



**HAL**  
open science

## Holocene crustal movements in the Asal rift, Djibouti

Jean-Claude Ruegg, Françoise Gasse, Pierre Briole

► **To cite this version:**

Jean-Claude Ruegg, Françoise Gasse, Pierre Briole. Holocene crustal movements in the Asal rift, Djibouti. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2*, 1990, 310, pp.1687-1694. hal-04270977

**HAL Id: hal-04270977**

**<https://hal.science/hal-04270977v1>**

Submitted on 6 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Tectonique/Tectonics

## Mouvements du sol holocènes dans le rift d'Asal à Djibouti

Jean-Claude RUEGG, Françoise GASSE et Pierre BRIOLE

**Résumé** – Les dépôts lacustres du Lac holocène d'Asal, en République de Djibouti, sont affectés de déformations importantes marquant l'activité sismotectonique du rift d'Asal. Les traces de rivage correspondant au niveau d'expansion maximale du lac il y a 6000 ans environ, ont été identifiées et leurs altitudes actuelles mesurées précisément par rattachement au réseau géodésique implanté dans cette région pour l'étude des déformations actuelles. Ces mesures mettent en évidence un approfondissement général de l'axe du rift atteignant 70 m, soit une vitesse moyenne supérieure à 1 cm/an. Les discontinuités dans les niveaux actuels indiquent quelles ont été les principales failles actives du rift depuis 6000 ans. Ces résultats sont discutés par rapport à ceux des mesures géodésiques réalisées depuis 1973.

### Holocene crustal movements in the Asal Rift, Djibouti

**Abstract** – The Holocene lacustrine deposits of Lake Asal, in the Republic of Djibouti, recorded important deformation which is associated with the seismo-tectonic activity of the Asal Rift. The shoreline associated with the level of maximum extent of the Holocene Asal lake (about 6,000 years B.P.), has been identified and its present altitude accurately measured relative to a precise geodetic network. The results indicate that the rift zone underwent vertical movements reaching 70 m, showing principally a subsidence of the inner floor of the rift. These results are compared with vertical displacements deduced from the geodetic monitoring carried out since 1973. The tectonic activity of normal faults is discussed in relation to the rift evolution.

**Abridged English Version** – The Asal Rift, in the Republic of Djibouti (East Africa), forms the link between the oceanic part and subaerial extensive volcanic axis in Afar along the accreting plate boundary between the Arabian and African plates [1]. It is recognized as the best example of exposed active rift that offers the possibility to study rifting genesis and evolution towards the oceanic stage ([2]-[4]).

RECENT CRUSTAL MOVEMENTS. – A "rifting episode" occurred in November 1978 ([4], [5]) and was characterized by magnitude 5 earthquakes, a fissural basaltic eruption and by the creation or reactivation of normal faults and fissures within the Inner Floor of the rift. The remeasurement of the geodetic network ([6], [7]) revealed an opening of more than 1 m and a collapse of about 70 cm of the inner floor of the rift and a small uplift of the lateral margins.

Between 1979 and 1989, the inner floor of the rift opened continuously about 40 cm. Vertical movements were also evidenced [8]: a decimetric general uplift on a large zone surrounding the rift, and a steady state creeping movement (about 8 mm/yr) affected the principal normal faults reactivated in 1978 in the same way as the coseismic collapse, *i.e.* deepening the axial valley of the rift. In this paper we investigate the crustal movements in the Asal rift recorded by the highest shoreline of the Holocene Lake Asal.

LAKE ASAL SHORELINES. – Hypersaline Lake Asal (–155 m) is located in a closed tectonic basin separated from the ocean by a crustal doming within the Asal Rift. Water level fluctuations (315 m) occurred during the Holocene [10] and were governed by both tectonic and climatic conditions. Lacustrine deposit studies ([3], [9], [10]) in and outside the Asal rift valley attest to the existence of a maximum permanent water level ( $160 \pm 5$  m) between about 8,600 and 6,000 B.P. Within the rift valley, the maximum shoreline level has been deformed by recent tectonic activity. A previous comparison indicated a strong correlation

Note présentée par Georges JOBERT.

between the shoreline levels and the 1978 co-rifting vertical movements [9]. In this paper, more precise and systematic measurements of the paleoshoreline altitudes provide a way to study the rift tectonics during a time interval rather large compared with the quasi-instantaneous evaluation given by geodetic measurements.

