

Origine du granite fini-Archéen de Closepet (Inde du Sud) : apports de la modélisation géochimique du comportement des éléments en trace

Origin of the late-Archaean granite of Closepet, South India: information from geochemical modeling of trace element behaviour

Jean-François MOYEN^{1*}, Hervé MARTIN¹ et Mudlappa JAYANANDA²

¹ UMR 6524 - CNRS, Université Blaise-Pascal, 5, rue Kessler, F-63038, Clermont-Ferrand, France ;

² Department of Geology, Bangalore University, Bangalore 560 056, Inde

RÉSUMÉ

Le granite de Closepet est la manifestation du dernier événement magmatique archéen connu dans le craton de Dharwar (Inde du Sud). C'est un massif composite qui témoigne d'interactions fortes entre un magma mantellique et la croûte continentale. Par modélisation géochimique du comportement des éléments en trace lors des processus magmatiques, nous proposons un modèle quantitatif des mécanismes pétrogénétiques qui sont intervenus lors de la genèse de ce granite : il s'agit essentiellement du mélange d'un magma basique avec des produits de fusion partielle de la croûte continentale. Une cristallisation fractionnée de faible ampleur a permis un début de différenciation du magma basique. La composition chimique du magma initial recalculée est semblable à celle des roches connues à la fin de l'Archéen sous le nom de « sanukitoïdes ».

Mots clés : Archéen, Inde, Granitoïdes, Géochimie, Modélisation, Sanukitoïdes

ABSTRACT

The Closepet granite is the latest known Archaean magmatic event in the Dharwar craton (South India). It consists of a composite mass showing interactions between a mantle-derived magma and the surrounding continental crust. Modeling based on trace element behaviour indicates that its geochemical characteristics are mainly accounted for by mixing between a mafic magma, and products of the partial melting of the surrounding continental crust. To a small extent fractional crystallization took place prior to the mixing. The recalculated parental magma's chemical composition is very similar to that of typical late-Archaean rocks known as 'sanukitoids'.

Keywords: Archaean, India, Granitoid, Geochemistry, Modeling, Sanukitoid

Abridged version (see p. 663)

1. Introduction

Le craton archéen de Dharwar (Inde du Sud) est constitué d'un socle granito-gneissique (Gneiss péninsulaires) de

composition TTG (tonalite-trondjémite-granodiorite), daté entre 3,0 et 3,3 Ga (Friend et Nutman, 1991 ; Peucat et al., 1993), de ceintures de roches vertes, et de granitoïdes tardifs. Parmi ceux-ci figure le granite de Closepet,

Note présentée par Johan Zdenek

Note remise le 20 mars 1997, acceptée après révision le 9 juin 1997

* E-mail : moyen@opgc.univ-bpclermont-fr

daté à 2,52 Ga (Friend et Nutman, 1991 ; Jayananda et al., 1995), qui affleure sous la forme d'une bande de 20 km sur 400 (figure 1). Longtemps, il a été considéré comme exclusivement engendré par l'anatexie des Gneiss péinsulaire (Allen et al., 1986) ; récemment, Jayananda et al. (1995) ont démontré qu'il provient d'un magma d'origine mantellique qui a localement interagi avec la croûte continentale. L'objet de cet article est de préciser la nature de cette interaction et de chercher à la quantifier.

II. Pétrologie et géochimie

Dans sa partie méridionale, le massif de Closepet est assez hétérogène ; on peut distinguer deux grands ensembles lithologiques (figure 1) :

1) un ensemble intrusif calco-alkalin comprenant une monzonite à clinopyroxène et un monzogranite porphyroïde, qui, là où elles sont en contact, présentent des figures de mélange à l'état magmatique ; leurs teneurs en Sr (400-1 600 ppm) et en Ba (500-3 000 ppm) sont élevées, alors que même les termes les moins différenciés sont pauvres en Ni et Cr (moins de 36 et 56 ppm respectivement) ; leurs spectres de terres rares, semblables à ceux des TTG archéennes (Martin, 1986), sont très fractionnés ($(La/Yb)_N = 20-30$) et pauvres en terres rares lourdes ($Yb_N = 5-10$) ;

2) un ensemble anatectique (granites gris et rose) montrant un passage progressif, d'une part jusqu'aux Gneiss péinsulaire encaissants, par l'intermédiaire d'une bande de migmatites large de 5 à 10 km, d'autre part jusqu'au monzogranite porphyroïde, par l'intermédiaire de faciès de plus en plus riches en phénocristaux ; riches en Sr et en Ba (150-800 et 500-1 600 ppm respectivement), leurs spectres de terres rares sont semblables à ceux des roches de l'ensemble intrusif.

