

Charriage et déformations de l'unité granulitique des Iforas au cours de l'orogénèse pan-africaine

par Anne-Marie BOULLIER *

RÉSUMÉ. — L'unité granulitique des Iforas, constituée de matériel éburnéen, correspond à une grande nappe de socle pan-africaine dont la géométrie complexe s'explique par l'interférence de plusieurs épisodes de déformation. Dans un premier stade F_1 , cette unité a été charriée vers le NNW, et il en est résulté une semelle mylonitique conservée actuellement sur les bordures nord et est. Cette semelle a été ensuite déformée par une phase F_2 génératrice de plis à plan axial redressé. F_1 et F_2 correspondent au même système de contraintes, à savoir une compression NNW-SSE. Ces phases de déformation s'expriment aussi au cœur de l'unité granulitique des Iforas par des écaillages en gouge attribués à des mouvements différentiels au sein de cette nappe de socle. Une troisième phase F_3 est responsable de la mylonitisation de la bordure occidentale de l'unité granulitique des Iforas, qui correspond à un décrochement à sens senestre probable. Toutes les structures précédentes sont recoupées par une fracturation tardive F_4 associée au dernier stade de collision du bouclier ouest-africain avec la zone mobile pan-africaine.

Mots-clés : Précambrien, Pan-Africain, Granulites, Nappe, Cisaillement, Mali.

ABSTRACT. — *Thrusting and deformation of the Iforas granulitic unit during the Pan-African orogenesis:* The Iforas granulitic unit consists of material metamorphosed during the Eburnean which has subsequently suffered a polyphase deformation during the Pan-African orogenesis. In a first stage, this unit has been thrust towards NNW on a mylonitic basal layer which is preserved along the northern and eastern margins. This mylonitic zone has been deformed by an F_2 phase of folding characterized by subvertical axial planes. F_1 and F_2 correspond to the same kinematic event, that is a NNW-SSE compression. They are expressed too in the core of the granulitic unit by spoon shape shear zones which could be explained by differential movements inside the nappe. The western margin is an F_3 shear zone corresponding to a sinistral strike slip fault. All these structures are cut by late conjugate faults due to the ultimate stage of collision between the West African craton and the Pan-African mobile belt.

Key-words : Precambrian, Pan-African, Granulites, Nappe, Shear zone, Mali.

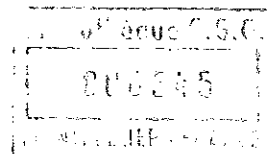
Introduction.

Au sein de la zone mobile pan-africaine affleure une bande sub-méridienne de roches métamorphisées dans les conditions du faciès des granulites. Cette bande longue de plus de 1 000 km a été décrite en Algérie (môle In Ouzzal) par M. Lelubre (1952) puis par P. Giraud (1961) et Y. Le Fur (1966), au Mali par R. Karpoff (1958; unité granulitique des Iforas) et par H. Radier (1957). En 1968, à la suite de ses observations dans le NW du Hoggar, R. Caby a suggéré que ces ensembles granulitiques enracinés étaient limités par des décrochements de grande amplitude (300 km de rejet). Des travaux récents ont montré que, dans l'Adrar des Iforas, les décrochements subméridiens ont des rejets moins importants, et sont postérieurs à une tectonique tangentielle d'âge pan-africain précoce ayant affecté ces granulites (A. M. Boullier *et al.*, 1978). L'unité granulitique des Iforas est interprétée par ces auteurs comme formant une grande nappe de socle (200 km de long sur 30 à 40 km de large); sa géométrie complexe s'explique par l'interférence de plusieurs phases de déformation.

A. — Lithologie et structures anté-pan-africaines de l'unité granulitique des Iforas (U.G.I.).

L'U.G.I. est composée de métasédiments (quartzites impurs, gneiss alumineux, très rares marbres) d'âge archéen probable comme le suggèrent les résultats de G. Ferrara et M. Gravelle (1966) et de C. J. Allègre et R. Caby (1972) sur des matériaux équivalents du môle In Ouzzal (Algérie). Ces métasédiments ont subi un métamorphisme granulitique d'âge éburnéen (2 150 ± 20 m.a., J. R. Lancelot, 1975; J. R. Lancelot *et al.*,

* Centre Géologique et Géophysique, U.S.T.L., (F) 34060 Montpellier Cedex.