**METHODOLOGY.** — The highest level paleoshoreline is characterized [10] by stromatolitic reefs encrusting the volcanic bedrocks, ripple-marks alternating with shell layers, topographic shelves, etc. The accuracy of paleoshoreline identification varies between 0.2 and a few meters depending on the facies deposit. Trigonometric leveling and barometric leveling have been used to measure the altitudes in reference to geodetic or leveling networks existing in the area. The altimetric accuracy is better than one decimetre for trigonometric leveling and about 1-2 m for the barometric leveling.

**RESULTS.** — The maximum vertical movement since 6,000 years B.P. is about  $70 \pm 5$  m in the axial trough of the rift (*Fig. 2*). No paleoshoreline has been identified at an altitude greater than the 160 m maximum level of the holocene lake. So far, this maximum level (160 m) cannot be identified in the SW area of the rift.

*Paleoshoreline and actual tectonics.* — A close correlation is found between the present altitude of paleoshoreline and the structural pattern of the rift (*Fig. 3*): — a complex partitioning of the rift by active normal faults with successive tectonic troughs and shorts in the central and NE areas, — a dissymmetric pattern of the vertical Holocene displacements; the SW part of the rift recorded smaller offsets of the paleoshoreline than the NE part where a dense fracturation in normal faults and fissuring occurs ([2], [3]).

*Active faults since 6,000 years B.P.* — The horizontal offsets of the paleoshoreline (*Fig. 1*) indicate the principal normal faults (F1, F4, F9, F10, F12, F13) already existing 6,000 yr B.P. The large northern normal faults F1 and F4 were the most active during the last 6,000 yr (mean rate 3.5 and 5.5 mm/yr respectively), while the opposite large faults in the southwestern area were inactive (F13) or slightly active (F12). Other faults, of minor topographic expression, have recorded displacements up to 10 m (F2, F3, F5, F6, F9, F11) and new normal faults seem have been created recently (F7, F8).

*Recent tectonic activity.* — Coseismic vertical deformations indicated both a deepening of the axial zone and an uplift of the margins of the rift associated with the elastic rebound following the rupture. However, no uplift of the paleoshoreline above the 160 m level was found.

**CONCLUSIONS.** — Since 6,000 yr B.P., a 70 m subsidence of the axial valley of the Asal Rift occurred. This 1.2 cm/yr mean rate is greater than the present active fault creeping. Thus, the rift valley could have been built by successive co-seismic elastic ruptures of the lithosphere rather than by a continuous motion. The vertical displacements accumulated since 6,000 yr B.P. represent 1/4 of the total topography of the rift. This means that the present topography could have been built during a very short period of about 25,000 yr. Such a time-span is of an order of magnitude shorter than the period necessary to create the 5 km wide inner floor, assuming an average opening rate of 1-4 cm/yr. Consequently the width of the accreting zone could be less than 1 km wide. The persistent dissymmetric of the rift tectonic frame seems to indicate the migration of the active zone towards the NW tectonic block.

Le rift d'Asal, en République de Djibouti, est le premier tronçon partiellement émergé d'une suite d'axes volcaniques en extension, qui marque à l'intérieur de la dépression Afar [1] la frontière actuelle entre les plaques Arabie et Afrique. Il est reconnu ([2]-[4]) comme étant un équivalent émergé de vallée axiale de dorsale océanique.

LES MOUVEMENTS CRUSTAUX RÉCENTS. — Un exemple de processus de « rifting » actif supposé caractériser le fonctionnement des dorsales fut observé lors de la crise sismo-volcanique de l'Ardoukoba en novembre 1978 ([4]-[6]). Cette crise fut marquée par des séismes de magnitude supérieure à 5 et leurs répliques, l'éruption basaltique fissurale de l'Ardoukoba, la création ou la réactivation de failles normales, et enfin l'ouverture de fissures à l'intérieur du plancher interne du rift. La remesure des réseaux géodésique et de nivellement mis en place en 1973 permet de préciser le champ de déplacements : ouverture métrique du plancher interne, affaissement de 70 cm de la zone centrale du rift et léger soulèvement des bordures ([6], [7]).

