Ahaggar (Sahara central, Algérie). *Paris, Mémoires hors série B.R.G.M, 2,C 662p. Orléans.*
- BONIN, B., AZZOUNI-SEKKAL, A., BUSSY, F., ET FERRAG, S., 1998.** Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granites magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings, *Lithos*, 45, 45-70.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. ET ZUSSMAN, J., 1966.** Rock-forming minerals. *Longmann, ed., London.*
- EBY, G. N., 1992.** Chemical subdivision of the A-type granitoids : petrogenesis and tectonic implication. *Geology*, 20, 641-644.
- LEAKE, B.E., WOOLLEY, A. R., BRICH, W. D., GILBERT, M. C., GRICE, M. D., HAWTHORNE, F. C., KATO, A., KISCH, H. J., KRIVOVICHEV, V. G., LINTHOUT, K., LAIRD, J. ET MANDARINO, J., 1997.** Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineral. mag.*, V. 61, p. 295-321.
- MANIAR, P.D., ET PICCOLI, P.M., 1989.** Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 10, 635-643.
- PEARCE, J.A., HARRIS, N.B.W. ET TINDLE, A.G., 1984.** Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation for granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- WHALEN, J.B., CURRIE, K.L. ET CHAPPEL, B.W., 1987.** A-type granites : geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95, 407-419.
- WONES ET EUGESTER, H.P., 1965.** Stability of biotite : experiment, theory and application. *Amer. Mineral.*, 50, 1228-1272.

Annexe
Tableaux des résultats d'analyses

Tableau I -
Analyses chimiques de quelques amphiboles du Tin-Erit
Election microprobe of some amphiboles from Tin Erit

Ech	Granite central		Granite de la couronne	
	TE 17	TE26	TE37	TE49
SiO2	41,93	40,88	40,38	40,34
TiO2	2,09	1,88	1,47	1,86
Al2O3	7,31	7,53	6,7	7,62
FeO	28,75	29,19	34,75	34,54
MnO	1,07	0,82	0,79	0,83
MgO	4,017	4,06	0,4	0,41
CaO	9,857	10,21	9,94	9,89
Na2O	2,169	2,01	2,26	1,96
K2O	0,937	1,02	1,05	1,21
Total	98,13	97,60	97,74	98,66

Tableau II -
Analyses chimiques de quelques biotites du Tin-Erit
Election microprobe of some biotites from Tin Erit

Ech	Granite central		Granite de la couronne	
	TE 26	TE 26	TE 49	TE 49
SiO2	34,31	34,89	33,24	33,29
TiO2	4,33	4,39	3,89	4,11
Al2O3	13,31	13,5	12,15	12,4
FeO	31,41	30,34	36,82	36,83
MnO	0,2	0,34	0,23	0,37
MgO	4,25	3,99	0,41	0,42
CaO	0,03	0,02	0	0,03
Na2O	0,04	0,06	0,02	0,09
K2O	8,79	9,11	8,69	8,76
Total	96,87	96,64	95,45	96,3

Tableau III -
Analyses chimiques de quelques feldspaths du Tin-Erit
Election microprobe of some feldspaths from Tin Erit

Ech	Granite central		Granite de la couronne	
	TE17	TE17	TE37	TE37
SiO2	67,38	65,29	68,02	64,32
TiO2	0	0,00	0,02	0,04
Al2O3	20,26	18,71	19,57	18,24
FeO	0,05	0	0,08	0,11
MnO	0	0,12	0	0
MgO	0	0	0,00	0,02
CaO	0,59	0,03	0,60	0
Na2O	11,62	0,29	11,61	0,35
K2O	0,20	16,89	0,12	15,62
Total	100,13	101,37	100,16	98,73

Formule structural (O = 23)

TSi	6,563	6,456	6,586	6,481
TAI	1,348	1,4	1,287	1,442
TFe3	0,089	0,144	0,127	0,077
Sum_T	8	8	8	8
CFe3	0,793	0,822	0,646	0,806
CTi	0,246	0,223	0,18	0,225
CMg	0,937	0,956	0,097	0,098
CFe2	2,882	2,89	3,968	3,759
CMn	0,142	0,11	0,109	0,113
BCa	1,653	1,728	1,737	1,702
BNa	0,347	0,272	0,263	0,298
ANa	0,311	0,343	0,452	0,313
AK	0,187	0,205	0,218	0,248
Sum_cat	15,499	15,548	15,67	15,561
Sum_ox	23	23	23	23

Formule structural (O = 22)

Si	5,505	5,572	5,583	5,543
AlIV	2,495	2,428	2,403	2,431
AlVI	0,02	0,111	0	0
Ti	0,523	0,527	0,491	0,515
Fe3	0	0	0	0
Fe2	4,215	4,052	5,172	5,128
Mn	0,027	0,046	0,033	0,052
Mg	1,017	0,95	0,103	0,104
Ca	0,005	0,003	0	0,005
Na	0,012	0,019	0,007	0,029
K	1,799	1,856	1,862	1,861
Cations	15,618	15,564	15,654	15,688
Sum_ox	22	22	22	22
Fe_Feldsp	0,81	0,81	0,98	0,98
Mg_Feldsp	0,19	0,19	0,02	0,02

Formule structural (O = 8)

Si	2,951	2,987	2,977	3,002
Al	1,045	1,008	1,009	1,003
Fe3	0,000	0,000	0,000	0,000
Ti	0,000	0,000	0,001	0,001
Fe2	0,002	0,000	0,003	0,005
Mn	0,000	0,005	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,001	0,002
Ba	0,000	0,000	0,002	0,000
Ca	0,028	0,002	0,028	0
Na	0,987	0,026	0,986	0,032
K	0,011	0,986	0,007	0,93
Ab	96,2	2,6	96,6	3,3
An	2,7	0,2	2,7	0,0
Or	1,1	97,2	0,7	98,7