Dans les diagrammes de Harker (figure 2), non seulement les éléments majeurs, mais aussi les éléments en traces montrent de bonnes corrélations linéaires avec la silice. Deux mécanismes peuvent rendre compte de ces observations :

1) la cristallisation fractionnée d'un liquide basique : cette hypothèse est soutenue par : a) l'existence d'enclaves à biotite et à amphibole dont l'étude pétrographique

montre que leur texture est cumulative et leur minéralogie primaire ; b) les faibles teneurs en éléments hautement compatibles (Ni, Cr), même dans les roches les moins différenciées ; mais le fait d'avoir des droites dans les diagrammes de Harker implique que la composition du cumulat soit restée constante tout au long d'un épisode de cristallisation fractionnée, et ce sur un intervalle de teneur

Figure 1. Carte géologique simplifiée du Sud du massif de Closepet, d'après Jayananda et al., 1995 (modifié). Schéma de localisation : 1. gneiss péinsulaire ; 2. ceintures de roches vertes ; 3. massif de Closepet ; 4. faciès « granulite ». B. Bangalore. Figure principale : A. gneiss péinsulaire ; B. gneiss péinsulaire migmatisés ; C. faciès granulite ; D. monzonite à clinopyroxène ; E. monzogranite porphyroïde ; F. granite anatectique gris ; G. granite anatectique rose.

Simplified geological map of the southern Closepet batholith, Jayananda et al., 1995 (modified). Localisation map: 1 - Peninsular Gneisses, 2 - greenstone belts, 3 - closepet batholith, 4 - granulite-facies metamorphism. B - Bangalore. Main map: A - Peninsular Gneisses, B - migmatized gneisses, C - granulite facies, D - clinopyroxene bearing monzonite, E - porphyroid monzogranite, F - grey anatectic granite, G - pink anatectic granite.