Depuis cette crise, l'activité tectonique est restée très importante [8] puisque le rift s'est ouvert de manière quasi continue de plus de 40 cm en 10 ans (taux maximal : 60 mm/an entre 1982 et 1986). Parallèlement, un exhaussement général décimétrique de toute la région se poursuivait, associé à un affaissement relatif du plancher interne. Cet affaissement correspond au rejeu continu, très linéaire, quasi asismique des failles normales actives ayant joué en 1978 et atteint 8 mm/an. Comme le mouvement co-sismique de 1978, ce rejeu tend à approfondir la vallée axiale du rift.

Cependant l'observation de l'activité du rift à l'échelle de temps de la dizaine d'année ne traduit probablement qu'une partie du mécanisme de rifting et il est intéressant de retracer l'évolution du rift à l'échelle du millénaire qui intègre un nombre important d'épisodes de déformation brusque analogues à celui de 1978, aussi bien que des périodes de déformation continue comme depuis 1978. Pour cela, une méthode applicable dans le rift est l'analyse des déplacements des lignes de rivages holocènes du lac Asal.

LES DÉFORMATIONS DES PALÉORIVAGES DU LAC ASAL. — Le lac Asal (-155 m), occupe la dépression la plus profonde et la plus récente de l'Afar. Cette dépression est séparée de la mer par le bombement du rift d'Asal. Son histoire quaternaire ([3], [9], [10]) est régie à la fois par des facteurs tectoniques et climatiques. Les sédiments diatomitiques ou calcaires qui tapissent les berges du bassin témoignent de plusieurs phases de haut niveau lacustre correspondant aux épisodes climatiques humides du Quaternaire supérieur ([3], [10]). Nous considérons ici seulement la phase de haut niveau lacustre de l'Holocène inférieur et moyen. L'étude des paléorivages à l'écart de la zone active du rift [10] a montré que ce lac s'est maintenu à la cote maximale de  $160 \pm 5$  m entre environ 8 600 et 6 200 B.P. Dans le rift, l'activité tectonique a déformé la ligne de rivage d'extension maximale [3]. Nous avons donc mesuré les déplacements verticaux des différents compartiments dont nous avons déduit l'activité des failles normales depuis le retrait du lac, environ 6 000 B.P.

Une première comparaison de l'altitude actuelle de quelques points du haut rivage, avec les résultats des mesures de géodésie réalisées à la suite de la crise sismo-volcanique de 1978, avait déjà montré [9] une bonne corrélation entre les altitudes du paléorivage et les déplacements verticaux associés à cette crise. Cette investigation est poursuivie ici avec la mesure d'un profil dense de points du paléorivage, incluant chaque compartiment de la partie centrale du rift.

MÉTHODE UTILISÉE. — *L'identification des traces de rivages.* — La ligne d'extension maximale du lac se définit ([9], [10]) par des critères géomorphologiques, sédimentologiques et paléobiologiques. Sur les pentes d'éboulis, le lac a modelé un replat topographique bien visible, de quelques mètres de largeur. Sur les pentes douces, les anciennes plages se reconnaissent par des accumulations de coquilles alternant avec des niveaux de sable à *ripple-marks*, ou de galets aplatis. Sur les falaises rocheuses, la stagnation des eaux est souvent enregistrée par des incrustations calcaires d'origine algair (stromatolites) qui se forment dans la zone de battement des eaux. La zone échantillonnée jusqu'à présent (*fig. 1*) est limitée au fond et aux bordures sud-ouest (oued Garab Ieta) et nord-est du rift (oued Daffaré). L'imprécision de l'identification du paléorivage est de quelques décimètres lorsque des stromatolites ont pu être identifiés, et peut atteindre 2 à 3 m dans les autres cas.