Unité granitique des Iforas

Coupes sériées et blocs diagrammes schématiques

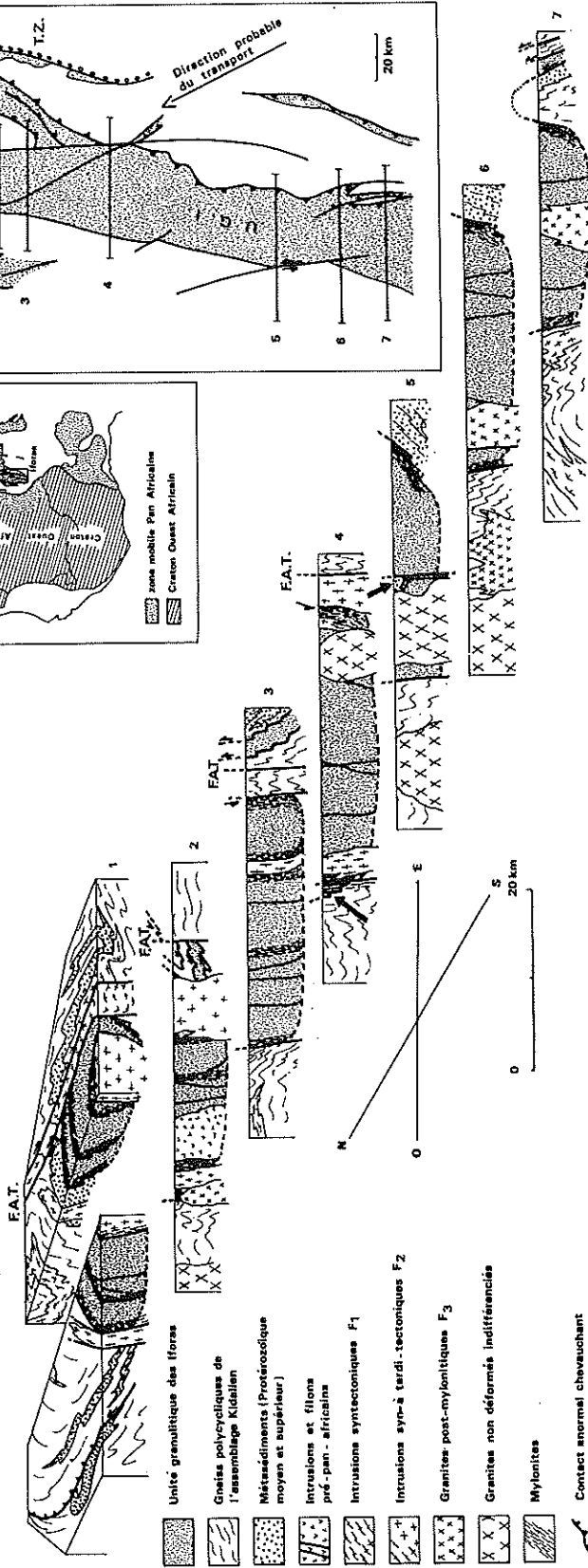


FIG. 1. — Coupes sériées et blocs-diagrammes schématiques de l'unité granitique des Iforas, établis en intégrant les observations de J. M. Bertrand, R. Caby, I. Davison et L. I. Wright (C.G.G.).
 Cartouche : U.G.I. : unité granitique des Iforas — M.I.O. : « môle » In Ouzzal — F.A.T. : faille d'Andjour-Tamaradant — T.Z. : série sédimentaire de Tin Zaouatène

Les zones mylonitiques représentées ont des significations différentes : le long du contact nord et est, elles correspondent à la semelle mylonitique de la nappe de l'U.G.I., charriée sur l'assemblage kidalién au cours de la phase F_1 et remplacée par F_2 (blocs-diagrammes et coupes 2-3). Les zones de déformation internes sont interprétées comme des écaillages dus à la mise en place de la nappe au cours des phases F_1 et F_2 . La bordure occidentale est un décrochement tardif (phase F_3). Noter la position en klippe de l'unité granitique des Iforas et sa forme en gouttière acquise pendant F_3 . L'échelle verticale est approximative, mais l'épaisseur de la nappe est estimée à 5-7 km d'après les paragenèses métamorphiques F_1 de la couverture sédimentaire préservée dans un synclinal (flèche sur la coupe 5). Remarquer le synclinal de semelle mylonitique de l'U.G.I. sur la coupe 4 (flèche).