Tableau IV - Analyses chimiques de roches représentatives du complexe du Tin-Erit
Whole rock analyses representative of Tin Erit complex

Ech	Granite central			Granite de la couronne		
	TE42	TE28	TE17	TE1	TE37	TE52
Elts (%)						
SiO ₂	70.52	71.81	72.46	75.45	76.6	77.05
TiO ₂	0.41	0.34	0.26	0.16	0.14	0.11
Al ₂ O ₃	14.01	13.55	13.36	11.74	11.74	11.56
Fe ₂ O ₃	3.49	3.19	2.77	2.27	1.99	1.76
MnO	0.05	0.04	0.04	0.05	0.02	0.02
MgO	0.41	0.34	0.21	0.1	0.03	0.02
CaO	1.54	1.03	1.44	0.53	0.35	0.17
Na ₂ O	4.13	3.77	3.9	3.71	3.68	3.85
K ₂ O	4.34	4.75	5.21	4.74	4.82	4.44
P ₂ O ₅	0.12	0.09	0.05	0.03	0	0
LOI	0.63	0.85	0.56	0.32	0.46	0.85
Total	99.65	99.76	99.71	99.09	99.83	99.82
Éléments en traces (ppm)						
Ba	777	454	396	118	55.3	24.8
Rb	55.3	56.8	51.1	72.47	71.6	92.2
Sr	192	93.7	68.9	20.5	16.8	6.73
Y	21.2	27.2	24.3	30.2	33.9	39.6
Zr	343	369	341	333	375	322.0
Nb	16.9	19.2	22.3	29.82	41	35.6
Th	5.38	7.02	7.6	6.78	9.54	9.71
Pb	nd	nd	nd	10.3	nd	nd
Ga	23	24.8	22.7	25.5	23	30.4
Zn	64.7	69.4	61.9	86	66.7	95.9
Cu	5.67	5.11	2.76	2.1	2.25	2.1
Ni	2.72	2.09	2.03	1.14	1.08	1.05
V	19.4	14.4	7.96	0.55	1.2	0.32
Cr	17.7	12.1	8.21	5.96	6.72	10.8
Mn	nd	nd	nd	8.42	nd	nd
Cs	nd	nd	nd	0.338	nd	nd
Sc	3.7	3.5	2.7	nd	1.2	1.0
Ta	nd	nd	nd	1.34	nd	nd
Co	3.56	2.24	1.82	0.56	0.33	0.25
Be	1.58	1.32	1.0	1.92	1.81	2.81
Terres rares (ppm)						
La	72.2	91.15	129.3	89.51	73.31	68.42
Ce	139.7	179.4	232.5	170.8	137.8	134.7
Pr	14.52	19.94	24.03	19.13	15.24	16.77
Nd	49.35	70.58	81.96	69.64	58.41	62.33
Sm	7.73	10.62	12.11	12.82	11.75	11.700
Eu	1.41	0.91	0.81	0.53	0.382	0.244
Gd	5.73	7.04	8.49	8.79	8.51	8.98
Tb	0.86	1.02	1.22	1.3	1.21	1.31
Dy	4.37	5.6	5.6	7.37	6.12	7.47
Ho	0.91	1.11	1.06	1.34	1.35	1.6
Er	2.07	2.47	2.64	3.29	3.42	3.84
Tm	0.3	0.4	0.4	0.48	0.56	0.52
Yb	2.12	2.53	2.46	3.03	3.78	3.65
Lu	0.37	0.41	0.39	0.54	0.65	0.6
ID	85.21	89.62	90.01	92.07	94.2	95.98

Tableau V - Résultats de la modélisation (éléments majeurs) de la cristallisation fractionnée du complexe du Tin - Erit
Modélisation results (major elements) of fractional crystallisation of Tin Erit complex

Magma initial	Première étape	Lq calculé	Lq réel	Deuxième étape	Lq calculé	Lq réel	Troisième étape	Lq calculé	Lq réel
C0 = TE42		Cl1=TE17'	TE17		Cl2=TE1'	TE1		Cl3=TE52'	TE52
SiO ₂ = 70.52	Minéraux soustraits	72.6	72.46	Minéraux soustraits	75.9	75.45	Minéraux soustraits	77.8	77.05
TiO ₂ = 0.41	Fk = 3.03%	0.04	0.26	Fk = 41.53	0.25	0.16	Fk = 63.95 %	0.18	0.11
Al ₂ O ₃ = 14.01	Plg = 70.57 %	13.91	13.36	Plg = 45.84%	11.39	11.74	Plg = 36.05 %	11.11	11.56
Fe ₂ O ₃ = 3.49	Amp = 24.5 %	2.23	2.77	Amp = 10.4 %	2.39	2.27		1.99	1.76
MnO = 0.05	Mica = 1,91 %	0.03	0.04	Bio = 2.19	0.03	0.05		0.06	0.02
MgO = 0.41	(1-F) x 100 = 13.99	0.35	0.21	(1-F) x 100 = 23.69 %	0.14	0.1	(1-F) x 100 = 8.15%	0.11	0.02
CaO = 1.54		1.42	1.44		0.82	0.53		0.59	0.17
Na ₂ O = 4.13	Somme des carrés	3.69	3.9	Somme des carrés	3.51	3.71	Somme des carrés	3.7	3.85
K ₂ O = 4.34	des résidus = 0.577	4.76	5.21	des résidus = 0.187	4.72	4.74	des résidus = 0.780	4.12	4.44
P ₂ O ₅ = 0.12		0.04	0.05		0.02	0.03		0	0