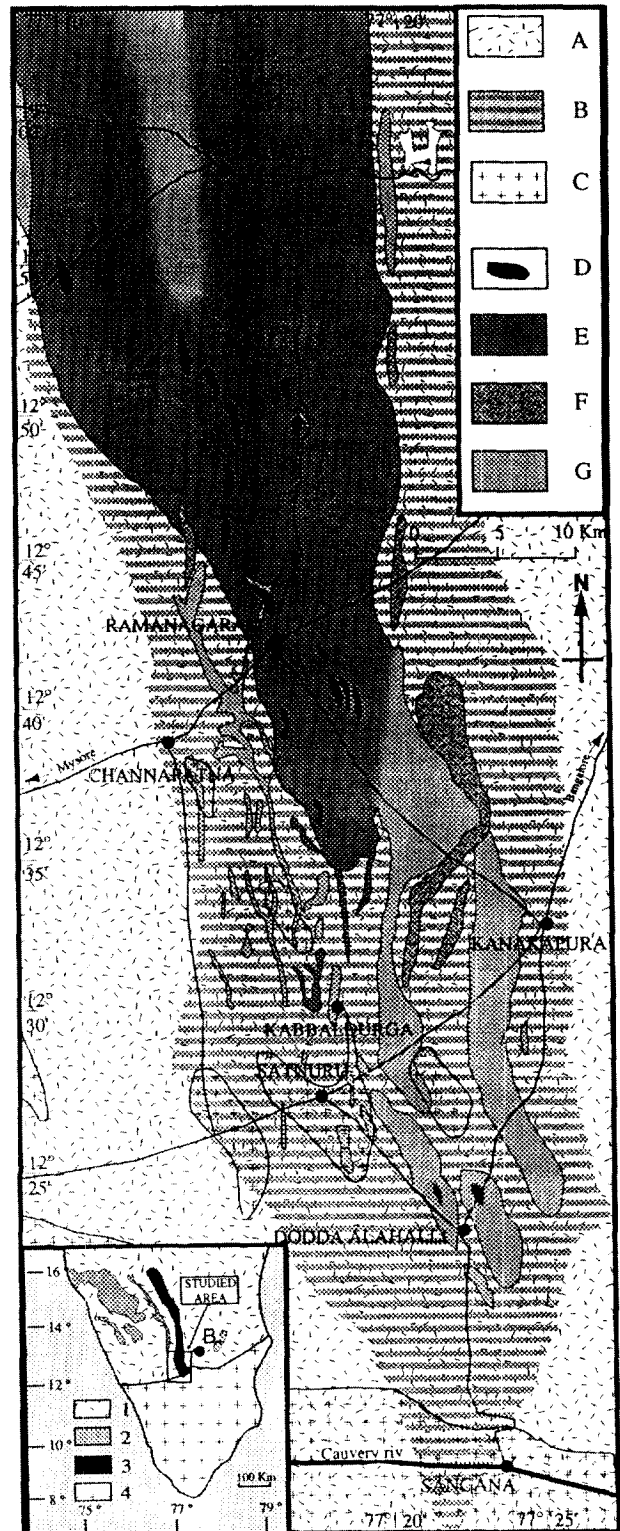
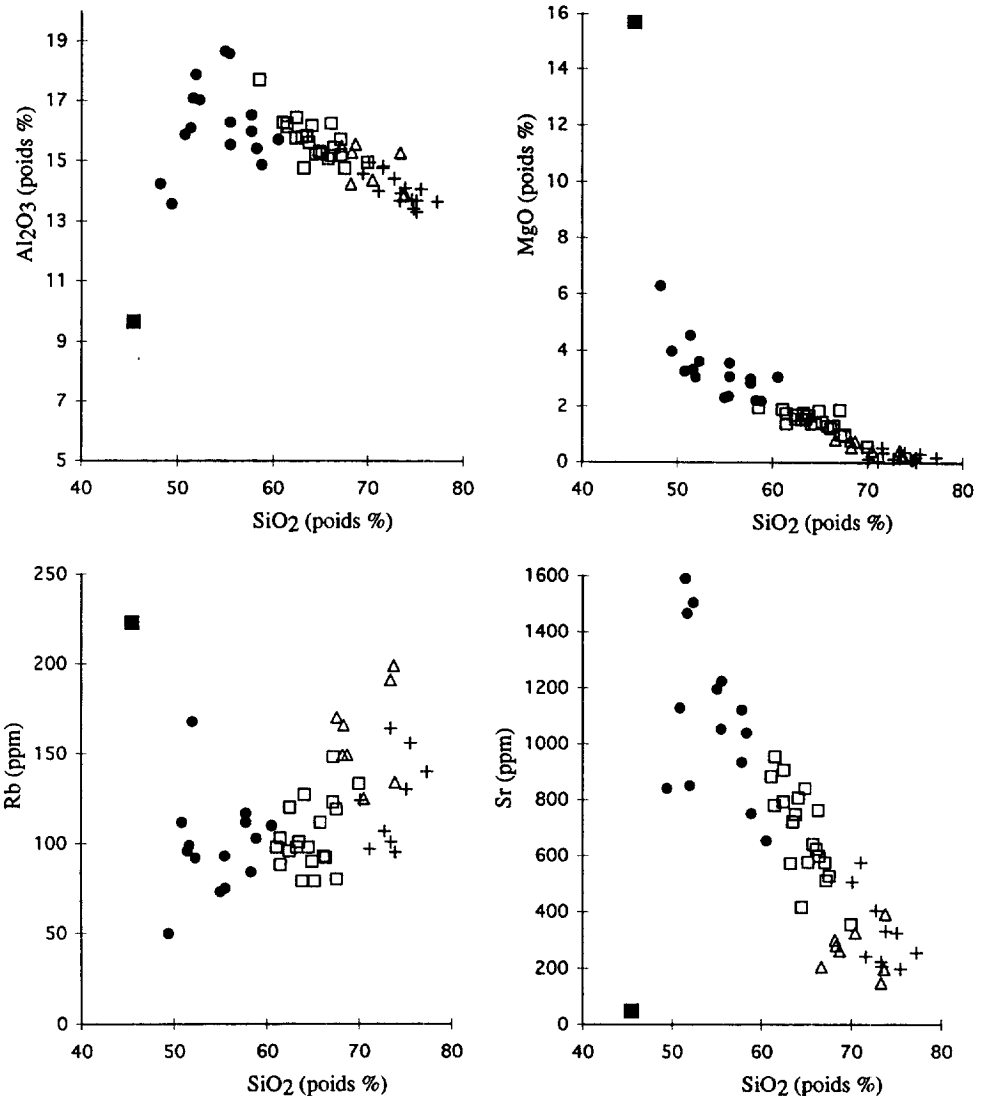