FIG. 1. — Cross sections and block diagrams of the Iforas granitic unit, including the observations by J. M. Bertrand, R. Caby, I. Davison, L. I. Wright (C.G.G.).

Included map : U.G.I. : Iforas Granulitic Unit — M.I.O. : In Ouzzal block — F.A.T. : Andjour-Tamaradant fault — T.Z. : Tin Zaouatene sedimentary series.

The mylonitic zones represented here have different significations : along the northern and eastern margins it corresponds to the basal mylonitic layer of the nappe which has been thrust on the kidalién assemblage (F_1) and is refolded by F_2 (sections 1 to 3). The internal zones are interpreted as slices due to the nappe emplacement ($F_1 + F_2$). The western margin is a late strike-slip fault (F_3). Note the klippe position of the Iforas granitic unit and its spout shape (F_3 phase). The vertical scale is approximate but the thickness of the nappe is estimated to 5-7 km on the basis of F_1 metamorphic assemblages in the sedimentary cover preserved in a syncline (arrow on section 5). Note the syncline of basal mylonitic layer of the nappe on the section 4 (arrow).

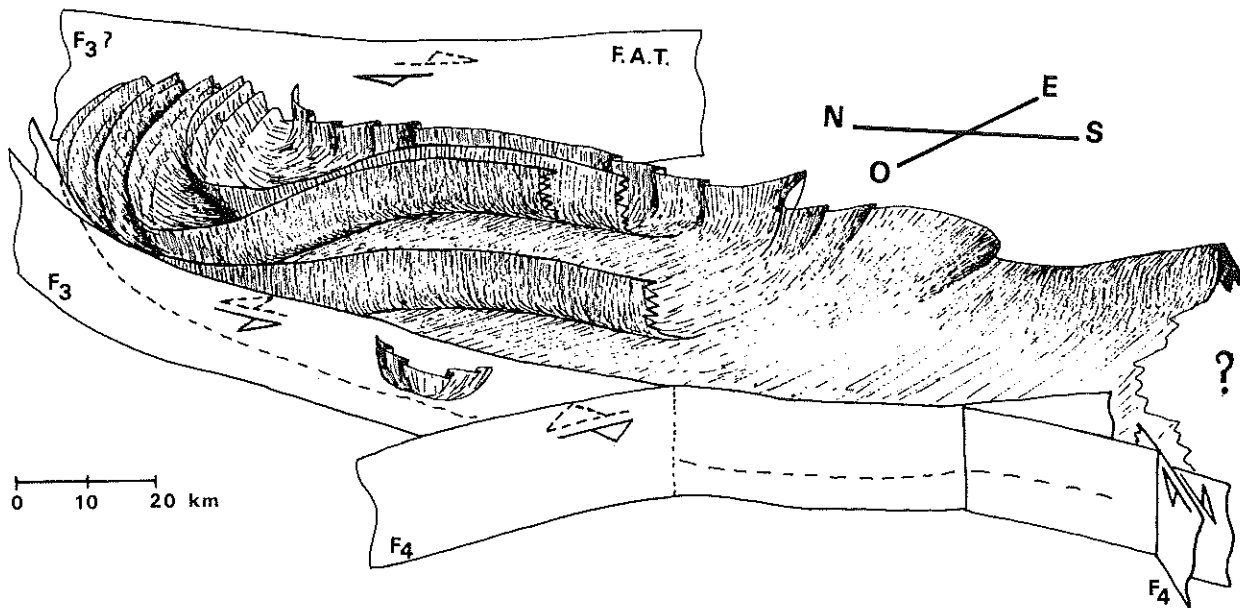


FIG. 2. — Représentation interprétative de la géométrie des zones mylonitiques de phases F_1 et F_2 , en bordure et au sein de l'unité granulitique des Iforas.

