

## Arguments géophysiques et géologiques en faveur de manifestations volcaniques récentes dans la région du lac Faguibine (Mali)

Tihama EL ABBASS, Alain PERSON, Martine GÉRARD, Yves ALBOUY, Madeleine SAUVAGE, Jean-François SAUVAGE et Didier BERTIL

**Résumé** – L'interprétation de données gravimétriques obtenues dans la région du lac Faguibine (Mali) a été confrontée à des observations caractéristiques d'une activité tectonique récente, à la localisation des séismes actuels, et à de nouvelles informations sur la nature volcanique des Daouinites. Ceci nous conduit à proposer un modèle gravimétrique correspondant à un corps dense d'origine volcanique, large d'une centaine de kilomètres situé à 2 ou 3 km sous la surface.

### Geophysical and geological arguments for recent volcanic events in Faguibine lake zone (Mali)

**Abstract** – The interpretation of gravimetric data obtained in Faguibine lake area (Mali) was compared with observations characteristic of recent tectonic activity, current earthquakes and new results on the volcanic origin of Daouinites. We present a new gravity model which corresponds to a 100 km wide, superficial volcanic body 2 or 3 km below the surface.

**Abridged English Version** – We present and discuss the results of geophysical and mineralogical data recorded in the sector of Faguibine lake in the loop of the Niger (Mali) (*fig. 1 a*).

The Bouguer anomaly map (*fig. 1 b*) is characterized by long-wavelength positive anomalies, one of which (the Gourma anomaly) was interpreted as a Precambrian aulacogene (Moussine-Pouchkine and Bertrand-Sarfati, 1978; Lesquer and Moussine-Pouchkine, 1980). The northern part of this anomaly shows linear series trending WSW-ENE. The short-wavelength western positive anomaly limits the northern Nara trough. This anomaly is superposed on the Faguibine lake and located along the northern edge of a large-scale lineament, trending WSW-ENE, of the African plate (Bayer and Lesquer, 1978; Simon *et al.*, 1982; Guiraud *et al.*, 1985) (*figs. 1 a* and 2). These fractures have been activated since the Pan-African orogeny (Bellion *et al.*, 1984) and probably are at present (Klein, 1979).

We chose two profiles F1, F2 perpendicular to the anomalies for our interpretation. The residual anomalies are studied by spectral analysis (Spector and Grant, 1970; Gérard and Grivau, 1972) and by inverse methods (Sabatier, 1977) – ideal body computation (Safon *et al.*, 1977; Parker, 1974), to constrain the depth, the density and the geometrical features of perturbing bodies. Then a 2D model (Talwani *et al.*, 1959) is performed from the results obtained by the foregoing methods. The computed ideal body, along the profiles F1, F2, has a mean density contrast of 0.26, *i.e.* a minimal density of 2.96 and a mean thickness of 4 km. The 2D model displays a dense body which extends laterally along 100 km and vertically from 2 to almost 6 km for F1 and from 3 to 7 km for F2 (*fig. 3*). These intracrustal bodies may be interpreted as a basal crustal rock or a mantle intrusion.

The west African craton was always considered as tectonically stable since 2 Ga. In our studied area, a Quaternary tectonic has been invoked to explain the Holocene eastward shift of the Niger river (Riser *et al.*, 1986; Karpoff, 1989), and movements along fractures (NS, WSW-ENE) in the area of Faguibine lake (Urvoy, 1942; Sauvage and Sauvage, 1992). In

Note présentée par Théodore MONOD.

1957, a scoriaceous and vesicular rock injected in the diatomaceous lake deposits was discovered (Monod and Palausi, 1961). It is dated from Pleistocene to Holocene. The mineralogical study of recent sampling by X-ray diffraction displays a lava composition. The volcanic nature and magmatic origin of this rock is confirmed.

The earthquake of 1983 in Guinea, indicating a dextral strike-slip component, confirms the present activity of these fractures. This is in operation since the Maastrichtian, in the area (Guiraud *et al.*, 1987). At the beginning of the century, earthquakes were felt in the loop of the Niger (Hubert, 1915). Recently, between 1988 and 1991, the Gourma Basin was affected by 12 earthquakes; two of them were located to the North, near Nara trough, west of lake Faguibine (Bertil, 1991). Seismic observation shows that the seismic activity is located near the fault trace (*fig. 2*).