Figure 2. Diagrammes de Harker pour quelques éléments majeurs (Al_2O_3 , MgO) et en traces (Rb, Sr).
 • Monzonite à clinopyroxène ;
 □ monzogranite porphyroïde ;
 △ granite gris ; + granite rose ;
 ■ cumulat.

Harker's plots for some major (Al_2O_3 , MgO) and trace (Rb, Sr) elements. • clinopyroxene monzonite; □ porphyroid monzogranite; △ grey granite; + pink granite; ■ cumulate.



en SiO_2 allant de 50 à 75 %, ce qui est en contradiction avec les données de la pétrologie expérimentale ; de plus, l'enclave de cumulat ne se place pas sur ces droites et ne peut donc pas rendre compte de l'alignement des points ; enfin, lorsque leur comportement est régi par la cristallisation fractionnée, les éléments en traces doivent se répartir selon les courbes prédites par la loi de Rayleigh, plutôt que des droites ;

2) le mélange d'un composant acide avec un composant basique : les figures de mélange entre liquides, observées sur le terrain, sont de très forts arguments en faveur de cette hypothèse.

III. Modélisation numérique du comportement des éléments en traces

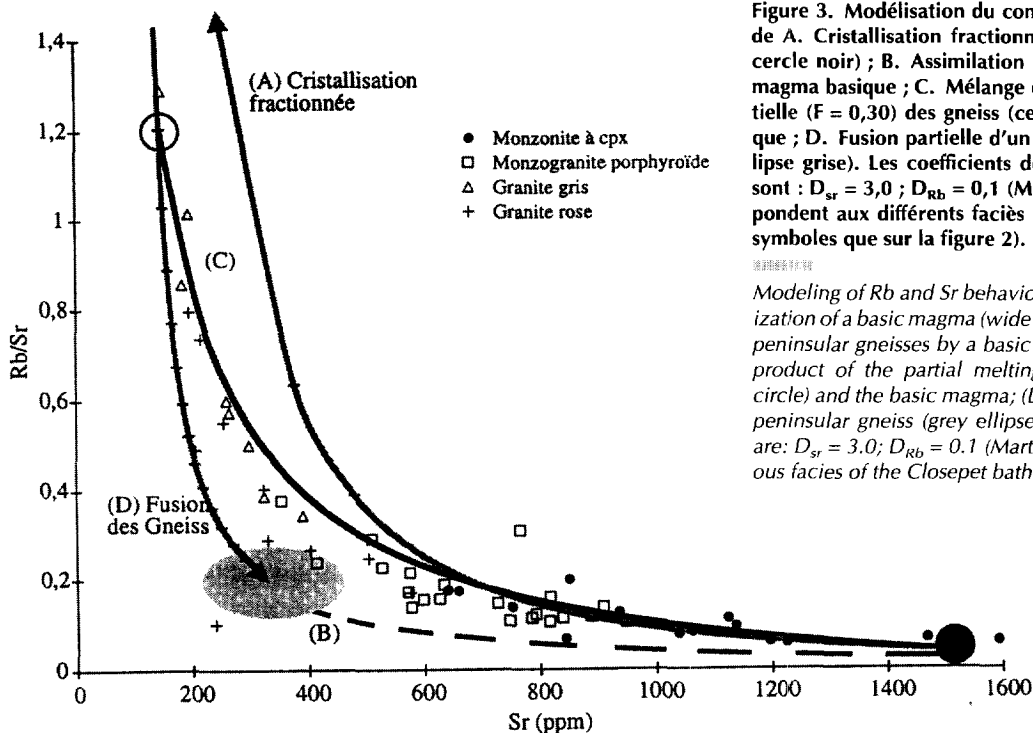
Il est possible de trancher entre ces deux hypothèses en utilisant des éléments en traces, aux comportements géochimiques contrastés. Un élément compatible (Sr) et un élément incompatible (Rb) (figure 2), qui présentent peu

