

## Datation U-Pb sur monazites et zircons du dernier épisode tectono-métamorphique granulitique majeur dans le Sud-Est de Madagascar

Jeannot ANDRIAMAROFAHATRA, Henri de la BOISSE et Christian NICOLLET

**Résumé** – L'étude U-Pb sur monazites et zircons d'un filon de granodiorite à grenat de la formation d'Ihosal du système Androyen (SE de Madagascar) a donné un âge établi par monazites de  $561 \pm 12$  Ma. Cet âge panafricain, datant le métamorphisme granulitique générateur de cette roche, est identique à celui obtenu sur une pyroxénite de l'extrême Sud-Est appartenant au même système, récemment datée à  $565 \pm 15$  Ma sur zircons. Le dernier épisode tectono-métamorphique majeur structurant le Sud-Est du socle malgache, et correspondant à la collision continent-continent terminale impliquant la partie sud de la bordure orientale de la ceinture mobile mozambicaine, doit donc être rattaché à l'événement panafricain *sensu stricto* et non au cycle kibarien.

### Monazites and zircons U-Pb dating of the last major granulitic tectono-metamorphic event in the southeastern part of Madagascar

**Abstract** – U-Pb monazite and zircon dating on the garnet granodiorite dyke from the Ihosal formation (Androyen system, SE of Madagascar) gives an age of  $561 \pm 12$  Ma, identical to the age of  $565 \pm 15$  Ma age recently defined for a pyroxenite of the Tranomaro series belonging to the same Androyen system. These results establish that the widespread granulitic metamorphism observed in this area and the related continent-continent collision implying the south-oriental margin of the Mozambique belt have to be linked to the *sensu stricto* panafrican event instead of the kibarian cycle.

**Abridged English Version** – INTRODUCTION. – Systematic Rb-Sr datings ([1], [2]) have suggested to link the major thermo-tectonic event which has generated the widespread granulitic metamorphism characteristic of Malagasian basement (Fig. 1a) to the Kibarian cycle (1,260-990 Ma), as in the southern part of Mozambique belt ([3], [4]), in Ceylon and India ([5], [6]). But results obtained by U-Pb and K-Ar methods in the Mozambique belt ([7], [8]) and in the South East of Malagasy [9] would rather indicate that formation of these granulitic rocks should be related to the *sensu-stricto* pan-African event (650-500 Ma).

In the Androyan ultra-metamorphic complex ([10], [11]) (Fig. 1b) a widespread metamorphic event produces Quartz-Plagioclase-Kfeldspar-Garnet-Cordierite-Sillimanite-Biotite migmatitic gneisses and Cordierite-Garnet leptynites, whose single foliation is cross-driven by metric dykes of non-deformed leucogranites, granodiorites and charnockites. Petrographic relations between dykes and banded gneisses show that the emplacement of these granitic rocks is sub-contemporaneous with the granulitic migmatization and that they originate in the accumulation of leucosomes ([12], [13]). Therefore, to date this metamorphic event in this area, we have analysed zircons and monazites of a garnet granodiorite sampled at one kilometer East of the town of Ihosal (Fig. 1b).

RESULTS AND DISCUSSION. – Zircons of the sample are divided into two distinct populations (80 and 15 %) and crystals with inherited cores. Monazites, greenish, are euhedral and small sized.

Six granulometric and non-magnetic fractions of zircons and one fraction of monazites have been analysed, using a technique already described [16]. Total common lead blanks are in the range 200-300 pg. Errors affecting the ages are computed for a confidence interval

Note présentée par Jean-Louis LE MOUËL.

of 95% by Ludwig's method ([17], [18]), and errors on  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  are respectively 1.1, 0.9 and 0.2%.

Analytical data (Table) place into a Concordia diagram (Fig. 2) the monazites fraction in a classical ([19], [20], [21]) quasi-concordant position and give a  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age of  $561 \pm 12$  Ma. As a temperature of at least  $550^\circ\text{C}$  is necessary to open the U-Pb system of monazites [22], and there is no petrographic evidence of a thermic event posterior to the granodiorite crystallisation, we attribute this age to the granulitic metamorphism.

The results obtained on the zircons (Table) are more misleading. Experimental points are in "reverse discordance" (Fig. 2) and show a poor alignment (M.S.W.D. = 293) corresponding to ages of around 2,700 Ma by upper and around 470 Ma by lower intercepts. The precision is not sufficient to date the crystallisation of the granodiorite. However, the position of the points in the diagram confirms the pan-African age of the migmatite and is not compatible with a model of interpretation that includes an important thermal event around 1,100 Ma.