The gravity model obtained corresponds to a dense body. The high contrast of density between the body and the sedimentary rocks, cannot be attributed to a granitic body (Crenn, 1957). Therefore, we suggest an intrusive model. The mineralogical results confirm the hypothesis of an intrusive volcanic body.

1. INTRODUCTION. — Au Mali, le Nord de la boucle du Niger et sa prolongation vers l'Ouest de Tombouctou, à travers la région des lacs et du fossé de Nara, représentent l'une des zones de fracturation les plus importantes de la plaque Africaine (*fig. 1 a et 2*). Cette zone, Faguibine-Goundam, s'inscrit dans une grande structure linéamentaire WSW-ENE : ligne Guinée-Adrar, (Bayer et Lesquer, 1978) ou couloir Guinéo-Nubien (Simon *et al.*, 1982; Guiraud *et al.*, 1985). Il s'agit d'accidents majeurs qui ont joué à plusieurs reprises au moins depuis l'orogénèse panafricaine (Bellion *et al.*, 1984) et qui pourraient avoir une activité actuelle (Klein, 1979). Cette portion du couloir linéamentaire se superpose à une zone d'anomalies gravimétriques positives. Le parallélisme entre les directions gravimétriques et structurales est particulièrement bien marqué entre Tombouctou-Faguibine et le fossé de Nara.

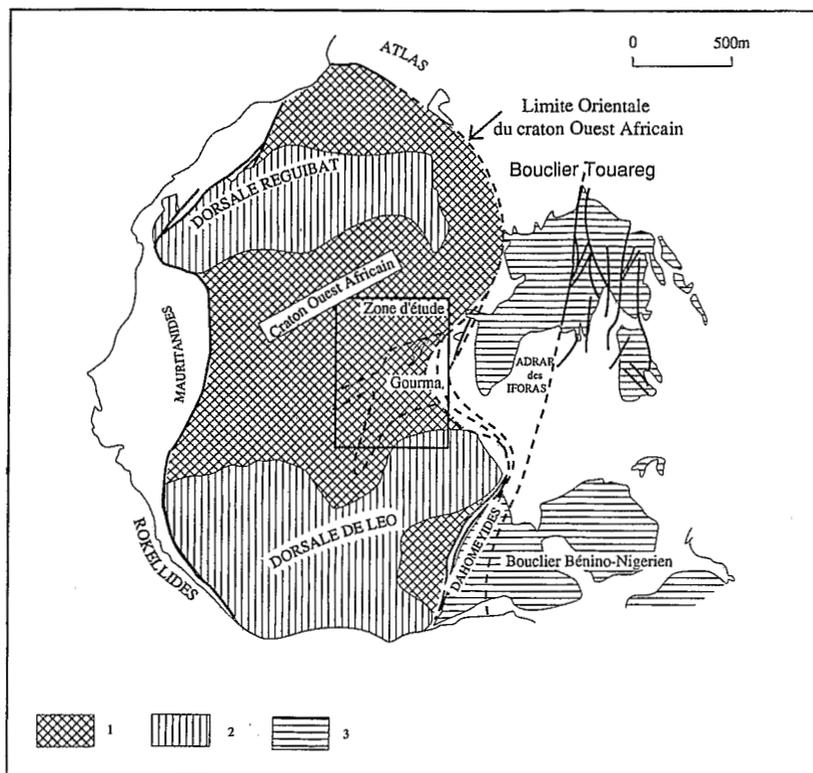
L'objectif de notre étude est d'interpréter les anomalies gravimétriques de ce secteur en relation avec les données géophysiques et pétrographiques récentes.