de dispersion dans les diagrammes de Harker, ont été utilisés. La figure 3 résume les différents modèles calculés.

La cristallisation fractionnée de hornblende et de biotite à partir d'un liquide basique (monzonite à clinopyroxène) prédit des concentrations en Sr deux fois plus élevées que celles mesurées dans les termes les plus acides, ce qui confirme que ce processus ne peut en aucun cas expliquer la genèse de l'ensemble du massif de Closepet. Même en faisant varier dans une gamme raisonnable les coefficients de partage ou la composition du cumulat, il est impossible d'obtenir un modèle de cristallisation qui reproduise les compositions observées.

Le mélange d'un magma basique avec des Gneiss pé-ninsulaires, par assimilation de l'encaissant (mécanisme invoqué par Jayananda et al., 1995), donnerait des magmas dont les rapports Rb/Sr seraient bien plus faibles que ceux mesurés. Cette hypothèse doit donc être rejetée.

Le mélange d'un magma basique avec des liquides issus de la fusion partielle des gneiss pé-ninsulaires représente un autre modèle ; ce processus, compatible avec les ob-



Modeling of Rb and Sr behaviour during (A): fractional crystallization of a basic magma (wide black circle); (B): assimilation of peninsular gneisses by a basic magma; (C): mixing between a product of the partial melting ($F = 0.30$) of gneisses (open circle) and the basic magma; (D): partial melting of an average peninsular gneiss (grey ellipse). Bulk distribution coefficients are: $D_{Sr} = 3.0$; $D_{Rb} = 0.1$ (Martin, 1985). Points show the various facies of the Clousepet batholith (symbols as in figure 2).

servations de terrain, est le seul pouvant rendre compte de l'ensemble des compositions observées. Dans ce cas (courbe C, figure 3), le mélange a eu lieu entre un liquide de nature proche de celle des monzonites à clinopyroxène, et un liquide issu de 30 % de fusion partielle des gneiss encaissants (courbe D, figure 3). Dans ce modèle, la majorité des roches observées est fortement affectée par le mélange, et presque aucune n'a la composition d'un pôle pur. Les monzonites contiendraient de 0 à 40 % de liquide d'origine crustale, les monzogranites de 45 à 65 %, les granites anatectiques de 70 à plus de 98 %.

La dispersion relative des points représentatifs des analyses sous la courbe de mélange peut s'expliquer par l'hétérogénéité des gneiss encaissants, et donc de leurs produits de fusion, l'hétérogénéité des liquides basiques, ou la variation du taux de fusion des gneiss. Ces hétérogénéités n'ont rien de surprenant, dès lors que l'on considère (figure 1) que le massif de Clousepet est un assemblage de plutons et de filons, tous cogénétiques mais ayant chacun leur histoire propre.

L'étude d'autres éléments en traces conduit à des conclusions identiques (couple Th-Ba ou Nb-Ba : Moyen, 1996).