CONCLUSION. — U-Pb analysis of monazites and zircons of Ihosy granodiorite allows us to date its crystallisation and the granulitic metamorphism of this area at  $561 \pm 12$  Ma. This age is the same as the age of  $565 \pm 15$  Ma [9] obtained with zircons on a pyroxenite of a calco-magnesian complex of the Tranomaro group [23], Androyan system, 300 km more South (Fig. 1 b).

These data, emphasising the large extension of a circa 560 Ma granulitic metamorphic event in the southern part of the malagasian basement, show that the last major tectonic event responsible of the present structuration of this basement is of *sensu stricto* pan-African, and not kibarian, age. Geodynamical consequences should be that in Shackleton's model [24] the terminal continent-continent collision implying the oriental margin of the mobile zone would not be kibarian in the southern part of the Mozambique belt, but also *sensu stricto* pan-African.

INTRODUCTION. — Les résultats des travaux géochronologiques systématiques, menés par méthode Rb-Sr ([1], [2]), ont permis de proposer que le socle de Madagascar soit une portion de croûte archéenne réactivée au cours de différents épisodes tectono-métamorphiques protérozoïques : 2 600 Ma, 1 260-990 Ma (cycle kibarien), et 860-550 Ma (« mégacycle panafricain » [2]). On rattache de préférence au cycle kibarien l'épisode tectono-métamorphique ayant généré les paragenèses granulitiques caractérisant une grande partie de ce socle (fig. 1 a), car l'événement panafricain est supposé n'avoir atteint que localement des conditions catazonales [1].

Les datations Rb-Sr suggèrent aussi que, de part et d'autre de Madagascar, dans la partie sud de la ceinture mobile mozambicaine ([3], [4]), à Ceylan et en Inde ([5], [6]), l'épisode granulitique terminal soit aussi kibarien. Par contre certains auteurs, s'appuyant sur des résultats obtenus par la méthode U-Pb sur zircons [7] ou la méthode K-Ar [8] proposent que cet épisode métamorphique soit rattaché à l'événement panafricain *sensu stricto* (650-500 Ma).

La même incertitude existe aussi à Madagascar depuis la datation U-Pb sur zircons à  $565 \pm 15$  Ma [9] d'une pyroxénite de l'extrême Sud-Est de l'île (fig. 1 b). Dans le complexe ultra-métamorphique Androyen ([10], [11]) un épisode anatectique à grande extension régionale produit des gneiss rubanés migmatitiques à Quartz-Plagioclase-Feldspath K-Grenat-Cordiérite-Sillimanite-Biotite et des leptynites à Cordiérite-Grenat [12]. Des filons

métriques de roches granitiques non déformées (leucogranites, granodiorites, charnockites) sont sécants par rapport à la foliation unique de ces gneiss. Les relations entre les filons et les gneiss rubanés montrent que la mise en place des roches granitiques est sub-contemporaine de la migmatisation granulitique et que leucogranites et granodiorites se sont formés par accumulation des leucosomes ([12], [13]). En conséquence ces filons peuvent être utilisés pour dater cette migmatisation contemporaine du dernier épisode tectono-métamorphique important de cette région.

L'étude U-Pb sur zircons et monazites a donc été entreprise sur un échantillon de granodiorite à grenat de la carrière « Lalandromo », à 1 km à l'Est de la ville d'Ithosy (fig. 1 b).

DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON. — Cette granodiorite se présente sous la forme d'un filon métrique de même composition minéralogique que les gneiss rubanés de l'encaissement, et est riche en zircons et pauvre en monazites.

Les zircons de l'échantillon se répartissent en trois populations : 80 % des individus sont bruns, trapus et arrondis, et de morphologie typique de cristaux ayant subi un métamorphisme de haut degré; 15 % des zircons, transparents, de couleur rosée à brun clair sont bien cristallisés, leur typologie (S7, S12-17) correspondant à une température de cristallisation de 650-750°C ([14], [15]), en accord avec les températures subies par les gneiss rubanés [13]. Les cristaux restants présentent l'aspect typique de zircons à « cœur hérité ».