2. INTERPRÉTATION DES DONNÉES GRAVIMÉTRIQUES. — Une nouvelle carte des anomalies de Bouguer de la boucle du Niger est présentée sur la figure 1 *b*. Elle est caractérisée par une anomalie positive de plus de 250 km de large, superposée au bassin du Gourma, dont les directions montrent une bonne concordance avec les grands accidents linéaires répertoriés en surface. Les interprétations géologique (Moussine-Pouchkine et Bertrand-Sarfati, 1978) et géophysique (Lesquer et Moussine-Pouchkine, 1980) de cette anomalie

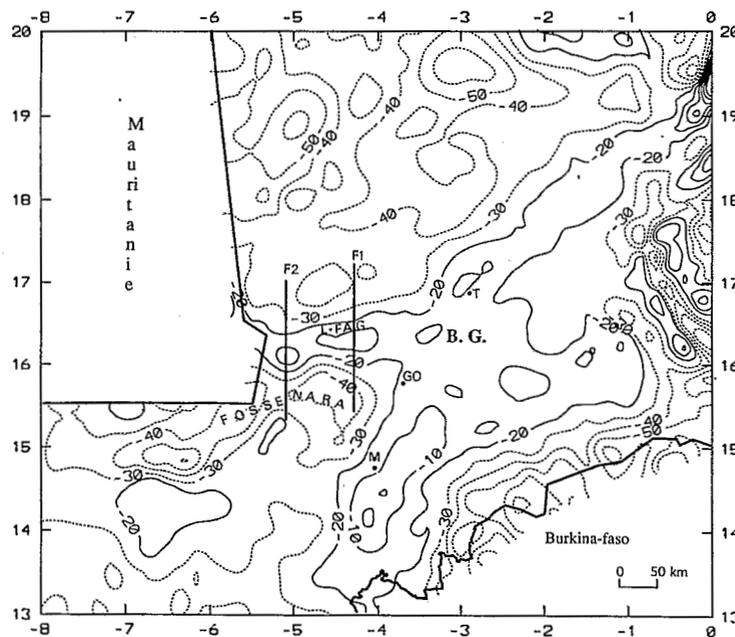
#### LÉGENDE DE LA FIGURE 1

Fig. 1. — *a*. Situation de la boucle du Niger en Afrique de l'Ouest. 1-2 : Craton Ouest Africain (1 = couverture sédimentaire du Protérozoïque supérieur du craton Ouest Africain; 2 = Bouclier éburnéen ou archéen); 3 : Domaine Pan Africain. *b*. Carte gravimétrique des anomalies de Bouguer de la boucle du Niger. F1, F2 profils interprétés. T = Tombouctou, GO = Goundam, L. FAG = Lac Faguibine, BG = Bassin du Gourma, M = Mopti.

Fig. 1. — *a*. Situation of the loop of the Niger in West Africa. 1-2: West African craton (1 = Upper proterozoic sedimentary cover of the West African craton; 2 = Eburnean or archean basement); 3: Pan-African domain; *b*. Bouguer anomaly map of the loop of Niger. F1, F2 interpreted profiles. T = Tombouctou, GO = Goundam, L. FAG = Faguibine lake, BG = Gourma basin, M = Mopti.



(a)



(b)

Fig. 1

conduisent à considérer le bassin du Gourma comme un aulacogène du Précambrien supérieur. Les roches denses qui lui sont associées se seraient mises en place lors de l'océanisation de la marge est du craton ouest africain. Ses limites au Nord et au Sud correspondent à des accidents WSW-ENE du Précambrien supérieur qui ont guidé la subsidence du bassin (Bayer et Lesquer, 1978; Lesquer et Moussine-Pouchkine, 1980). A l'Ouest, cette anomalie se divise en deux branches positives : l'une orientée NE-SW au Nord du fossé de Nara passant par Ras el Ma; l'autre NNE-SSW à l'Ouest de Mopti. Cette dernière est caractérisée par des anomalies discontinues de courte longueur d'onde (120 km) et de faible amplitude ( $-10$  mGal). Ces tronçons sont décalés par des accidents