Noter la forme en gouge des zones mylonitiques internes. Le « bémittier » situé à l'Ouest de la bordure mylonitique occidentale (F_3) représente un lambeau de la semelle mylonitique (F_1) de la nappe, préservé dans des synclinaux de phases F_2 et F_3 et en position anormale sur l'assemblage kidalien (voir coupe 4, fig. 1).
F.A.T. : faille d'Andjour-Tamaradant.

inédit). Ce métamorphisme granulitique est très comparable à celui décrit par A. Leyreloup (1974) dans le môle In Ouzal où cet auteur observe des minéraux de haute pression en reliques dans une paragenèse de haute température. Deux phases principales de déformation se sont déroulées dans les conditions de ce métamorphisme granulitique. Au cours de la première phase, les métasédiments et des intrusions ultra-basiques ont été dispersés dans de grandes structures isoclinales au sein de gneiss leptynitiques migmatitiques à tendance alcaline. Des intrusions variées, granitiques à dioritiques, se sont mises en place à la fin de la seconde phase de déformation dont résulte une orientation moyenne N 60 des structures.

L'U.G.I. affleurerait déjà avant l'orogénèse pan-africaine. En effet, une série sédimentaire composée d'alternance de grès quartzites et de silts, et d'âge protérozoïque supérieur probable (R. Caby, comm. orale) est discordante sur les granulites (coupe 5, fig. 1). Des sills doléritiques se sont mis en place dans cette série sédimentaire, et sont comparables aux nombreux filons qui recoupent l'U.G.I. Ils témoignent d'un événement magmatique post-ébournéen et pré-pan-africain que l'on peut rapprocher de l'épisode semblable décrit au Hoggar

FIG. 2. — Interpretative drawing of the geometry of $F_1 + F_2$ mylonitic zones along the margins of and inside the Iforas granulitic unit.

Note the spoon shaped internal mylonitic zones. The "fount" on the western mylonitic margin (F_3) is a relict of the F_1 basal mylonitic layer preserved in an $F_2 + F_3$ synform upon the Kidalian assemblage (see section 4 in fig. 1). F.A.T. : Andjour-Tamaradant fault.

nord-occidental par R. Caby (1970) et daté à 780 m.a. par N. Clauer (1976). Nous rattachons aussi à cet événement une intrusion gabbroïque mise en place dans le secteur NW de l'U.G.I. (fig. 1, coupe 2).

B. — Tectonique tangentielle pan-africaine précoce.

Elle est responsable de la mise en place de la nappe dont la morphologie actuelle est représentée schématiquement dans la figure 2. Deux phases de déformation (F_1 et F_2) sont attribuées à cette tectonique et sont antérieures au dépôt de la série de Tin Zaouatène elle-même déformée et métamorphique (A. M. Boullier *et al.*, 1978). Ces deux phases tectoniques représentent donc un stade précoce de l'orogénèse pan-africaine, la première étant datée à 690 ± 10 m.a. au SW de l'U.G.I. (J. Ducrot *et al.*, 1979).

1. — Les déformations au niveau des contacts nord et est.

La tectonique tangentielle (F_1 et F_2) a été mise en

évidence dans la partie nord de l'U.G.I. (coupe 1 et blocs diagrammes, fig. 1) où les granulites et les filons doléritiques post-ébournéens montrent une foliation mylonitique S_1 synchrone d'un métamorphisme dans le faciès des amphibolites. S_1 a un pendage faible vers le Sud ou le Sud-Est et porte une linéation d'étirement N-S à NNW-SSE. Foliation et linéation sont identiques dans l'« assemblage kidalien » sous-jacent : ce dernier a été défini comme résultant de l'évolution tectono-métamorphique commune, en conditions mésozonales profondes, d'un socle granulitique, de sa couverture sédimentaire d'âge protérozoïque moyen à supérieur, et d'intrusions pré- et syn-tectoniques de la phase F_1 (A. M. Boullier *et al.*, 1978). Contrairement à la partie mylonitique frontale de la nappe, les plis isoclinaux et intrafoliaux engendrés par la phase P_1 sont fréquents dans l'assemblage kidalien. La foliation S_1 est reprise par des plis de phase F_2 , de plan axial SW-NE, redressés et déversés vers le NW. Les granulites affleurent fréquemment en synformes de phase F_2 . La géométrie du contact mylonitique de base de la nappe et des plis P_2 , l'orientation de la linéation d'étirement I_1 suggèrent une continuité cinématique entre F_1 et F_2 et un mouvement des nappes vers le NNW (L. I. Wright, inédit; A. M. Boullier *et al.*, 1978).

La bordure orientale de l'U.G.I. a davantage été affectée par les phases de déformation ultérieures. Il est cependant possible de reconstituer la géométrie de la nappe de granulites et des nappes de métasédiments dans le secteur NE (approche interprétative II de A. M. Boullier *et al.*, 1978) malgré le coulissage de 35 à 40 km introduit par le décrochement dextre d'Andjour-Tamaradant. Dans le secteur SE, les observations de I. Davison (1980) ont permis de préciser les contours de l'U.G.I., l'épaisseur de sa semelle mylonitique de phase F_1 , et la position en klippe de l'ensemble des granulites par rapport aux unités sous-jacentes.

Le long de la bordure occidentale, la phase tangentielle précoce est surtout exprimée dans l'assemblage kidalien (foliation générale subhorizontale, linéation d'étirement moyenne N-S, plis isoclinaux couchés dans les métasédiments, etc.). Le contact anormal entre granulites et assemblage kidalien est oblitéré par un décrochement tardif (phase F_3) et par des mouvements verticaux le long de cette faille. Nous avons cependant retrouvé en un point des mylonites de granulites en position anormale sur l'assemblage kidalien, et qui seraient donc des reliques de la semelle mylonitique de la nappe, préservées au cœur de synclinaux de phase F_2 et F_3 (coupe 4, fig. 1; fig. 2).

2. - Déformations dans les parties internes de l'unité granulitique des Iforas.

Nous attribuons à la tectonique précoce $F_1 + F_2$,

certaines zones mylonitiques, rectilignes ou courbes, internes à l'U.G.I., et observées principalement dans sa partie nord. Dans les segments rectilignes orientés N-S à N150, la foliation mylonitique est verticale et la linéation d'étirement horizontale; ces segments peuvent être interprétés comme des décrochements de sens sénestre (rotation des structures, orientation préférentielle des axes C du quartz). Ces zones mylonitiques présentent vers le Nord, une partie concave vers le Sud-Est ou le Sud, ayant un fort pendage vers le Sud, et montrent souvent la superposition de deux foliations : la première de phase F_1 à pendage moyen vers le Sud, et la seconde de phase F_2 déformant S_1 en crochons et indiquant un mouvement en faille inverse chevauchante vers le Nord-Ouest ou le Nord. L'épaisseur de ces zones mylonitiques est variable ainsi que l'intensité de la déformation. Elles affectent du matériel granulitique et des filons doléritiques pré-pan-africains qui sont schistosés, amphibolitisés, et ont subi une rotation de la même façon que les filons impliqués dans les bordures nord et est de l'U.G.I. Certaines de ces zones mylonitiques internes rejoignent les bordures de l'U.G.I. dans la partie nord et centre est, sans qu'il soit possible d'établir des relations chronologiques certaines entre les déformations internes et basales de la nappe.

L'ensemble des granulites et des dykes pré-pan-africains a subi, à des degrés divers, une rétro-morphose dans le faciès des amphibolites (liseré réactionnel de hornblende verte autour du clinopyroxène, transformation de la biotite titanifère en biotite brune et ilménite, amphibolitisation des filons doléritiques, etc.). Ce métamorphisme accompagne la phase F_1 et se poursuit pendant F_2 , puisque les mêmes minéraux recristallisent dans les structures de phase 2. Ces deux phases de déformation et de recristallisation métamorphique peuvent être différenciées géométriquement mais aussi grâce aux diverses intrusions. En effet, des diorites et granodiorites pré-tectoniques de F_1 se sont mises en place dans la bordure SE, des granites post-tectoniques de F_1 et pré-tectoniques de F_2 dans la partie NE. La phase F_2 est scellée à son tour par des granites monzonitiques. Les intrusions sont elliptiques ou allongées et réparties en chapelets dans l'U.G.I., où elles semblent cicatrifier les zones de déformation internes et marginales.