Les monazites recueillies dans l'échantillon sont peu abondantes et de très petite taille (50-63  $\mu\text{m}$ ). De couleur verdâtre, elles sont transparentes, sans inclusions et bien cristallisées sous la forme de cristaux tabulaires à faces striées.

RÉSULTATS ANALYTIQUES ET DISCUSSION. — Six fractions granulométriques de zircons non magnétiques au séparateur Frantz et une fraction de monazites ont été analysées. La technique analytique adoptée est celle précédemment décrite par Lafon et Respaut [16]. Les blancs totaux en plomb sont compris entre 200 et 300 pg, et négligeables pour l'uranium. Les erreurs sur les âges sont déterminées pour un intervalle de confiance à 95 % par la méthode de Ludwig ([17], [18]), les erreurs sur  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  et  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  étant respectivement égales à 1,1, 0,9 et 0,2 %.

Les résultats analytiques, reportés dans le tableau, placent dans le diagramme Concordia la fraction de monazites en position quasi-concordante (fig. 2), position classique

TABLEAU

Résultats analytiques. Les compositions isotopiques utilisées pour la correction de plomb commun sont :  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,85$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,54$ ;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37,62$ . NM : zircons non magnétiques au séparateur Frantz.

Analytical data. Isotopic compositions used for common lead corrections are:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.85$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.54$ ;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.62$ . NM: non-magnetic zircons.

Fraction	Poids (mg)	U (ppm)	Pb (ppm)	206/204	206/238	207/235	207/206
Z23 NM	1.12	254	27.6	1 076	.10 885	1.325 2	.088 30
Z22 NM	3.90	419	35.4	3 061	.08 465	1.006 7	.085 25
Z21 NM	4.43	434	41.2	3 491	.09 447	1.114 0	.085 52
Z20 NM	4.76	244	20.4	3 610	.08 386	0.978 1	.084 59
Z19 NM	3.50	276	29.0	1 130	.10 566	1.186 6	.081 45
Z18 NM	4.26	281	25.0	1 705	.09 030	0.967 0	.077 67
Monazites	0.11	261	152.0	542	.07 594	0.616 4	.058 86

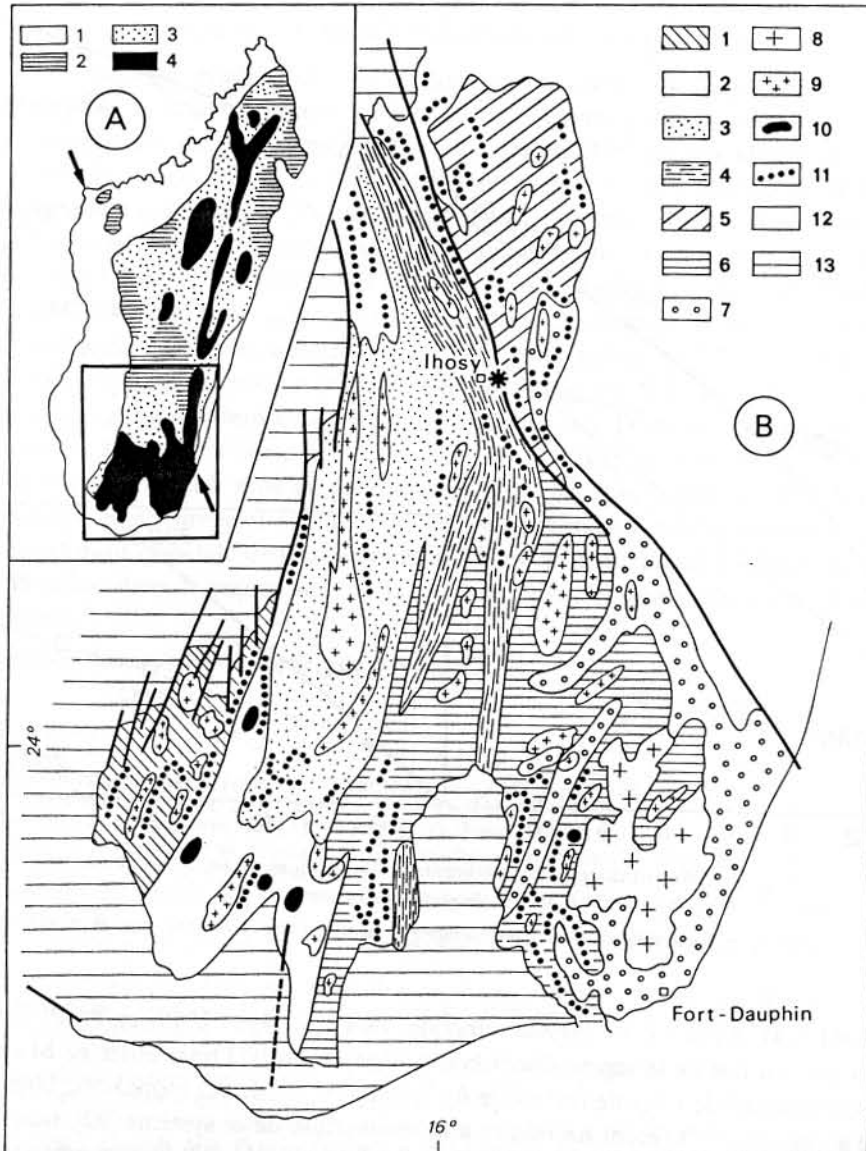


Fig. 1. - A : Carte simplifiée du métamorphisme de Madagascar ([25], modifiée dans le SO [13]). 1, Formations post-précambriennes; 2, Epizone et mésozone; 3, Faciès amphibolite profond; 4, Faciès granulite. B : Carte simplifiée des principales unités pétrographiques du Sud-Est malgache [12]. Séquence du Vohibory : 1, Formation du Vohibory. Séquence du Graphite : 2, Formation d'Ampanihy. Séquence androyenne : 3, Formation de l'Horombe. 4, Formation d'Ihosy. 5, Formation de Tsitondroina. 6, Formation de Tranomaro. 7, Formation de Fort Dauphin. 8, Charnockites et granites. 9, Granites et orthogneiss. 10, Anorthosites. 11, Cipolins et marbres. 12, Précambrien indifférencié. 13, Formations post-précambriennes. \* Granodiorite analysée; ● Pyroxénite de Tranomaro.

Fig. 1. - A : Simplified metamorphic map of Madagascar ([25], modified in the SW [13]). 1, Post precambrian formations; 2, Greenschist and lower to middle amphibolite facies; 3, Upper amphibolite facies; 4, Granulite facies. B : Simplified geological map of the main petrographic series of southern Madagascar [12]. Vohibory sequence: 1, Vohibory formation. Graphite sequence: 2, Ampanihy formation. Androyan sequence: 3, Horombe formation. 4, Ihosy formation. 5, Tsitondroina formation. 6, Tranomaro formation. 7, Fort Dauphin formation. 8, Charnockites and granites. 9, Granites and orthogneisses. 10, Anorthosites. 11, Cipolins and marbles. 12, Undifferentiated precambrian. 13, Post precambrian cover formations. \* Analysed granodiorite; ● Tranomaro pyroxenite.

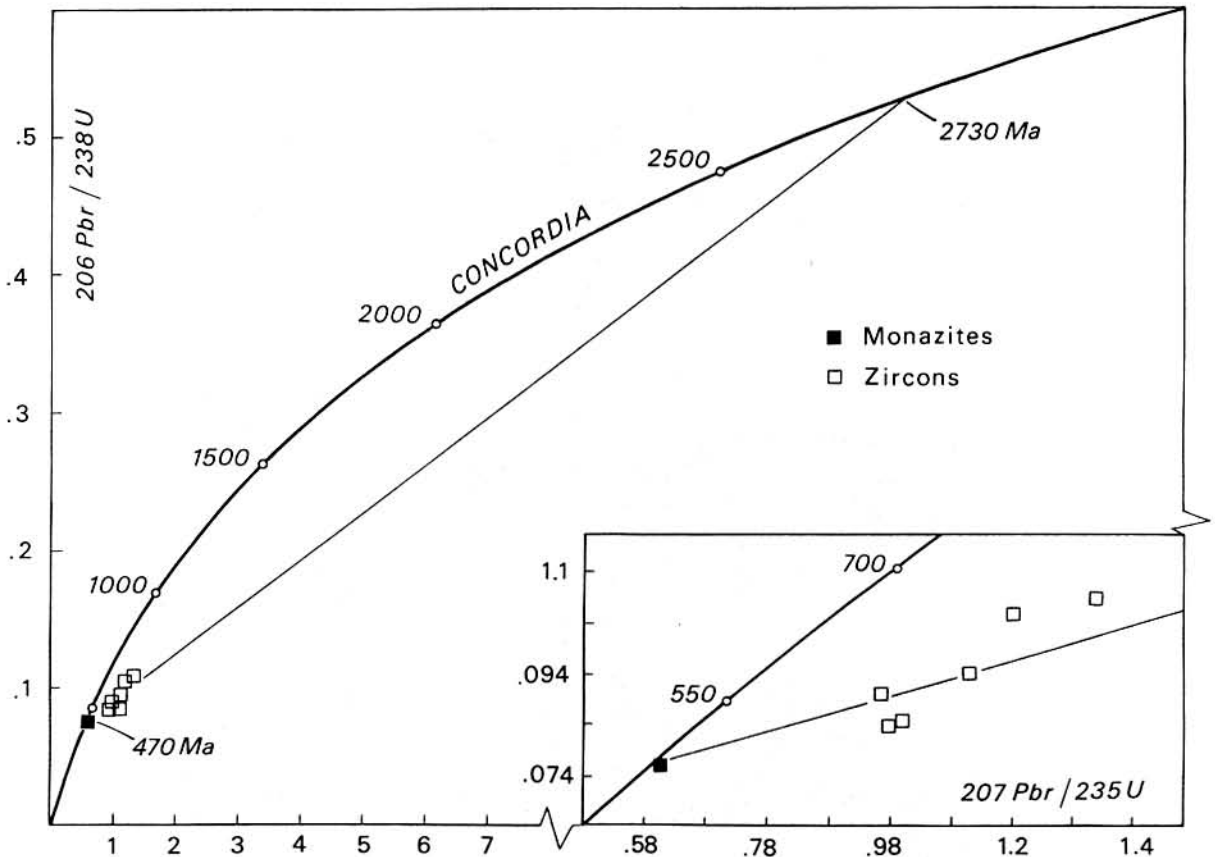


Fig. 2. — Report des points expérimentaux des fractions de zircons et monazites dans le diagramme Concordia.

Fig. 2. — Concordia diagram corresponding to analysed zircon and monazite fractions.

([19], [20], [21]...) pour cette espèce minérale. Des trois âges U-Pb et Pb-Pb correspondants c'est, du fait de la légère discordance, l'âge  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  de  $561 \pm 12$  Ma qui est le plus représentatif de l'âge de fermeture du système U-Pb de ces monazites. Une température d'au moins  $550^\circ\text{C}$  étant nécessaire à la réouverture de ce système [22], nous interprétons cet âge de  $561 \pm 12$  Ma comme celui de la cristallisation de la granodiorite, et donc celui de l'épisode métamorphique granulitique.

Les résultats obtenus sur les points expérimentaux en « discordance inverse » (fig. 2) correspondant aux fractions de zircons, du fait de leur relative dispersion, sont plus décevants. Une régression linéaire pondérée suivant Ludwig [18], incluant la fraction de monazites, fournit un alignement de qualité médiocre ( $\text{MSWD} = 293$ ), correspondant à des âges d'environ 2 700 Ma par intercept supérieur et 470 Ma par intercept inférieur. Ces résultats ne sont pas suffisamment précis pour dater la mise en place de la granodiorite. Ils permettent cependant d'établir que la première génération de zircons est âgée d'au moins 2 000 Ma et qu'elle a été reprise, en même temps que la seconde cristallisait, par un événement thermique très important (discordance inverse des points expérimentaux) d'âge panafricain, que l'on doit relier à celui enregistré par les monazites à  $561 \pm 12$  Ma et donc au métamorphisme granulitique. Il faut aussi noter que la position des points

expérimentaux ne permet pas de concevoir un modèle d'interprétation où interviendrait un événement important vers 1 100 Ma [événement kibarien ([1], [2])].

CONCLUSION. — L'étude U-Pb sur zircons et monazites de la granodiorite d'Ithosy permet de dater sa mise en place à  $561 \pm 12$  Ma, âge fourni par les monazites et corroboré par la position des points expérimentaux des zircons. Cet âge est identique à celui de  $565 \pm 15$  Ma [9] obtenu par la méthode U-Pb sur zircons sur une pyroxénite du complexe calco-magnésien granulitique [23] du groupe de Tranomaro, système Androyen, 300 km plus au Sud (fig. 1 b). Ces données géochronologiques mettent donc en évidence la grande extension d'un épisode granulitique à 560 Ma dans le Sud-Est du socle de Madagascar, dont la limite inférieure est calée à  $516 \pm 10$  Ma par la datation U-Pb sur zircons d'une pegmatite [9]. Ces résultats montrent que dans cette partie de l'île le dernier épisode tectono-métamorphique majeur ayant donné au socle du S.E. malgache sa structure actuelle est d'âge panafricain *sensu stricto*, et non kibarien. D'un point de vue géodynamique, si l'on se réfère au modèle de Shackleton [24] pour qui la ceinture mobile mozambicaine est le résultat d'une série de collisions au proterozoïque supérieur entre des plaques continentales antérieurement séparées, la collision terminale continent-continent impliquant la bordure orientale de la zone mobile à laquelle appartenait Madagascar ne serait pas kibarienne dans la partie sud de la ceinture ([3], [4]), mais elle aussi *sensu stricto panafricaine*.

Note remise le 6 décembre 1989, acceptée le 25 avril 1990.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. VACHETTE, *Rev. Geol. Dynam. et Géogr. Phys.*, 21, 1979, p. 331-338.
- [2] L. CAHEN and N. J. SNELLING, *Clarendon Press*, Oxford, 1984, 512 p.
- [3] G. JOURDE et Y. VIALETTE, D.G.M., B.R.G.M. Orléans, 1980, 75 p.
- [4] R. SACCHI, J. MARQUES, M. COSTA et C. CASATI, *Precambrian Res.*, 25, 1984, p. 141-159.
- [5] E. S. GREW et W. I. MANTON, *Precambrian Res.*, 33, 1986, p. 123-137.
- [6] A. KRÖNER, I. S. WILLIAMS, W. COMPSTON, N. BAUR, P. W. VITANALE et L. R. K. PERERA, *J. Geol.*, 95, 1987, p. 775-791.
- [7] J. J. COOLEN, H. N. PRIEM, E. A. VERDURMEN et R. H. VERSCHURE, *Precambrian Res.*, 17, 1982, p. 31-40.
- [8] P. A. ANDRIESEN, J. J. COOLEN et E. H. HEBEDA, *Precambrian Res.*, 30, 1985, p. 351-360.
- [9] J. ANDRIAMAROFAHATRA et H. DE LA BOISSE, 11<sup>e</sup> R.S.T., Clermont-Ferrand, 1986, p. 3.
- [10] H. BESAIRIE, *Interscience. Publ.*, 3, 1967, p. 133-142.
- [11] H. DE LA ROCHE, *Annales géologiques de Madagascar*, 28, 1963, p. 11-87.
- [12] C. NICOLLET, *Precambrian Research*, 28, 1985, p. 175-185.
- [13] C. NICOLLET, *Thèse d'État*, Clermont-Ferrand, 1988, 315 p.
- [14] J. P. PUPIN et G. TURGO, *Bull. Soc. Fr. Min. Cristal.*, 95, 1972, p. 348-359.
- [15] J. P. PUPIN, *Contrib. Min. Petrol.*, 73, 1980, p. 207-220.
- [16] J. M. LAFON et J. P. RESPAUT, *Bull. Minéral.*, 111, 1988, p. 225-237.
- [17] K. R. LUDWIG, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 46, 1980, p. 212-220.
- [18] K. R. LUDWIG, *U.S. Geol. Surv., Open-File R.E.P.* n° 82-386.
- [19] B. L. GULSON et T. E. KROGH, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 40, 1973, p. 239-252.
- [20] V. KOEPEL, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 43, 1973, p. 55-70.
- [21] M. AFTALION et O. VAN BREEMEN, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 72, 1980, p. 87-98.
- [22] R. A. CLIFF, *J. geol. Soc. London*, 142, 1985, p. 97-108.
- [23] C. RAKOTONDRAZISIMA, *Thèse*, Lyon, 1983, 226 p.
- [24] R. M. SHACKLETON, *Collision tectonics*, Geol. Soc. Special Pub., 19, 1986, p. 329-349.
- [25] G. HOTTIN, *Bull. B.R.G.M.*, 4, 1976, p. 117-153.

J. A. et H. de la B. : *Laboratoire de Géochimie isotopique,*  
*U.R.A. n° 13.71 et Département des Sciences de la Terre,*  
*Université de Montpellier-II, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5;*  
 C. N. : *Département de Géologie, U. A. n° 10, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand.*