*Les mesures altimétriques.* — L'altitude et la position des points sélectionnés ont été déterminés soit par une méthode topographique, soit par nivellement barométrique, en partant de repères appartenant aux réseaux géodésique et de nivellement mis en place depuis 1973 ([6], [8]). Avec la méthode topographique, les points sont localisés avec une précision de quelques centimètres. L'autre méthode utilise un baromètre numérique de précision pour déterminer les différences d'altitude, en se calant sur un repère connu avant et après le circuit. La précision obtenue est de 1 à 2 m.

RÉSULTATS. — Les altitudes actuelles du paléorivage, projetées sur une coupe de direction N40, sont représentées sur la figure 2.

Le déplacement vertical maximal correspond à un affaissement de l'axe du rift de  $-70 \pm 5$  m. Sur la marge nord-est du rift le paléorivage atteint le niveau  $160 \pm 5$  m correspondant à l'extension maximale du lac holocène, mais ne le dépasse pas. En revanche, sur la marge sud-ouest, le paléorivage n'a pour l'instant pas été identifié jusqu'à la cote 160.

*Corrélations avec la tectonique du rift.* — L'interprétation des mouvements (*fig. 3*) est confrontée avec la topographie du rift sur une coupe N40, les déplacements entre 1973

#### EXPLICATIONS DES PLANCHES

##### Planche I

Fig. 1. — Carte tectonique du rift d'Asal indiquant notamment les failles actives lors de la crise sismo-volcanique de l'Ardoukoba en 1978 et la ligne du paléorivage correspondant à l'extension maximale du Lac Asal (8 600-6 000 B.P.). Abréviations utilisées : hd : horst de Daloalé, pr : petit rift de Daloalé, ks : auge tectonique de Kadda Somma, OK : Horst de Oud Koma.

Fig. 1. — *Tectonic map of the Asal Rift indicating the principal active faults and the maximum level paleoshoreline.* hd: Daloalé horst, pr: northern rift-in-rift zone, ks: Kadda Somma trough, OK: Oud Koma horst.

Fig. 2. — Altitudes actuelles des niveaux mesurés projetées sur une coupe N40 passant par Oud Koma (A-B, *fig. 1*). Les différents symboles utilisés correspondent à la classification des paléorivages : (a) stromatolites, (b) grèves à galets, *ripple-marks*, ..., (c) niveau supérieur encroûtements calcaires, (d) niveau supérieur de traces de sédiments calcaires, coquilles...

Fig. 2. — *Cross section N40E of the present altitudes of the paleoshoreline (along A-B, Fig. 1).* Symbols: (a) stromatolites, (b) ripple marks, (c) highest level of carbonate encrustations, (d) highest signs of carbonate deposits.