La prépondérance des mécanismes de mélange n'implique pas nécessairement que la cristallisation fractionnée ait été totalement inopérante. En effet, son existence est démontrée à la fois par la présence d'enclaves cumulatives, et par les très faibles teneurs en éléments très compatibles. Dans les diagrammes de Harker, le cumulat ne s'aligne pas avec les autres roches, ce qui confirme que les lignées ne sont pas dues à de la cristallisation fractionnée, et que l'épisode de cristallisation a eu lieu avant le mélange : le pôle basique du mélange est déjà un liquide

différencié. Connaissant la composition chimique du cumulat (C_s) ainsi que celle des liquides différenciés (C_l) (pôle basique du mélange), on peut, pour chaque élément, calculer le coefficient de distribution générale D , et estimer la quantité de liquide résiduel F . Dans le cas d'un élément compatible, la concentration C_0 dans le liquide initial ne peut en aucun cas être plus élevée que C_s , ce qui permet donc de calculer, d'après la loi de Rayleigh, une valeur limite minimale de la quantité de liquide : $F_{\min} = (C_s / C_l)^{1/D-1}$; le F « réel » ne pourra être que supérieur à cette valeur. Pour un élément incompatible, C_0 doit être plus faible que C_s , ce qui donne aussi une valeur plancher de F .

L'estimation de F_{\min} varie selon les éléments de 3 % (Sr) à 86 % (Cr). Pour satisfaire aux contraintes établies pour chaque élément, c'est la valeur la plus élevée de F_{\min} que l'on retient. La composition du liquide parent, ainsi recalculée pour $F = 0,9$ (tableau), prédit des teneurs en Ni et en Cr proches de celles que l'on attend pour un magma primaire (105 et 158 ppm respectivement). La composition effective du liquide initial pour les éléments incompatibles est peu dépendante de la valeur de F ; leur teneur dans le magma est donc bien contrainte. Ce n'est pas le cas pour les éléments compatibles, où de petites variations de F font varier C_0 dans une large gamme (tableau).

Le liquide initial recalculé évoque les « sanukitoïdes » de la Province supérieure (Canada) (Stern et Hanson, 1991) : il s'agit de monzonites et de granodiorites riches en Mg, Ni et Cr, avec de grandes quantités de Sr et Ba, dont les spectres de terres rares, très fractionnés et riches en terres rares légères, sont semblables à ceux des TTG. Dans le complexe de Roaring River (Stern, 1989), elles sont

Tableau. Compositions chimiques du pôle basique du mélange, ainsi que des liquides parentaux recalculés pour différents F : les teneurs en éléments compatibles dépendent étroitement de la valeur de F. Gammes de composition pour les roches basiques associées au massif de Roaring River. « Sanukitoid suite » du Canada. L'ensemble des roches ressemblant aux sanukitoïdes décrites dans le monde.

Table showing the chemical composition of the mafic end-member of the mixing, and of the calculated parental melts for various F : concentration of compatible elements is strongly dependent on the chosen F value; compositions of mafic rocks associated with the Roaring River complex; Canadian 'Sanukitoid suite'; world-wide sanukitoid-like rocks.

	Pôle du mélange	Liquide initial pour F = 0,86 F = 0,95		Termes basiques de Roaring River	Sanukitoïdes du Canada	Sanukitoïdes et analogues dans le monde
<i>Majeurs (poids %)</i>						
SiO ₂	51,66	50,96	51,41	40,85-52,63	54,77-70,59	54,77-70,59
Al ₂ O ₃	17,57	16,52	17,19	7,74-22,13	12,67-17,79	12,67-17,79
FeO total	10,49	10,87	10,62	5,29-23,00	1,30-8,76	1,30-9,80
MnO	0,18	0,18	0,18	0,09-0,19	0,03-0,14	0,03-0,16
MgO	3,72	5,41	4,32	5,88-15,25	0,53-8,27	0,53-8,27
CaO	6,57	6,84	6,67	11,55-18,18	1,27-8,76	1,27-8,76
Na ₂ O	4,44	3,95	4,27	0,93-2,07	3,38-5,92	3,27-5,92
K ₂ O	2,89	3,02	2,94	0,40-0,93	1,35-4,62	1,35-4,62
TiO ₂	1,45	1,35	1,41	0,21-1,27	0,13-1,13	0,13-2,01
P ₂ O ₅	1,03	0,89	0,98	0,06-0,21	0,05-0,60	0,05-0,99
<i>Traces (ppm)</i>						
Rb	75	101	83	10-39	34-125	34-125
Sr	1 506	1 301	1 433	238-1 270	570-2 100	570-2 100
Ba	1 731	1 517	1 655	116-297	612-1 881	612-1 881
Zr	190	349	376	43-84	53-190	53-340
Y	50	47	49	—	—	56
Nb	18	20	19	—	—	22
Co	25	31	27	—	—	26
Ni	35	144	57	30-450	10-188	10-188
Cr	45	148	68	26-1 457	16-469	16-469
mg #	0,41	0,50	0,45	0,38-0,76	0,45-0,71	0,45-0,71