C. - Les décrochements postérieurs à la mise en place de la nappe.

La bordure occidentale de l'U.G.I. a déjà été décrite en détail (A. M. Boullier, 1980). Cette zone mylonitique rectiligne de direction N20, à foliation S_3 verticale et à linéation d'étirement horizontale, réalisées

dans les conditions du faciès des schistes verts, déforme toutes les structures antérieures. Elle est interprétée comme un décrochement de sens senestre probable, à faible composante verticale, et qui s'amortit au Nord. C'est lors de cette phase F_3 qui s'est produite entre 566 ± 8 et 535 ± 5 m.a. (J. R. Lancelot *et al.*, inédit), que la nappe de granulites a acquis sa forme en gouttière d'axe N10 (L. I. Wright, inédit). Il est impossible de préciser les relations chronologiques entre la bordure mylonitique occidentale de l'U.G.I. et la faille dextre d'Andjour-Tamaradant; cette faille est postérieure à F_1 et F_2 , et l'on observe ses effets à différents niveaux structuraux : cataclastes au Nord, plis en crochons au centre, et mylonites au Sud. Au Hoggar nord-occidental, des granites alcalins mylonitisés datés à 580 m.a. par Rb/Sr sont déformés dans le prolongement de cette faille (C. J. Allègre *et al.*, 1972).

Enfin, des failles conjuguées tardives recoupent les mylonites F_3 de la bordure occidentale et sont orientées NNW-SSE (failles senestres), WSW-ENE (failles dextres). Elles s'accompagnent parfois de mylonites formées à basse température (chlorite, séricite). Ces failles se retrouvent dans l'ensemble du bouclier touareg (E. Ball, 1979) et sont à relier au blocage définitif de la zone mobile pan-africaine contre le craton ouest-africain.

Conclusions.

L'U.G.I., nappe de socle à matériel éburnéen, a été mise en place pendant l'orogénèse pan-africaine; les déformations et les intrusions magmatiques connexes sont concentrées dans des zones particulières. L'épaisseur de la nappe est inconnue mais peut atteindre 5 à 7 km d'après les paragenèses métamorphiques de la couverture sédimentaire. Sa provenance reste hypothétique. Des granulites existent à l'affleurement à l'Est de l'U.G.I., le long de la faille de l'Adrar (R. Karpoff, 1958) et disparaissent à ce niveau sous la série discordante de Tin Zaouatène, ainsi que le confirme la gravimétrie (S. Ly, 1979). Mais la zone de racines est inconnue. La nappe s'est déplacée sur une semelle mylonitique. Les déformations internes, gigantesques écaillages en forme de gouge, résultent probablement des différences de vitesse de déplacement au sein de l'édifice (voir fig. 2). Ces mouvements tangentiels vers le NNW appartiennent à un épisode précoce de l'orogénèse pan-africaine et sont très obliques sur la direction de déplacement des nappes du Gourma (R. Caby, ce volume) et du Timétrine (L. I. Wright, inédit). Ils correspondent à une orientation de la contrainte principale NNW-SSE. Puis la direction de cette contrainte a subi une rotation vers le NW-SE (F_3), et enfin vers l'E-

W (fracturation tardive) correspondant au blocage définitif de la collision entre le craton ouest-africain et la zone mobile pan-africaine (R. Black *et al.*, 1979), elle-même déjà indurée au cours des stades précoces de son évolution.

Remerciements — Je remercie vivement M. Gravelle, R. Caby et J.M. Bertrand pour leurs critiques constructives, ainsi que L.I. Wright et I. Davison pour leurs discussions fructueuses. Les missions effectuées en Adrar des Iforas ont bénéficié de l'aide de la Direction Nationale de la Géologie et des Mines du Mali, et ont été financées par le Centre National de la Recherche Scientifique.