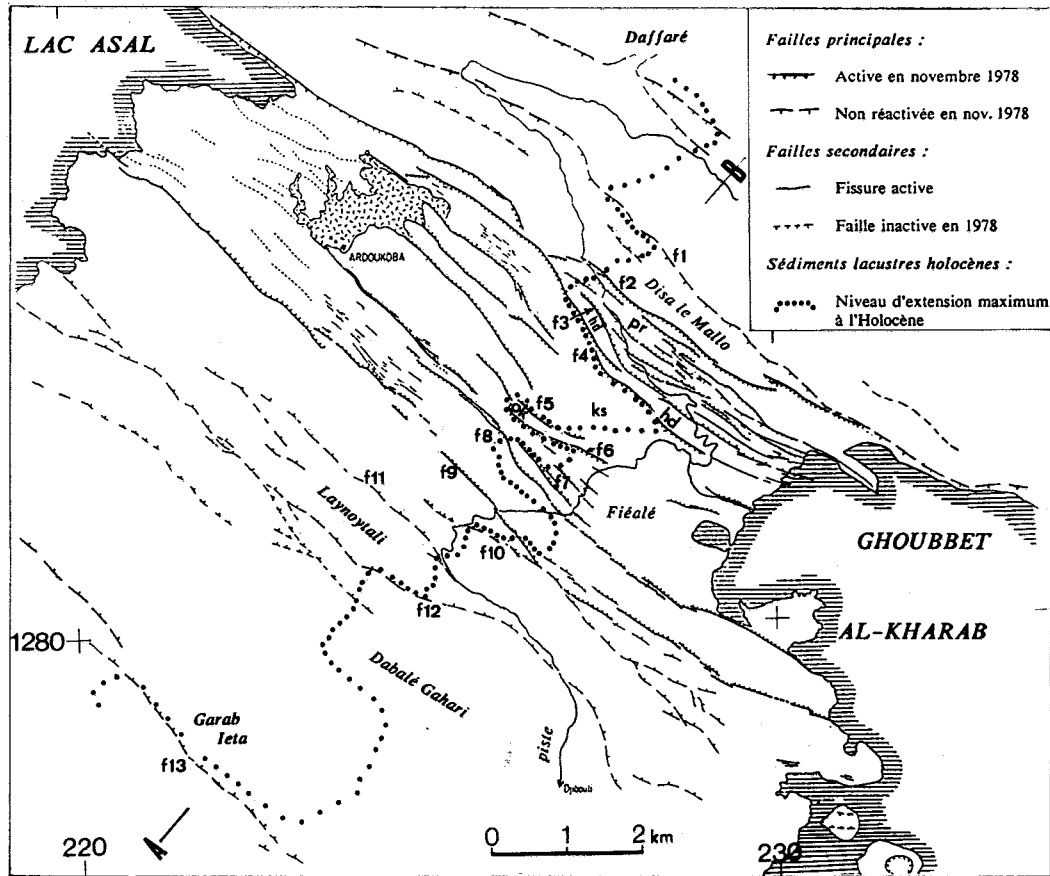


Fig. 1

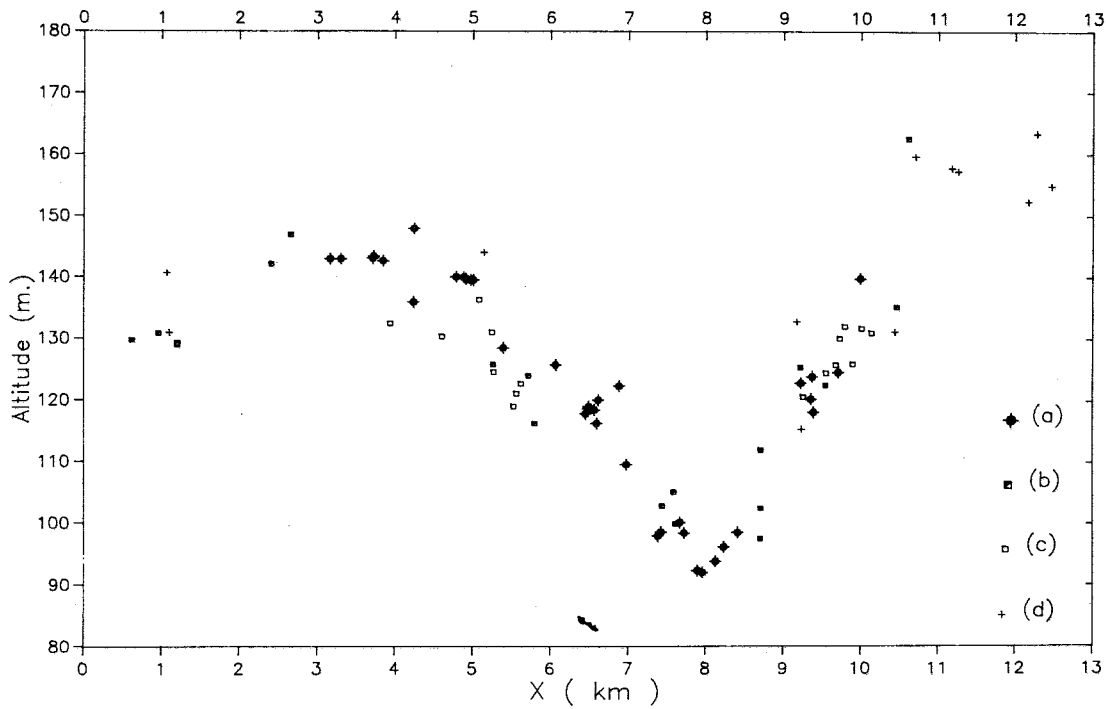


Fig. 2

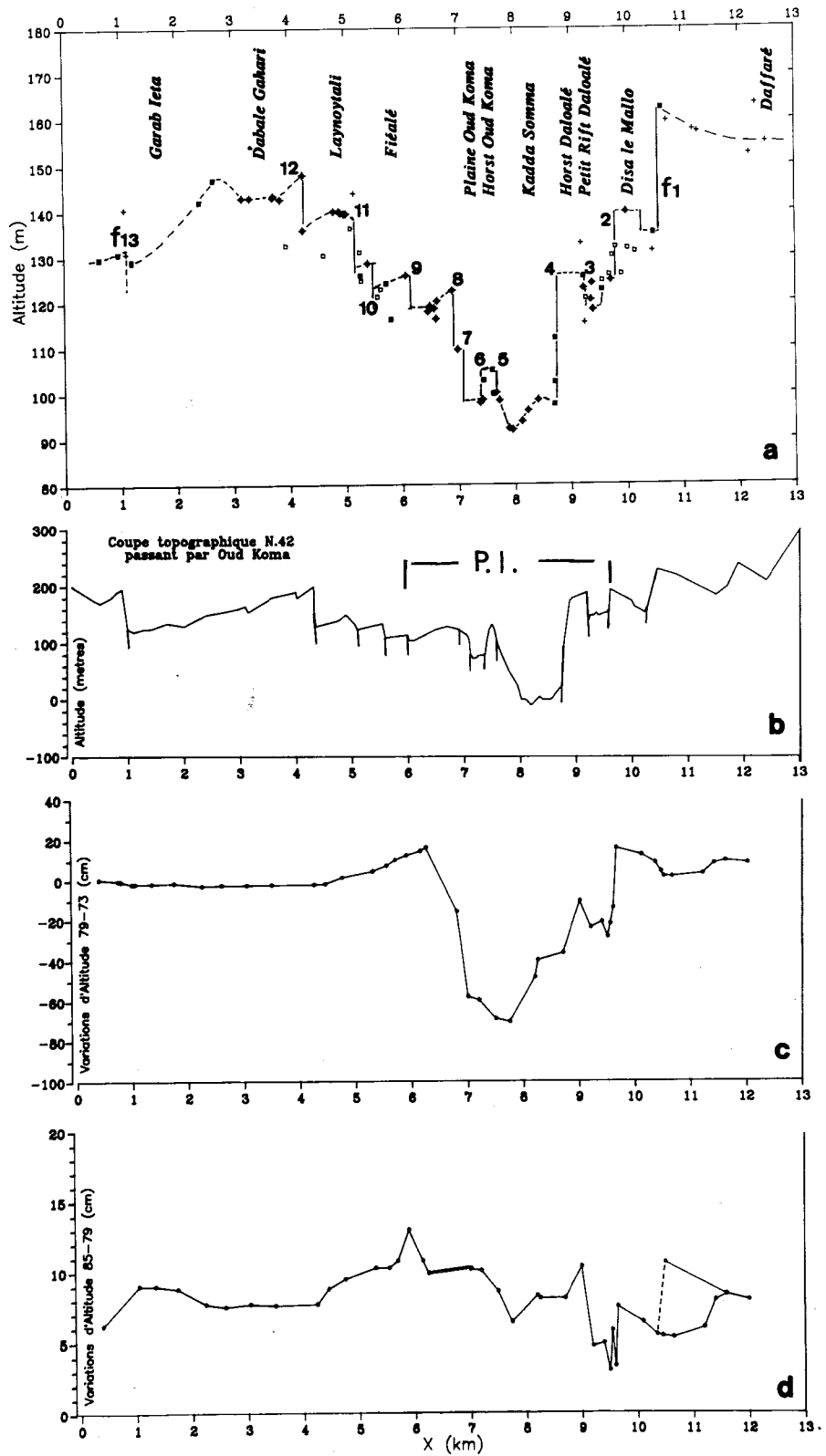


Fig. 3

## Planche II

Fig. 3. — Coupe interprétative déduite des paléorivages mesurés (a), avec en correspondance : (b) la topographie du rift, (c) les mouvements verticaux cosismiques de 1978, la comparaison avec les mouvements verticaux [6] de 1978, et (d) les mouvements verticaux postcrise [8]. P.I. indique les limites du plancher interne du rift.