associées à des termes basiques (gabbros). La transition Archéen-Protérozoïque est marquée, dans tous les cratons archéens, par un important épisode magmatique de type sanukitoïde, de durée brève : outre les sanukitoïdes définies au Canada, de nombreuses roches analogues ont été décrites dans le monde : gneiss de Matok en Afrique du Sud (Bohlender et al., 1992), complexe de Taishan en Chine (Jahn et al., 1988), granodiorite d'Arola en Finlande (Querré, 1985), etc.

IV. Conclusions

Le modèle proposé pour rendre compte de la pétrogenèse du massif de Closepet est un modèle en deux étapes :

cristallisation d'environ 10 % de hornblende et de biotite à partir d'un liquide basique à composition de sanukitoïde ; puis mélange des liquides différenciés ainsi formés avec des produits de fusion partielle des Gneiss péniinsulaires encaissants.

Comme l'ensemble des sanukitoïdes, le massif de Closepet apporte des renseignements sur les événements magmatiques tardi-archéens et, plus généralement, sur les modalités de la transition Archéen-Protérozoïque. Cependant, les caractéristiques de chaque massif de sanukitoïdes sont liées à une histoire de mise en place qui lui est propre ; celle du massif de Closepet est caractérisée par d'intenses interactions avec la croûte continentale.

ABRIDGED VERSION

Introduction

In the Dharwar craton of South India, the latest Archaean event consists of granite genesis and emplacement. The Closepet

granite belongs to this group; it is a 300 km long and 20 km wide batholith dated at about 2.52 Ga (Friend et Nutman, 1991; Jayananda et al., 1995). Jayananda et al. (1995) demonstrated that the Closepet granite was produced from a mantle-derived

melt interacting with the surrounding old continental crust. The aim of this paper is to model and constrain these interactions.

Petrology and geochemistry

The southern part of the Closepet granite consists of 2 main lithologic groups (Jayananda et al., 1995) (figure 1):

1) An intrusive group made of a clinopyroxene-bearing monzonite and a porphyritic monzogranite. On the field, these facies show magmatic mixing and mingling. They belong to a calc-alkaline differentiation trend, but are abnormally Sr and Ba rich (respectively 400–1 600 ppm and 500–3 000 ppm), Ni and Cr poor even for the least differentiated terms (less than 36 and 56 ppm respectively). Their REE patterns are Archaean TTG-like (Martin, 1986).

2) An anatectic group (grey and pink granite), which progressively blends with the surrounding gneissic basement through a 10 km thick migmatitic zone. They also display continuous transition towards the porphyritic facies. Their trace element characteristics are similar to those of the intrusive group.

Harker's plots (figure 2) display linear trends for both the major end trace elements. This feature can be explained by:

— Fractional crystallization of a mafic magma, which is supported by the low compatible element content, and existence of biotite-amphibole cumulative enclaves. However, this would imply that the composition of the cumulate remained constant throughout the whole process, which is very unlikely; moreover, the analysed cumulative enclave does not plot on the same line. In addition, according to Raleigh's law for trace elements, fractional crystallization should produce curves rather than straight lines in Harker's plots.

or

— mixing of a basic magma with an acidic liquid, an hypothesis strongly supported by field observations.

Numerical modeling using trace elements

Figure 3 shows several theoretical models accounting for the behaviour of a compatible (Sr) and an incompatible (Rb) element (figure 2). Model A (fractional crystallization) predicts

Sr content in residual magmas at double the possible level for the acidic terms: consequently it is rejected. Model B (assimilation of the gneissic basement) predicts too low Rb/Sr ratios: it is also rejected. The only model able to account for the chemistry of the rocks is model C (mixing of a mafic magma with the products of anatexis of the basement). No sample is representative of a pure end-member, the clinopyroxene bearing monzonite including 0–40% of crust-derived liquid, the porphyritic monzogranite, 45–65%, and the anatectic granites, 70–98%.