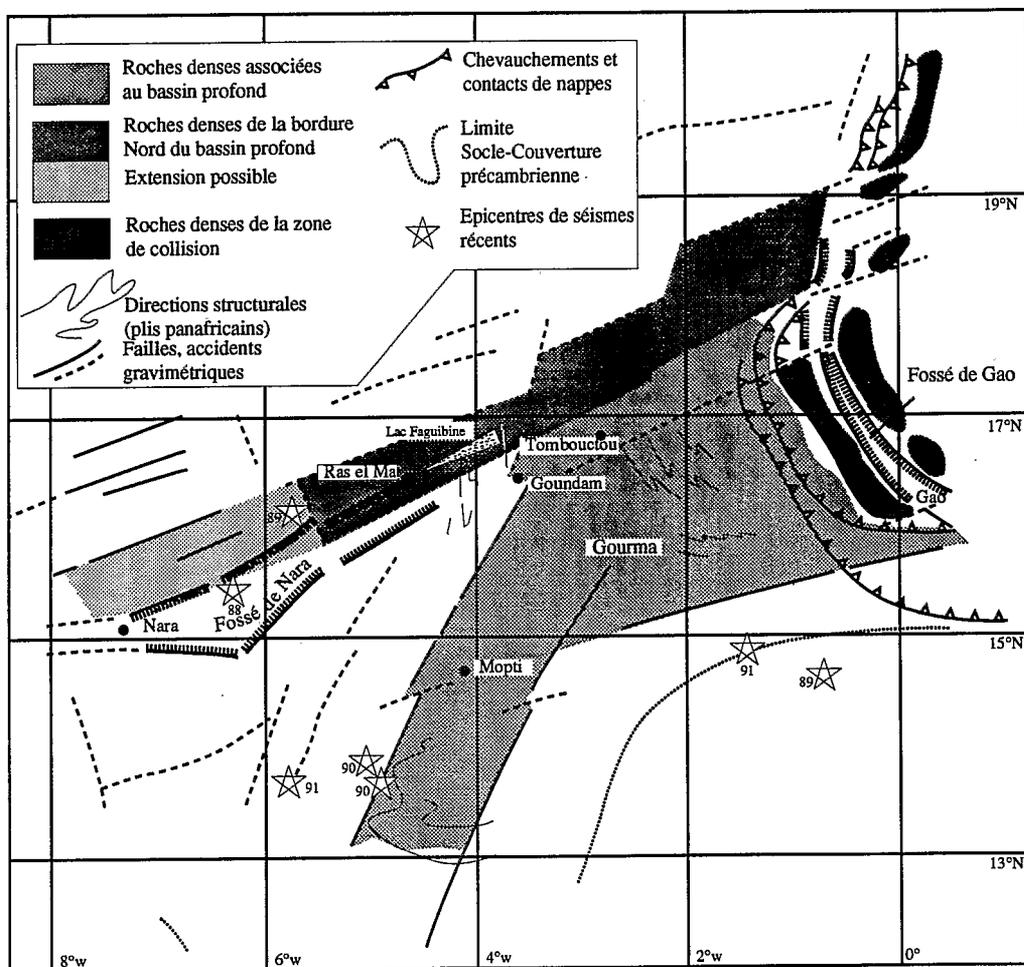


Fig. 2. — Schéma interprétatif de la carte gravimétrique (d'après A. Lesquer, inédit), et localisation des principaux séismes récents.

Fig. 2. — Interpretative sketch of gravimetric map (A. Lesquer unpublished work), and location of recent earthquakes.

subméridiens sénestres dont le plus important passe par Goundam (fig. 2). L'anomalie principale de cette bande, située au NW de Goundam, se superpose au lac Faguibine.

Pour interpréter cette anomalie, nous retirons à l'anomalie de Bouguer une tendance régionale définie de façon analytique par ajustement d'un polynôme de degré 3. Cette anomalie régionale se réduit à un plan très peu incliné vers le NE (de  $-36$  mGal au

Nord à  $-33$  mGal au Sud). L'anomalie résiduelle est caractérisée par une longueur d'onde de 120 km, une forte amplitude (35 mGal) et par l'absence de corrélation avec la géologie de surface.