Fig. 3. — Interpretative cross section of Holocene vertical movements (a), with corresponding: (b) rift topography and faulting, (c) 1978 coseismic vertical displacements [6], (d) post rifting vertical displacements [8]. P.I. indicates the inner floor of the rift.

et 1979 incluant la crise, et enfin les déplacements postcrise entre 1979 et 1985. On retrouve dans ces variations d'altitude du paléorivage les grands traits de la morphologie actuelle du rift : découpage assez complexe du rift par les différentes failles actives, plusieurs auges tectoniques séparées par des horsts (Oud Koma, Daloalé), et une dissymétrie dans les déplacements holocènes et actuels comme dans la topographie du rift.

*Identification des failles actives depuis l'Holocène.* — Sur la figure 1, les décalages horizontaux du paléorivage indiquent que les grandes failles découpant le rift existaient déjà il y a 6000 ans (fig. 3 : F1, F4, F9, F10, F12, F13). Certaines des structures morphologiques dont la corrélation avec des failles actives est moins évidente, comme le horst d'Oud Koma et le haut topographique au sud du graben de Oud Koma étaient déjà bien marquées à l'époque d'extension maximale du lac holocène. Les grandes failles du nord (Disa le Mallo : F1 et Kadda Soma : F4) ont été les plus actives depuis 6000 ans, avec des différences de niveau de  $23 \pm 5$  m et  $34 \pm 5$  m respectivement, soit 3,5 et 5,5 mm/an en moyenne. Certaines grandes failles du sud ont été inactives (F13), ou peu actives (F10, F11, F12) durant cette période. Par contre, d'autres failles, marquant de façon plus atténuée la morphologie actuelle du rift, semblent avoir joué plus modérément (moins de 10 m) : F2, F3, F5, F6, F9, F11. Enfin, des failles, semble-t-il nouvelles, marquées par des escarpements de faible ampleur, sont mises en évidence : F7, F8.

*Corrélations avec les mesures géodésiques récentes.* — Les déformations cosismiques enregistrées lors de la crise de 1978 montraient un approfondissement de 70 cm du plancher interne et une surélévation des bords du plancher interne explicable par une réponse élastique à la rupture de la lithosphère du rift. On constate donc un rapport 100 entre le mouvement holocène et le déplacement associé à la crise. L'allure basculée des blocs bordant le rift pourrait être le résultat de plusieurs réponses élastiques du même type; puisque dans le cas de la crise de 1978, la surrection latérale atteignait 15 cm, on devrait attendre un niveau maximal actuel de 175 m pour le paléorivage au droit de la falaise F1. Ce n'est pas le cas. Par conséquent, pour expliquer la morphologie des déplacements holocènes, on doit imaginer un mécanisme plus complexe mettant en œuvre soit une subsidence générale de la région, soit une relaxation transitoire au niveau de ces failles.

La zone affectée par des ruptures ou réactivées en 1978 est plus étroite que la zone active depuis 6000 ans. Il serait intéressant de déterminer si des failles non réactivées en 1978, comme F1 par exemple, fonctionnent par séismes successifs, par rejeu continu, ou par les deux mécanismes comme les failles du plancher interne actuel.

Les déplacements verticaux postérieurs à la crise de 1978 montraient un exhaussement général de grande longueur d'onde dans la période 1979-1985. Une origine magmatique [8] a été proposée pour rendre compte de ces observations. Cependant, l'évolution à long terme du rift décrite par l'étude du paléorivage n'est pas compatible avec la persistance d'un tel mécanisme; celui-ci semble n'avoir été que transitoire puisque la tendance au



gonflement du rift n'a pas persisté au-delà de 1986 comme le montrent des mesures altimétriques partielles plus récentes.