Influence of fractional crystallization

The existence of a fractionation event is demonstrated by the occurrence of cumulative enclaves. However, this cumulate plots out of the main (mixing) trend in the Harker's plots, which implies that the fractionation occurred prior to the mixing. Since we know the composition of both the cumulate and the differentiated liquid (the mafic end-member of the mixing), it is possible to recalculate the bulk repartition coefficient for each element and consequently the remaining melt fraction (F) for each single element, which is here about 0.9. The parental liquid recalculated using this value (table) is close in composition to rocks known as 'sanukitoids' (Stern et Hanson, 1991): Ni-, Cr- and Mg-rich monzodiorites to granodiorites, with TTG-like REE patterns and high Sr and Ba contents. The sanukitoids are world widespread at the Archaean-Proterozoic transition (2.5 Ga).

Conclusions

1) A two-step model is proposed for the formation of the Closepet granite: a) fractional crystallization of a sanukitoid-like melt; b) mixing of the residual liquid with the products of basement anatexis.

2) As with the sanukitoids, the Closepet granite gives informations about the magmatic activity at the Archaean – Proterozoic transition. Its characteristics are also strongly influenced by its emplacement history: strong interactions with the crust.

RÉFÉRENCES

- Allen P., Condie K. et Bowling G. 1986. Geochemical characteristics and possible origins of the Southern Closepet batholith, South India, *Geology*, 94, 283-299
- Bohlender F., Van Reenen D.D. et Barton Jr J.M. 1992. Evidences for metamorphic and igneous charnockites in the South Marginal Zone of the Limpopo belt, *Precamb. Res.*, 55, 429-449
- Friend C. et Nutman A. 1991. SHRIMP U–Pb geochronology of the Closepet granite and Peninsular gneisses, Karnataka, South India. *J. Geol. Soc. India*, 38, 357-368
- Jahn B., Auvray B., Shen Q., Zhang Z., Dong Y., Ye X., Zhang Q., Cornichet J. et Mace J. 1988. Archean crustal evolution in China: the Taishan complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle, *Precamb. Res.*, 38, 381-403
- Jayananda M., Martin H., Peucat J.-J. et Mahalabeswar B. 1995. Late-Archaean crust-mantle interactions: geochemistry of LREE-enriched mantle derived magmas. Example of the Closepet batholith, Southern India, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 199, 314-329
- Martin H. 1985. Nature, origine et évolution d'un segment de croûte continentale archéenne: contraintes chimiques et isotopiques. Exemple de la Finlande orientale, *Mém. Centre Arm. Et. Str. Socles, Rennes*, n° 1, 236 p.
- Martin H. 1986. Effect of a steeper Archaean geothermal gradient on geochemistry of subduction zone magmas, *Geology*, 14, 753-756
- Moyen J.-F. 1996. Genèse et mise en place des granitoïdes tardi-archéens (sanukitoïdes) du Sud de l'Inde, *Mémoire de DEA, Univ. B. Pascal, Clermont-Ferrand, France*, 61 p.
- Peucat J.-J., Mahalabeswar B. et Jayananda M. 1993. Age of younger tonalitic magmatism and granulitic metamorphism in the South India transition zone (Krishnagiri area): comparison with older Peninsular Gneisses from the Gorur-Hassan area, *J. Metam. Geol.*, 11, 879-888
- Querré G. 1985. Palingenèse de la croûte continentale à l'Archaéen : les granitoïdes tardifs (2,5 - 2,4 Ga) de Finlande orientale, *Mém. Centre Arm. Et. Str. Socles, Rennes*, 2, 193 p.
- Stern R. 1989. Petrogenesis of the Archaean sanukitoid suite, *PhD. Thesis*, State University of New-York at Stony Brook, 275 p.
- Stern, R. et Hanson G. 1991. Archaean high-Mg granodiorites: a derivative of LREE enriched monzodiorite of mantle origin, *J. Petrol.*, 32, 1, 201-238