L'interprétation est réalisée au moyen de méthodes fréquentielle (analyse spectrale), inverse (programmation linéaire) et directe (modélisation 2D des structures). Ces méthodes sont appliquées sur deux profils (F1 et F2) subméridiens perpendiculaires à la structure (*fig. 1 b*). L'estimation de la profondeur moyenne des masses perturbatrices est déduite de l'analyse spectrale des profils d'anomalie résiduelle. Cette technique utilisant les propriétés du spectre d'énergie des anomalies gravimétriques, met en évidence sur ces spectres, des droites dont la pente est proportionnelle à la profondeur moyenne des sources (Spector et Grant, 1970; Gérard et Grivau, 1972). Pour définir certaines limites à nos modèles (densité; géométrie et épaisseur du corps), nous inversons les données (Sabatier, 1977), à l'aide de la programmation linéaire (Safon *et al.*, 1977) : parmi les solutions admissibles compatibles avec les anomalies observées, nous calculons la solution du corps idéal qui correspond au corps homogène de plus petite densité possible (Parker, 1974).

D'après les valeurs des paramètres obtenues par la programmation linéaire et l'analyse spectrale, on peut calculer l'effet gravimétrique dû à une structure perturbatrice géologiquement vraisemblable. La modélisation directe à deux dimensions (Talwani *et al.*, 1959) ajuste au mieux l'anomalie calculée à l'anomalie observée en modifiant les paramètres de densité et de géométrie du corps perturbateur. L'analyse spectrale appliquée sur les profils, situe l'interface perturbatrice à une profondeur de 3,2 à 6,9 km pour le profil F1 et de 2,1 à 5,5 km pour le profil F2. L'étude des solutions du corps idéal a été conduite en fixant un contraste de densité maximum de 0,4, une erreur de 2 mGal sur les données et une division du domaine en prismes de  $5 \times 2$  km. Les solutions calculées révèlent un contraste minimum de densité de 0,26. Ce corps est large d'une centaine de kilomètres et épais de 4 km. En adoptant ce contraste, on obtient par modélisation 2D un corps dont le toit pourrait se trouver entre 2 et 3 km de la surface (*fig. 3*).

3. PREUVES D'UNE ACTIVITÉ RÉCENTE. — Différents auteurs signalent l'existence sur le craton ouest africain de mouvements tectoniques récents ou actuels : des déformations actuelles peuvent causer les anomalies observées des crues du fleuve Niger (Klein, 1979); un rejeu de failles ENE (Riser *et al.*, 1986) est invoqué pour rendre compte de la position soulevée d'une quinzaine de mètres d'une plage de l'île de Taguilem au NE du lac Faguibine. La modification récente du cours de ce fleuve mise en évidence en examinant le gauchissement des cuirasses fini-tertiaires ou quaternaires de la région de Gao pourrait être d'origine tectonique (Karpoff, 1989; Urvoy, 1942).

De même, dans les environs proches du lac, des cuirasses plus récentes affectées par des accidents cassants ont été observées (Sauvage et Sauvage, 1992). En 1957, dans le fond desséché du lac Daouana Keïna, aux environs du puits d'In Tehini, une roche légère, scoriacée et vacuolaire est découverte (Monod et Palausi, 1961). Elle se trouve injectée sous forme de micro-dykes dans des sédiments lacustres diatomitiques (parfois à *Melania*), d'âge pleistocène à holocène. Elle les recouvre, par endroit, de monticules de quelques décimètres de hauteur et d'une superficie toujours inférieure au mètre carré. L'hypothèse d'une activité volcanique fumerollienne de haute température a été retenue par ces auteurs pour expliquer la mise en place de cette « écume » bulleuse. Cependant, une autre hypothèse a été émise pour justifier la mise en place de ces scories (Marinelli, 1966). Elle invoque plutôt un processus de combustion au contact de l'air, de gaz résultant de la

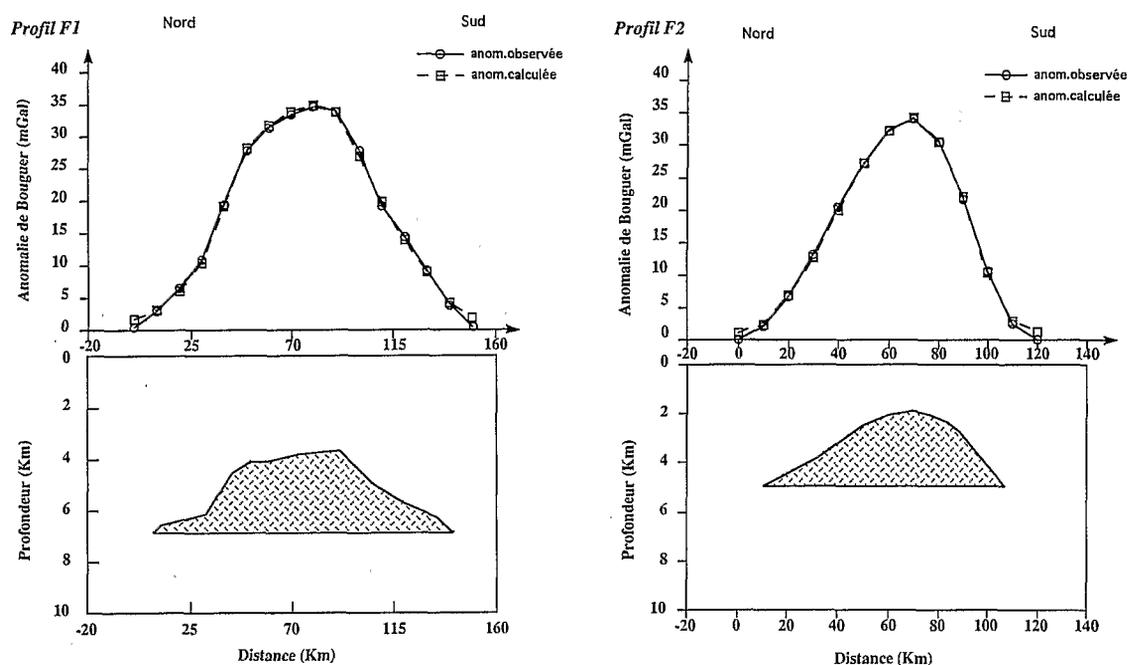


Fig. 3. — Modèles gravimétriques à deux dimensions, modélisation directe.

Fig. 3. — Two-dimensional gravity models.

décomposition de la matière organique accumulée en milieu anoxique lacustre. Nous avons repris l'étude minéralogique de ces roches et de leur contexte par diffraction des rayons X, la texture très vacuolaire des prélèvements se prêtant mal à l'analyse pétrographique en lame mince. La roche scoriacée est essentiellement constituée de cristobalite, de quartz, de feldspaths et de pyroxènes. Il s'agit vraisemblablement d'un mélange d'écume de lave attesté par la présence de sanidine et de pyroxènes et de sédiment lacustre. La fraction minéralogique d'origine sédimentaire (prise dans la scorie) est composée de quartz éolien lié à l'environnement dunaire, et de cristobalite provenant de la recristallisation sous l'effet d'une forte élévation de température, d'opale amorphe — opale A — (Jonse et Segnit, 1971). Ce minéral, constituant les frustules des diatomées, est le composant dominant des sédiments de ce type en milieu lacustre saharien holocène. L'origine fumerollienne, donc volcanique, de ces scories (Monod et Palausi, 1961), se trouve ainsi confirmée. Le mécanisme « combustion de gaz issus de la décomposition de matière organique », qui paraît souvent responsable de zones de rubéfaction dans les calcaires diatomitiques lacustres du Sahara méridional, ne semble pas devoir être retenu ici pour justifier de la présence, en surface, de minéraux tels que feldspaths et pyroxènes. La composition minéralogique de l'encaissant sédimentaire situé au plus près de la roche scoriacée présente : cristobalite, quartz (dont l'origine est semblable à ceux de l'échantillon précédent), amphibole et mullite (minéraux caractéristiques d'un métamorphisme de contact sous la pression atmosphérique). La mullite provenant de la cuisson d'aluminosilicates sédimentaires détritiques (à plus de 500°C sous la pression atmosphérique) est caractéristique d'un sédiment cuit par une émission volcanique (porcelanite). En s'éloignant progressivement des petits dômes de scories, les assemblages minéralogiques évoluent : cristobalite, quartz et hématite puis opale A et hématite. L'hématite est

fréquente dans les dépôts hydrothermaux. L'opale A, production biologique des diatomées, montre que l'élévation de température est limitée à la périphérie des scories. L'origine magmatique de micro-dykes des Daouņas ne semble donc plus faire de doute.