CONCLUSION. — Durant la période holocène, on constate donc un approfondissement très net de l'ensemble du rift de  $70 \pm 5$  m, ce qui correspond à un taux moyen de 1,2 cm/an. Cette valeur est beaucoup plus forte que celle qui est associée au rejeu continu des failles actives durant la période intercrise. Par conséquent nous pensons que l'approfondissement du rift pourrait être obtenu principalement par l'effet cumulé d'une succession d'épisodes de rupture lithosphérique analogues à celui de 1978, avec en outre des phénomènes secondaires de relaxation et de fluage. La période de récurrence de ces crises serait alors inférieure au siècle.

Les mouvements verticaux produits depuis 6 000 ans expliquent environ le quart de la topographie actuelle du rift. Avec un taux constant cette topographie pourrait donc avoir été formée en 25 000 ans à peine. On manque encore de datations sur les laves récentes de la série d'Asal pour faire une comparaison valable avec l'activité magmatique. Cependant en supposant un taux d'ouverture de 2 cm/an, il faudrait de l'ordre de 250 000 ans pour ouvrir un rift de 5 km de large (extension et accréation). Il est donc probable que la zone d'accréation est beaucoup plus réduite que le plancher interne actuel et n'atteint pas 1 km de large. L'activité holocène de failles telles que F1, F11, F12 montre que la zone tectoniquement active est cependant plus large que le plancher interne réactivé en 1978.

Enfin, la dissymétrie persistante du découpage du rift (relief, mouvements holocènes, mouvement actuel) semble indiquer une migration et un blocage de la zone d'accréation au nord-est, vers le bloc structurellement plus ancien du Day et du Mabla.

Nous remercions D. Hatzfeld, G. Lambaré, J. M. Gaulier et A. Simonin pour avoir contribué, au cours de deux missions de terrains successives en 1988 et 1989, à la réalisation de ces mesures et à de nombreuses discussions utiles au murissement de ce travail. Ce travail a été réalisé avec le soutien des Observatoires de l'I.P.G. et de l'I.S.E.R.S.T. Contribution I.P.G. n° 1122-LS9003.

Note remise le 21 décembre 1989, acceptée après révision le 27 mars 1990.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] (a) H. TAZIEFF et coll., *Nature*, 235, n° 5334, 1972, p. 144-147; (b) J. VARET, *Carte géologique de l'Afar central et méridional*, C.N.R.S., Paris, 1978.
- [2] (a) L. STIELTJES, *Thèse*, Orsay Univ., France, 1973; (b) H. D. NEEDHAM et coll., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 28, 1976, p. 439-453.
- [3] (a) F. GASSE et L. STIELTJES, *Bull. B.R.G.M.*, sect. IV, n° 4, 1973, p. 229-245; (b) F. GASSE, *Thèse*, Université Paris-VI, 1975.
- [4] A. ANIS et coll., *Nature*, 282, 1979, p. 17-23.
- [5] Colloque Rift d'Asal, *Bull. Soc. Géol. France*, N° spécial Rift d'Asal, 28 titres, 216 p., 7, XXII, n° 6, 1980, p. 797-1013.
- [6] (a) KASSER et coll., *C. R. Acad. Sci. Paris*, 288, série D, 1979, p. 469-472; (b) J.-C. RUEGG et coll., *Geophys. Res. Lett.*, 6, 1979, p. 817-820.
- [7] (a) A. TARANTOLA et coll., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45, 1979, p. 435-444; (b) A. TARANTOLA et coll., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 48, 1980, p. 363-370.
- [8] (a) J.-C. RUEGG et coll., *J. Geophys. Res.*, 89, 1984, p. 6237-6246; (b) J.-C. RUEGG and M. KASSER, *Geophys. Res. Lett.*, 14, n° 7, 1987, p. 745-748.
- [9] F. GASSE et M. FOURNIER, Rifts et fossés anciens, *Bull. Centre Rech. Expl. Prod., Elf-Aquitaine*, 7, 1983, p. 285-300.
- [10] F. GASSE et J. C. FONTES, *Palaeogeog. Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 69, 1989, p. 67-102.

J.-C. R. et P. B. : Institut de Physique du Globe,  
Laboratoire de Sismologie et Observatoires I.P.G., 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05;  
F. G. : Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique,  
Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex.