

**Tectonique tangentielle et décrochements d'âge
Protérozoïque inférieur (orogénèse transamazonienne,
environ 2 000 Ma) au Nord du « Quadrilatère ferrifère »
(Minas Gerais, Brésil)**

Antonio Wilson ROMANO, Jean-Michel BERTRAND,
Annie MICHARD et Jean-Louis ZIMMERMANN

Résumé – La tectonique tangentielle principale observée au Nord du « Quadrilatère ferrifère » (Sud du craton de São Francisco), accompagnée de décrochements de direction NW-SE, est maintenant attribuée à l'orogénèse transamazonienne (environ 2 000 Ma). L'âge archéen du socle granito-gneissique est confirmé par les âges U-Pb sur zircons et Sm-Nd (âges modèles TDM sur roches totales) entre 2 800 et 2 600 Ma, tandis que la remobilisation de ce socle est approximativement datée vers 2 000 Ma (Rb-Sr et K-Ar).

**Lower Proterozoic nappe tectonics and strike slip faults related to the
Transamazonian orogeny (ca. 2,000 Ma) in the "Quadrilatero ferrifero"
(Minas Gerais, Brazil)**

Abstract – Structural and geochronological evidence for a Transamazonian age (ca. 2,000 Ma) of a major nappe-forming event occurring in the "Quadrilatero ferrifero" region are discussed in this paper. The Archaean age of the granite-gneiss basement is confirmed by U-Pb zircon ages and by Sm-Nd TDM model ages in the 2,800-2,600 Ma range. Rb-Sr ages (whole-rock isochrons and biotite model ages) and K-Ar ages (biotite) suggest a basement reworking during the Transamazonian orogeny.

Abridged English Version – The São Francisco craton, Archaean to Early Proterozoic in age, is the South American counterpart of the Congo craton in Africa ([1], [2]). Archaean granulitic formations (Jequié complex) are associated with lower-grade supracrustals, some of them Lower Proterozoic in age ([3], [4]). However, in the southern part of the craton, the Rio das Velhas volcanic and sedimentary supergroup is considered as an Archaean greenstone belt ([5], [6], [7]). The craton is split in two structural domains separated by a NW-SE trending complex tectonic zone where Middle Proterozoic rift-related formations (Espinhaço rift, [8]) were subsequently involved in nappe tectonics of Brazilian age (ca. 600 Ma).

The southern part of the craton constitutes the well-known "Quadrilatero ferrifero" in Minas Gerais state. This region comprises Archaean granite-gneisses and two supergroups of supracrustal formations [9]: the Archaean "Rio das Velhas" supergroup ([5], [6], [7]) and the unconformable Early Proterozoic Minas supergroup with its widespread banded iron formations – BIF – ([6], [9]). Interpretations of the tectonic evolution of the region are conflicting about the relative role of Lower, Middle and Upper Proterozoic orogenies ([10], [11], [14]). We present here recent mapping and structural observations supported by new isotopic data which outline a major, ca. 2,000 Ma-old, Transamazonian reactivation [12].

The oldest deformation event D_n is only known in the "Rio das Velhas" supergroup [10], whilst the D_n+1 event is present and dominant in both supergroups. This latter event produced:

- recumbent NW-SE to NE-SW folds associated with the more obvious planar and linear structures and with the oriented growth of metamorphic minerals such as staurolite, choritoid and kyanite in the "Rio das Velhas" rocks;

Note présentée par Georges MILLOT.

0764-4450/91/03131195 \$ 2.00 © Académie des Sciences

- major thrusting ([13], [14]) often located at the Minas-basement interface;
- strike-slip faults, interpreted as tear-faults as they are parallel to the movement direction defined by the stretching lineation observed on thrust planes.

Migmatites and granitic basement underneath the main thrusts are foliated and do not show any retrogression; their planar and linear structures are broadly parallel to those observed in the overlying Minas supracrustals.

Previous geochronological investigations have yielded scattered ages from 2,800 Ma to 1,850 and 1,650 Ma, ages of the emplacement or cooling of a mafic dyke-swarm ([15 to 19]). The new geochronological data presented here support the interpretation of a large-scale structural reworking of an Archaean basement during the Transamazonian orogeny which we interpret as corresponding to the main tangential deformation. Analytical methods are described in previous papers [20] and analytical data are available on request to the authors. Data are as follows:

- Caio Martins granodiorite yielded a U-Pb zircon age of $2,593 \pm 18$ Ma with a Sm-Nd model age of 2,770 Ma (TDM), a Rb-Sr isochron age of $1,870 \pm 37$ Ma ($Sr = 0.705$), a Rb-Sr whole rock-biotite age of 1,864 Ma and a K-Ar age on biotite of $1,773 \pm 30$ Ma.

- Mateus Leme granite yielded a U-Pb zircon age of $2,755 \pm 13$ Ma very close to the Sm-Nd model age (TDM) of 2,780 Ma, a Rb-Sr whole rock-biotite age of 1,864 Ma and a K-Ar age on biotite of $1,745 \pm 30$ Ma.

Both rock units belong to the granite-gneiss basement. These results are in agreement with recent and more precise data by Machado *et al.* [21] who confirms (1) the Archaean age of the basement protolith, (2) the Lower Proterozoic age of the Minas supergroup and (3) suggests that Transamazonian reworking occurred at a large scale (2,030 to 2,060 Ma sphene and monazite U-Pb ages on granite gneisses). The Transamazonian age of the main tangential tectonics, also recently defended by Marshak and Alkmim [11], is thus well supported by new geochronological data. A precise timing of the main Transamazonian tectonometamorphic event may be proposed in the 2,030-2,060 Ma range [21] with subsequent cooling lasting possibly till 1,800 Ma.

Au centre-est du Brésil, le craton de São Francisco, d'âge Archéen à Protérozoïque inférieur [1] forme le pendant sud américain du craton du Congo en Afrique centrale [2]. Des formations granulitiques, réputées archéennes (complexe de Jequié), y sont associées à des formations supracrustales moins métamorphiques dont certaines sont datées du Protérozoïque inférieur (Jacobina [3], Itapicuru [4]). Cependant, dans la partie sud du craton, certaines formations volcanosédimentaires sont bien d'âge archéen (Rio das Velhas ([5] à [7])). En fait, l'âge du métamorphisme et de la déformation principale de même que la chronologie précise de l'orogénèse transamazonienne (environ 2,000 Ma), sont loin d'être connus partout. Le craton est recouvert en grande partie, à l'Ouest et au Sud, par des formations sédimentaires discordantes, d'âge Protérozoïque moyen et supérieur. Il est séparé en deux domaines structuraux distincts par une zone tectonique complexe, de direction NW-SE, dont l'évolution en distension au Protérozoïque moyen (rift d'Espinhaço [8]), a été suivie par une tectonique tangentielle d'âge brésilien (Protérozoïque supérieur, environ 600 Ma. Sauf dans la région de Salvador, le craton est ceinturé par des segments orogéniques d'âge brésilien (chaînes de Borborema, Brasília, Ribeiro, Araçuaí).

La partie SW du craton de São Francisco forme le « Quadrilatère ferrifère », célèbre pour ses ressources minières. Outre les complexes granito-gneissiques réputés archéens, deux ensembles supracrustaux y ont été définis [9] :

– le supergroupe Rio das Velhas ([5], [7]), le plus ancien, est constitué de métavolcanites et de metasédiments semblables à ceux des « ceintures de roches vertes » archéennes ([5], [6]),

– le supergroupe Minas ([6], [9]), d'âge Protérozoïque inférieur, repose en discordance sur le précédent et comporte des formations détritico-chimiques ferrugineuses.

Plusieurs interprétations de l'histoire tectonique du « Quadrilatère ferrifère » ont été proposées ([10], [11]), elles diffèrent par l'importance relative donnée aux événements successifs d'âge Protérozoïque inférieur, moyen et supérieur (Transamazonien, Espinhaço et Brésilien). Les observations de terrain et les données radiométriques nouvelles présentées ici soulignent la prépondérance de l'orogénèse transamazonienne, d'âge voisin de 2,000 Ma.

ÉVOLUTION TECTONIQUE. – Dans la partie nord du « Quadrilatère ferrifère », deux phases majeures de déformation ont été reconnues [12].

– La phase D_n est restreinte au supergroupe Rio das Velhas (F_1 de Ladeira et coll. [5]). Ce sont des plis kilométriques, disposés en éventail asymétrique, de direction axiale moyenne E-W, à déversement apparent vers le SW. A ces plis sont associés une schistosité de plan axial S_n , pénétrative sauf dans les quartzites, et des linéations d'intersection S_0/S_n .

– La phase D_{n+1} déforme les deux supergroupes. Elle a produit des plis isoclinaux serrés, déversés vers l'Ouest, d'axe NE-SW dans la Serra do Curral à NW-SE près de Pitangui. Ces plis déforment les structures antérieures. Le pendage de la schistosité S_{n+1} , la plus nette sur le terrain, varie entre $N30^\circ$ à $N150^\circ$. Les linéations minérales, voisines de N-S, sont caractérisées par l'alignement de staurotide, de chloritoïde et de disthène dans les roches du supergroupe Rio das Velhas. Dans le supergroupe Minas, moins métamorphique, les structures sédimentaires primaires sont souvent préservées et la schistosité S_{n+1} est peu développée dans les roches compétentes.

Le chevauchement majeur de la Serra do Curral est connu depuis longtemps ([13], [14]). Deux autres chevauchements subparallèles ont été reconnus : ceux d'Azurita et de Boa Vista (situés respectivement au Sud et au Nord de Mateus Leme sur la figure 1). Dans la Serra do Curral, le plan de chevauchement a un pendage SSE faible, d'environ 30° ; il est de 45° à Azurita. A ces chevauchements sont associés : une forte linéation d'étirement de direction NW-SE, des plis d'axe N-S à $N30^\circ$ d'amplitude parfois hectométrique, des plis d'entraînement d'échelle mésoscopique et des « kinds bands », tous attribués à la phase majeure D_{n+1} . Les chevauchements se sont produits en zone profonde, car ils remobilisent le socle : les structures planaires et linéaires observées dans celui-ci au voisinage des failles de chevauchement, ont la même orientation que celle des schistes de la bordure nord de la Serra do Curral, d'Azurita et d'Itauna. Dans cette dernière région, les migmatites ne montrent aucune déformation postérieure à leur cristallisation et les structures linéaires ont la même orientation générale NW-SE que celles du supergroupe Minas dont le contact basal est tectonique.

Un système très dense de décrochements subparallèles à la direction de transport (« tear faults ») souligne le contact ouest des séries supracrustales avec les grands domaines gneissiques. Des plis en fourreau d'axe subhorizontal ont été observés dans les mylonites, au Nord de Para de Minas. Ces décrochements senestres résultent d'une réponse différentielle du supergroupe Minas et du socle à la tectonique tangentielle et d'un comportement de type « rampe latérale » à la bordure du socle.

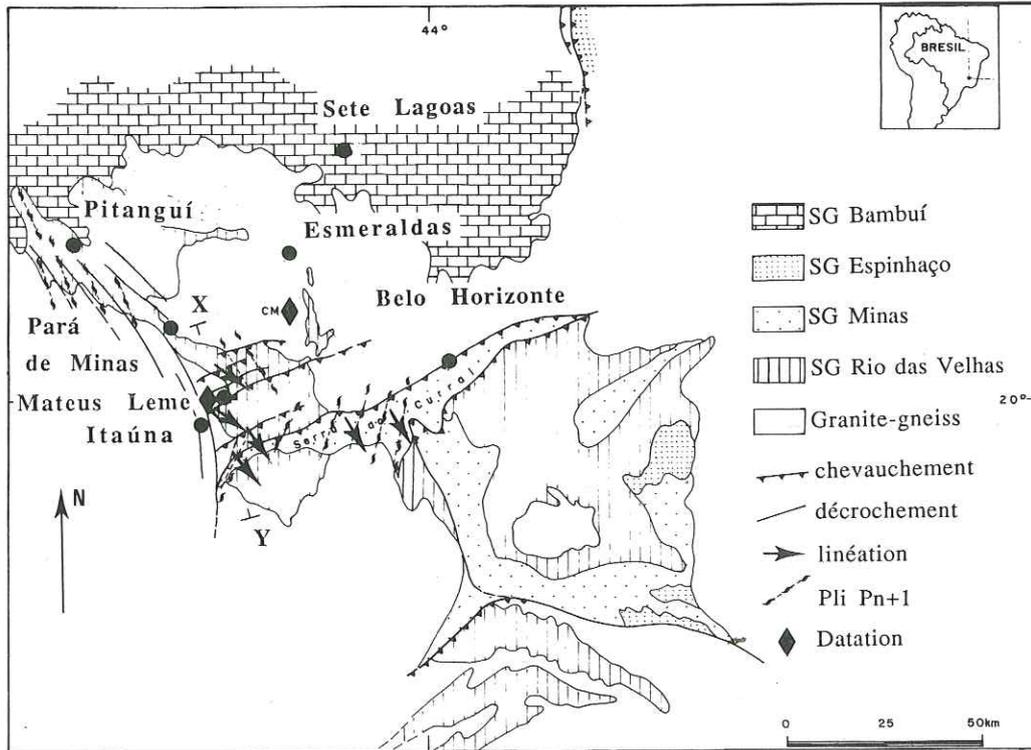


Fig. 1a

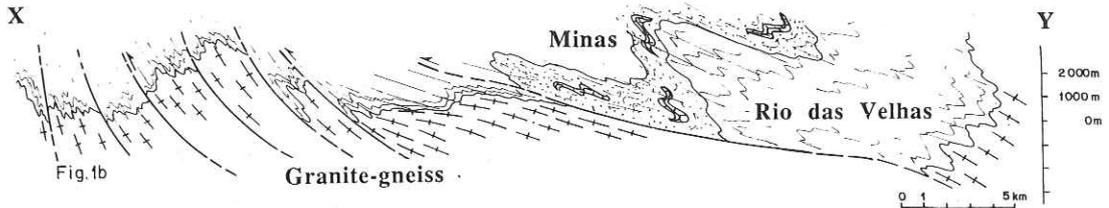


Fig. 1b

Fig. 1. — Carte géologique schématique (1 a) et coupe (1 b) du Nord du « Quadrilátero ferrífero »; SG = supergroupe.

Fig. 1. — Sketch map (1 a) and cross-section (1 b) of the northern part of the "Quadrilátero ferrífero"; SG = supergroup.

GÉOCHRONOLOGIE. — Les données disponibles sont des « isochrones de référence » Rb-Sr, établies sur des échantillons très dispersés. Ce sont :

- un âge voisin de 2800 Ma ($R_i = 0,700$) sur les granito-gneiss situés au Nord de la Serra do Curral [15];
- un âge de 1830 Ma ($R_i = 0,724$) [16] réinterprété ensuite à 2100 Ma ($R_i = 0,715$) [17] pour les migmatites de Sete Lagoas (60 km au Nord du « Quadrilátero ferrífero »);
- un âge de 2400 Ma ($R_i = 0,715$) [18] pour des granites de la région de Para de Minas;
- les dykes basiques en essaim datés entre 1850 et 1650 Ma (K-Ar sur minéraux et roches totales) [19].

Les données nouvelles correspondent à deux échantillons provenant du socle granito-gneissique qui ont été datés par les méthodes U-Pb (zircons), Rb-Sr (roches totales et couple RT-biotite), K-Ar et Sm-Nd. Les techniques analytiques utilisées ont été décrites

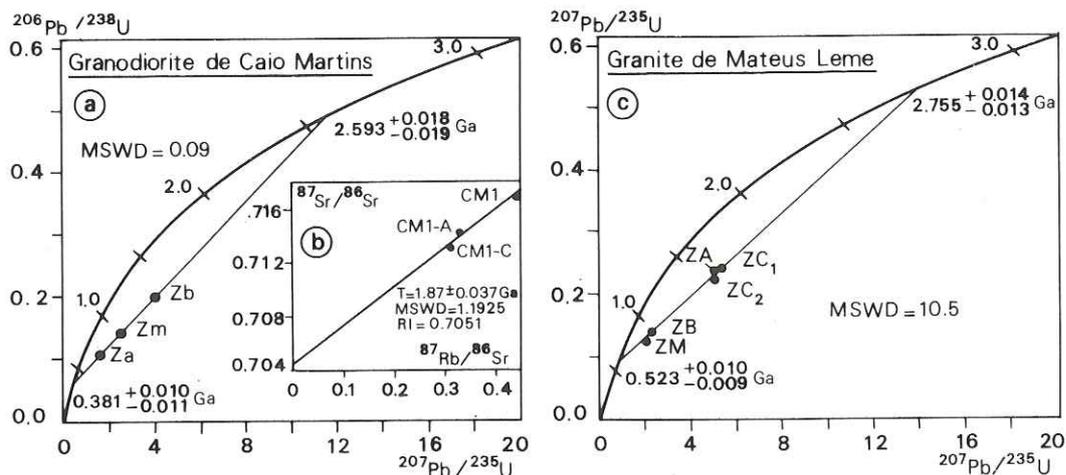


Fig. 2. — Données géochronologiques. (a) Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ et courbe Concordia pour les zircons de la granodiorite de Caio Martins; (b—encart) Isochrone Rb-Sr, roches totales de la granodiorite de Caio Martins; (c) Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ et courbe Concordia pour les zircons du granite de Mateus Leme. Les blancs de plomb sont inférieurs à 1 ng. Les corrections apportées pour le plomb commun sont pour $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18,60$ et pour $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15,50$. L'erreur sur $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ et $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ est de 1,5 %.

Fig. 2. — Geochronological data. (a and c) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ diagrams and Concordia curves—(a) Caio Martins granodiorite; (c) Mateus Leme granite. (b—insert in a) Whole rock Rb-Sr isochron of Caio Martins granodiorite. Total lead processing blanks are smaller than 1 ng. Common lead corrections are $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.60$ and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.50$. Errors on $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ and $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ are 1.5%.

dans plusieurs publications antérieures (par exemple [20]); les données analytiques peuvent être obtenues sur demande auprès des auteurs.

1. La granodiorite de Caio Martins est leucocrate à grain grossier, non déformée; elle contient du plagioclase saussurité, du microcline et de la biotite (fig. 1 a et 2 a). Les zircons, bruns foncé, sont très métamictes. Trois points discordants définissent une discordia (MSWD=0,09; fig. 2 a). L'intercept supérieur à 2593 ± 18 Ma est interprété comme un âge minimum pour la cristallisation des zircons, puisque l'âge modèle Sm/Nd (TDM) est de 2770 Ma qui correspond à la différenciation du protolithe à partir du manteau. Une isochrone Rb-Sr sur roches totales (fig. 2 b) a fourni un âge de 1870 ± 37 Ma ($Ri=0,7051$ et $MSVD=1,19$). Les biotites datées par la méthode K-Ar donnent un âge de $1,773 \pm 30$ Ga. De même, dans le système Rb-Sr, les roches totales seules et les couples roche totale-biotite définissent des âges voisins de 1800 Ma; l'événement transamazonien, très imprécisément daté pour l'instant, a donc provoqué l'homogénéisation du Sr pour les roches totales et les biotites. Cette perturbation est sans doute responsable aussi de l'âge trop jeune indiqué par l'intercept supérieur de la discordia.

2. Le granite de Mateus Leme (fig. 1 a) est folié; il est formé de quartz, de microcline, de plagioclase entièrement saussurité, de biotite partiellement chloritisée, de muscovite, d'épidote et de zircon. La discordia obtenue est de moindre qualité (MSWD=10,5) et les points analytiques sont très discordants (fig. 2 c). L'intercept supérieur indique un âge de 2755 ± 13 Ma, très voisin de l'âge modèle Sm-Nd=2780 Ma. Il n'a pas été possible d'obtenir une isochrone Rb-Sr pour les roches de cette localité. Le calcul des rapports initiaux à 2700 Ma a montré des valeurs plus basses que 0,700. Cela signifie que le système a été perturbé lors de la dernière déformation dont l'âge transamazonien est suggéré par les données Rb-Sr sur le couple RT-biotite (1864 Ma et K-Ar sur biotite (1745 ± 30 Ma)).

3. Les données U-Pb récentes de Machado et coll. [21] confirment l'âge voisin de 2 700 Ma des granitoïdes situées au Nord et à l'Ouest du Quadrilatère ferrifère (zircons à $2\,776 \pm 7/-6$ Ma et $2\,721 \pm 3$ Ma, l'âge archéen des métavolcanites de la base du supergroupe Rio das Velhas (zircon à $2\,776 \pm 23/-10$ Ma), l'âge protérozoïque inférieur du supergroupe Minas (zircons détritiques à $2\,125 \pm 4$ Ma) et surtout l'existence d'une importante remobilisation du socle au Transamazonien (monazites discordantes à 2 022 et 2 030 Ma, et sphène à $2\,059 \pm 6$ Ma).

CONCLUSION. — 1. L'âge archéen du socle granito-gneissique et du supergroupe Rio das Velhas est confirmé (Sm-Nd et U-Pb sur zircon).

2. Ce socle a été profondément réactivé à la faveur d'un événement tectono-métamorphique plus récent, daté entre 2 030 et 2 060 Ma [21] et dont nous avons daté le refroidissement vers 1 800 Ma. Il s'agit probablement de la définition la plus précise de l'événement transamazonien.

3. La tectonique tangentielle d'âge transamazonien apparaît comme l'événement majeur au Nord du « Quadrilatère ferrifère ». Plus au Sud, ses manifestations sont obscurcies par les distensions d'âge protérozoïque moyen [11] et par les déformations d'âge brésilien de la chaîne de Ribeira.

4. La chaîne transamazonienne est loin d'être bien définie, aussi bien pour son âge précis que pour sa localisation et sa cinématique. Le « Quadrilatère ferrifère » constitue, pour l'instant, l'unique région où est réunie une bonne connaissance des trois paramètres essentiels pour l'établissement de cartes tectoniques à grande échelle : (a) l'âge de la croûte, environ 2 800 Ma, (b) l'âge de l'événement tectonométamorphique majeur, 2 030-2 060 Ma et (c) le vecteur cinématique, vers le NW, correspondant à cet événement.

Contribution C.R.P.G. n° 882.

Note remise le 25 mars 1991, acceptée après révision le 12 septembre 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. F. M. DE ALMEIDA, *Rev. Bras. de Geoc.*, 7, 1977, p. 349-364.
- [2] J.-M. BERTRAND, *Can. J. Earth Sci.*, 27, 1990, p. 1382-1393.
- [3] P. SABATE et coll., *Chemical Geol.*, 83, 1990, p. 325-338.
- [4] I. DAVISON et coll., *Prec. Res.*, 42, 1989, p. 1-17.
- [5] E. A. LADEIRA et coll., *Soc. Bras. Geol., Minas Gerais*, 3, 1983, p. 292-293.
- [6] A. L. DE MIRANDA BARBOSA, *Soc. Bras. Geol., Minas Gerais*, 1, 1979, p. 89-99.
- [7] H. D. SCHORCHER, *XXX^e Cong. Bras. Geol. Res.*, 1, 1978, p. 292-293.
- [8] B. B. NEVES et coll., *Rev. Bras. de Geoc.*, 9, 1979?, p. 75-85.
- [9] J. V. N. DORR, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 611A, 1969, 110 p.
- [10] E. A. LADEIRA et J. F. M. DE VIVEIROS, *Soc. Bras. Geol., Minas Gerais*, 4, 1984, 18 p.
- [11] S. MARSHAK et F. F. ALKIMIM, *Tectonics*, 8, 1989, p. 555-571.
- [12] A. W. ROMANO, *Thèse inédite*, Nancy, 1989, 259 p.
- [13] H. A. V. INDA et coll., *Rapport D.N.P.M.*, Brasília, 1984, p. 194-248.
- [14] P. G. HACKSPACHER, *XXXI^e Cong. Bras. Geol.*, 5, 1980, p. 2604-2615.
- [15] W. TEIXEIRA et coll., *Soc. Bras. Geol. Minas Gerais*, 5, 1985, p. 28-44.
- [16] W. H. JR. PINZON et coll., *Annual Progress Report*, Massachusset Inst. of Techn., Dept. of Geol. and Geophysics, 1967, p. 37-39.
- [17] U. G. CORDANI et coll., *Soc. Bras. Geol., Minas Gerais*, 5, 1985, p. 338-347.
- [18] C. BESANG et coll., *Geol. Jahrb.*, 24, 1977, p. 149-179.
- [19] W. TEIXEIRA et coll., *XXXV^e Congr. Bras. Geol.*, Belem, Para, 6, 1988, p. 238.
- [20] S. F. TOTEU et coll., *Precambrian Research*, 37, 1987, p. 71-87.
- [21] N. MACHADO et coll., *Soc. Bras. Geol., Minas Gerais et Brasília*, 9, 1989, p. 1-3.

A. W. R. : *Instituto de Geociências, Universidade Federal Minas Gerais, Av. Antonio Carlos, 6627, 31270 Belo Horizonte, Minas Gerais, Brésil;*

J.-M. B., A. M. et J.-L. Z. : *Centre de Recherches pétrographiques et Géochimiques, B.P. n° 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.*