On sait de plus qu'une activité tectonique post-hercynienne s'est produite dans toute l'Afrique de l'Ouest, même à l'intérieur du craton. Le séisme de Guinée de décembre 1983, montre la permanence d'un jeu en décrochement dextre depuis le Maestrichtien, jusqu'à l'Actuel (Guiraud *et al.*, 1987). Au début du siècle, une dizaine de séismes ont été ressentis par les populations dans le delta intérieur du Niger, la plupart près du fleuve dans la région de Ségou (Hubert, 1915). Le plus important aurait eu lieu à Tombouctou en 1905. On constate, depuis 1984 et surtout depuis 1988, une activité sismique notable dans la région du Gourma : 12 séismes de magnitude comprise entre 2,8 et 4,2 ont été enregistrés à l'observatoire de Lamto en Côte-d'Ivoire (Bertil, 1991). Les épicesentres de ces séismes se disposent au voisinage des tracés de failles reconnues d'après les données gravimétriques (*fig. 2*). Ils confortent l'hypothèse de cette activité permanente.

4. CONCLUSION. — Les modèles gravimétriques obtenus correspondent à un corps large d'une centaine de kilomètres et épais de 4 km. Ce corps est nettement plus dense que les terrains sédimentaires voisins et il ne peut pas être interprété comme une intrusion granitique : le contraste de densité, obtenu par la modélisation des structures, entre le corps et les terrains sédimentaires (0,26) est bien supérieur à celui que l'on observerait avec un corps granitique. De plus, la densité moyenne des granites de la région, de l'ordre de 2,67, est celle des terrains anciens locaux (Crenn, 1957). Le modèle d'une intrusion mantellique ou d'un corps d'origine volcanique s'accorde mieux avec les données observées. Les mouvements tectoniques, la localisation des séismes récents survenus dans cette région et les nouvelles données minéralogiques obtenues sur la nature des daounites confirment la présence d'une activité volcanique récente dans la région du lac Faguibine en relation avec un événement géodynamique majeur.

Nous remercions M. A. Lesquer (CGGM) qui nous a autorisé à publier sa carte figure 2, et M. J. Albergel, hydrogéologue de l'ORSTOM, qui a contribué à la réalisation de l'échantillonnage des daounites.

Note remise le 28 septembre 1992, acceptée après révision le 25 février 1993.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- R. BAYER et A. LESQUER, Les anomalies gravimétriques de la bordure orientale du Craton ouest-africain : géométrie d'une suture pan-africaine, *Bull. Soc. géol. Fr.*, série 7, XX, 6, 1978, p. 863-876.
- Y. BELLION, J. BENKHEHLIL et R. GUIRAUD, Mise en évidence de déformations d'origine compressive dans le continental intercalaire de la partie méridionale du bassin de Taoudemi (Hodh oriental, confins mauritano-maliens), *Bull. Soc. géol. Fr.*, série 7, XXVI, 6, 1984, p. 1137-1147.
- D. BERTIL, Étude de la sismicité intraplaque en Afrique de l'Ouest à partir du réseau de stations sismologiques de Lamto-Côte-d'Ivoire, *Thèse Doctorat*, Université de Paris-VI, 1991, 137 p.
- Y. CRENN, Mesures gravimétriques et magnétiques dans la Partie Centrale de l'AOF, *Publ. ORSTOM*, 1957, p. 1-39.
- A. GÉRARD et P. GRIVAU, Interprétation quantitative en gravimétrie ou magnétisme à partir de cartes transformées de gradient vertical, *Geophysical Pros.*, 20, 1972, p. 459-481.
- R. GUIRAUD, B. ISSAWI et Y. BELLION, Les linéaments guinéo-nubiens : un trait structural majeur à l'échelle de la plaque Africaine, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 300, série II, 1985, p. 17-20.
- R. GUIRAUD, Y. BELLION, J. BENKHEHLIL et C. MOREAU, Post-hercynian tectonics in Northern and Western Africa, *Geol. J.*, 1987, p. 433-466.
- H. HUBERT, Les séismes en Afrique occidentale Française, *La Géographie*, XXX, 5, 1915, p. 359-362.
- J. B. JONSE et E. R. SEGNET, The nature of opal. Nomenclature and constituent phases, *J. Geol. Soc. Austr.*, 18, 1, 1971, p. 57-68.
- R. KARPOFF, PICG 252, Déformations récentes dans la vallée du Niger, *Géochronique*, 29, 1989, p. 7-8.
- J. C. KLEIN, Détermination des causes des anomalies de la crue du Niger, Rapport intermédiaire de la seconde phase d'étude (1977-1979), Service hydraulique, ORSTOM, Rapport interne, 1979, p. 1-77.
- A. LESQUER et A. MOUSSINE-POUCHKINE, Les anomalies gravimétriques de la boucle du Niger. Leur signification dans le cadre de l'orogénèse Panafricaine, *Canal. J. Earth. Sci.*, 17, 1980, p. 1538-1545.
- G. MARINELLI, *Étude Pétrographique d'une Scorie du Mali*, 1966, Rapp. inédit, 5 p.