RÉFÉRENCES

- ALLÈGRE C. J. et CABY R. (1972). — Chronologie absolue du Précambrien de l'Ahaggar occidental. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, (D), t. 275, p. 2095-2098.
- BALL E. (1980). — An example of very consistent brittle deformation of a wide intracontinental zone: late Pan-African fracture system of the Tuareg and Nigerian shield; structural implications. *Tectonophysics*, sous presse.
- BLACK R., CABY R., MOUSSINE-POUCHKINE A., BAYER R., BERTRAND J. M., BOULLIER A. M. et LESQUER A. (1979). — Evidence for late precambrian plate-tectonics in West Africa. *Nature*, vol. 278, p. 223-227.
- BOULLIER A. M. (1980). — A preliminary study on the behaviour of brittle mineral in a ductile matrix: example of zircons and feldspars. *J. Struct. Geol.*, sous presse.
- BOULLIER A. M., DAVISON I., BERTRAND J. M. et COWARD M. (1978). — L'unité granulitique des Iforas: une nappe de socle d'âge pan-africain précoce. *Bull. Soc. géol. Fr.*, t. XX, n° 6, p. 877-882.
- CABY R. (1968). — Une zone de décrochements à l'échelle de l'Afrique dans le Précambrien de l'Ahaggar occidental. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), t. X, p. 577-587.
- CABY R. (1970). — La chaîne pharusienne dans le Nord-Ouest de l'Ahaggar (Sahara central, Algérie); sa place dans l'orogénèse du Précambrien supérieur en Afrique. Thèse Doct. Etat, Univ. Sci. Montpellier et *Publ. Sous-Direction Géologie*, Alger, n° 47, nouvelle série.
- CABY R. (1979). — Les nappes précambriennes du Gourma dans la chaîne pan-africaine du Mali. *Rev. Géol. dynam. Géogr. phys.*, ce volume.
- CABY R. et BOULLIER A. M. (1977). — Le rôle granulitique des Iforas (Mali). Nature et comportement au cours de l'orogénèse pan-africaine. *5^e Réunion. ann. Sci. Terre, Rennes*, p. 124.
- CLAUER N. (1976). — Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires. Application à la géochronologie de la couverture du craton ouest-africain. Thèse d'État, Univ. Strasbourg.
- DAVISON I. (1980). — A tectonic, petrographical and geochronological study of pan-african belt in the Adrar des Iforas and Gourma (Mali). Ph. D., Leeds.

- DUCROT J., de LA BOISSE H., RENAUD U. et LANCELOT J. R. (1979). - Synthèse géochronologique sur la succession des événements magmatiques pan-africains au Maroc, dans l'Adrar des Iforas et dans l'Est Hoggar. 10^e Coll. Géol. afr. Montpellier, résumés p. 40-41.
- FERRARA G. et GRAVELLE M. (1966). - Radiometric ages from Western Ahaggar (Sahara) suggesting an Eastern limit for the West African craton. *Earth Planet. Sci. Letters*, vol. 1, p. 319-324.
- GIRAUD P. (1961). - Les charnockites et les roches associées du Suggarien à faciès In Ouzzal (Sahara algérien). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), t. III, p. 165-170.
- KARPOFF R. (1958). - La géologie de l'Adrar des Iforas. Thèse, Paris, 1958; *Publ. B.R.G.M.*, Dakar, n° 30, 1960.
- LANCELOT J. R. (1975). - Les systèmes U-Pb, chronomètres et traceurs de l'évolution des roches terrestres. Thèse Etat, Paris VII, 280 p.
- LE FUR Y. (1966). - Nouvelles observations sur la structure de l'Antécambrien du Hoggar Nord-Occidental (Région d'In Hihau). Thèse 3^e cycle, Nancy, 109 p.
- LELUBRE M. (1952). - Recherches sur la géologie de l'Ahaggar central et occidental (Sahara central). Thèse Etat, Fac. Sci. Paris, in *Bull. Serv. Carte géol. Algérie*, Alger, 2^e série, n° 22.
- LEYRELOUP A. (1974). - Évolution plurifaciale du métamorphisme granulitique dans les paragneiss archéens du môle In Ouzzal (Hoggar, Sahara algérien). *2^e Réunion. ann. Sci. Terre*, Nancy, p. 261.
- LY S. (1979). - Étude gravimétrique de l'Adrar des Iforas (Nord-Est Mali). Thèse 3^e cycle, Montpellier, 107 p.
- RADIER H. (1957). - Contributions à l'étude géologique du Soudan oriental (A.O.F.). Le Précambrien saharien au Sud de l'Adrar des Iforas. Thèse, in *Bull. Serv. géol. Prosp. min. A.O.F.*, Dakar, 26, t. 1.
- WRIGHT L. I. - The pattern of deformation and movement during the Pan-African in the Adrar des Iforas of Mali. Soumis à *Bull. Soc. géol. Fr.*

Manuscrit déposé le 27 août 1979,
accepté le 5 janvier 1980.