- Th. MONOD et G. PALAUSI, Sur des manifestations fissurales de laves à néphéline au Sud du lac Faguibine (Mali), *Bull. IFAN*, série A, XXIII, 2, 1961, p. 251-273.
- A. MOUSSINE-POUCHKINE et J. BERTRAND-SARFATI, Le Gourma : un aulacogène du Précambrien supérieur, *Bull. Soc. géol. Fr.*, série 7, XX, 6, 1978, p. 851-857.
- R. L. PARKER, Best bounds on density and depth from gravity data, *Geophysics*, 39, 1974, p. 644-649.
- J. RISER, A. M. AU COUR et F. TOUR, Niveaux lacustres et néotectonique au lac Faguibine (Mali), *C. R. Acad. Sci. Paris*, 303, série II, 1986, p. 941-943.
- P. SABATIER, Positivity constraints in linear inverse problems, I-II: General theory, *Geophys. J. Roy. Soc.*, 48, 1977, p. 415-469.
- C. SAFON, G. VASSEUR et M. CUER, Some applications of linear programming to the inverse gravity problem, *Geophysics*, 42, 6, 1977, p. 1215-1229.
- J. F. SAUVAGE et M. SAUVAGE, Tectonique, néotectonique et phénomènes ignés à l'extrémité est du fossé de Nara (Mali) : Daounas et lac Faguibine, *J. African. Earth. Sci.*, 15, n° 1, 1992, p. 11-33.
- B. SIMON, A. BRISSET, J. ROUSSET et J. SOUGY, Confrontation de la télédétection (analyse numérique et analogique, téléinterprétation à petite échelle) avec la cartographie géologique classique et les données gravimétriques du Mali Sud Occidental (Afrique de l'Ouest), *Bull. Soc. géol. Fr.*, série 7, XXVI, 1, 1982, p. 13-22.
- A. SPECTOR et F. S. GRANT, Statistical models for interpreting aeromagnetic data, *Geophysics*, 35, 2, 1970, p. 293-302.
- M. TALWANI, J. L. WORZEL et M. LANDISMAN, Rapid gravity Computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, *J. Geophys. Res.*, 64, 1959, p. 49-59.
- Y. URVOY, Les bassins du Niger, *Mém. IFAN*, Dakar, 4, 1942, 139 p.

T. A. et Y. A. : Laboratoire de Géophysique, ORSTOM,  
70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France;

A. P. : Laboratoire de Géologie des Bassins Sédimentaires, UPMC,  
4, place Jussieu, 75252 Paris, France;

M. G. : Laboratoire de Pétrologie-Minéralogie, ORSTOM,  
70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France;

M. S. et J.-F. S. : 22, rue Charles-Gard, 67000 Strasbourg, France;

D. B. : Laboratoire de Détection et de Géophysique,  
BP n° 12, 91680 Bruyères-Le-Chatel, France.