

## La biellette danakile : un modèle pour l'évolution géodynamique de l'Afar

par BERTRAND SICHLER \*

**Mots clés.** — Cinématique, Horst, Rift, Limite plaque, Rotation continentale, Paléomagnétisme. Djibouti, Dépression Afar (Danakil).

**Résumé.** — Les données géologiques et géophysiques existant actuellement en Afar et aux alentours permettent de penser que la tectonique des plaques peut s'appliquer dans cette région, en introduisant pour certaines parties du puzzle la notion de points d'articulation. Le bloc danakil serait, dans ce contexte, considéré comme une pièce mobile, articulée au Nord, sur la plaque nubienne supposée fixe, dans la région de Zula et au Sud sur la plaque arabe dans la zone de Bab el Mandeb. Cette hypothèse de biellette permet de passer du rift de l'Erta Ale au rift de la Mer rouge sans faille transformante et d'expliquer de nombreux traits morphologiques de l'Afar. La durée de vie d'une telle biellette est limitée, des signes de faiblesse existent, et on peut s'attendre, à terme, à une rupture de la pièce elle-même ou plus vraisemblablement de l'articulation Nord.

De tels mécanismes peuvent rendre compte, dans divers océans, de certaines structures obliques anormales comme le Banc de Rockall en Atlantique Nord-Est, le plateau de Voring en Mer de Norvège ou le plateau des Baléares en Méditerranée. —

### The danakil crank-arm : a model for the geodynamic evolution of the « Afar triangle »

**Abstract.** — Geological and geophysical data now available in Afar and neighbouring areas suggest that plate tectonics is usable in this area if one accepts, for some parts of the puzzle the notion of hinge points. In this context, the Danakil bloc can be considered as a moving piece hinged in the North to the Nubian plate which is assumed to be fixed, and hinged in the South to the Arabian plate in the Bab el Mandeb area. This hypothesis of a Danakil crank-arm allows one to jump from the Erta Ale rift to the Red Sea rift without the need for a transform fault and to explain some morphological features of the Afar. The life of such a crank-arm is short and it exhibits zones of crustal weakness and in the future the crank-arm itself, or more probably the northern hinge point must rupture.

Such a hypothesis can explain the occurrence in the oceans of oblique abnormal structures like Rockall bank in the North-East Atlantic, Voring plateau in the Norwegian Sea and the Balears plateau in the Mediterranean Sea. —

#### INTRODUCTION ET SITUATION DU PROBLÈME.

L'extraordinaire ressemblance des côtes de part et d'autre de la Mer rouge et du golfe d'Aden a contribué à la formulation de la « Dérive continentale » [Wegener, 1929]. C'est à cette région que Laughton [1966] appliqua les nouvelles idées de l'« Expansion des fonds océaniques » qui furent à l'origine de la tectonique des plaques. Ce concept, très généralement admis depuis plus d'une décennie trouve dans la zone complexe du Triangle Afar quelque difficulté à se déployer.

On peut aborder le problème posé par cette région soit à partir d'études de terrain établissant une hiérarchie et un calendrier des événements géologiques qu'il est nécessaire ensuite d'intégrer dans le cadre général de la séparation Afrique-Arabie ; soit à partir des données de la cinématique des grandes plaques induisant les mouvements des plus petites qu'elles enserment. On peut élaborer un modèle qui s'inscrit dans le cadre général de la tectonique des plaques et qu'il faut confronter aux observations de terrain.

C'est la deuxième voie qui sera suivie ici sachant néanmoins que le régime permanent n'est pas atteint et que des frontières stables n'existent pas partout.

#### SITUATION DU MODÈLE DANS UN CHAMP DE PRÉCISION.

La fermeture de la Mer rouge et du golfe d'Aden par rapprochement relatif des plaques africaine et arabe peut être considérée comme le premier degré de précision.

La pierre d'achoppement que représente l'Afar dans l'ajustement Afrique-Arabie serait considérée, dans cet esprit, comme le deuxième degré de précision. Le troisième degré serait constitué par les conséquences régionales de la cinématique évoquée : zone Mak'Arrasou, dépressions de Hanle, Gaggade, Bada Weyn, etc. (fig. 1).

Dans la démarche adoptée, l'hypothèse formulée pour un degré de précision doit autant que possible découler mais aussi valider celle du degré inférieur et rendre compte des observations relatives au degré supérieur.

\* Centre océanologique de Bretagne, B.P. 337, 29273 Brest (France).

Note présentée à la séance des 23-27 février 1980, manuscrit définitif remis le 27 novembre 1980. Contribution n° 701 du Département géologie, géophysique et géochimie du C.O.B.

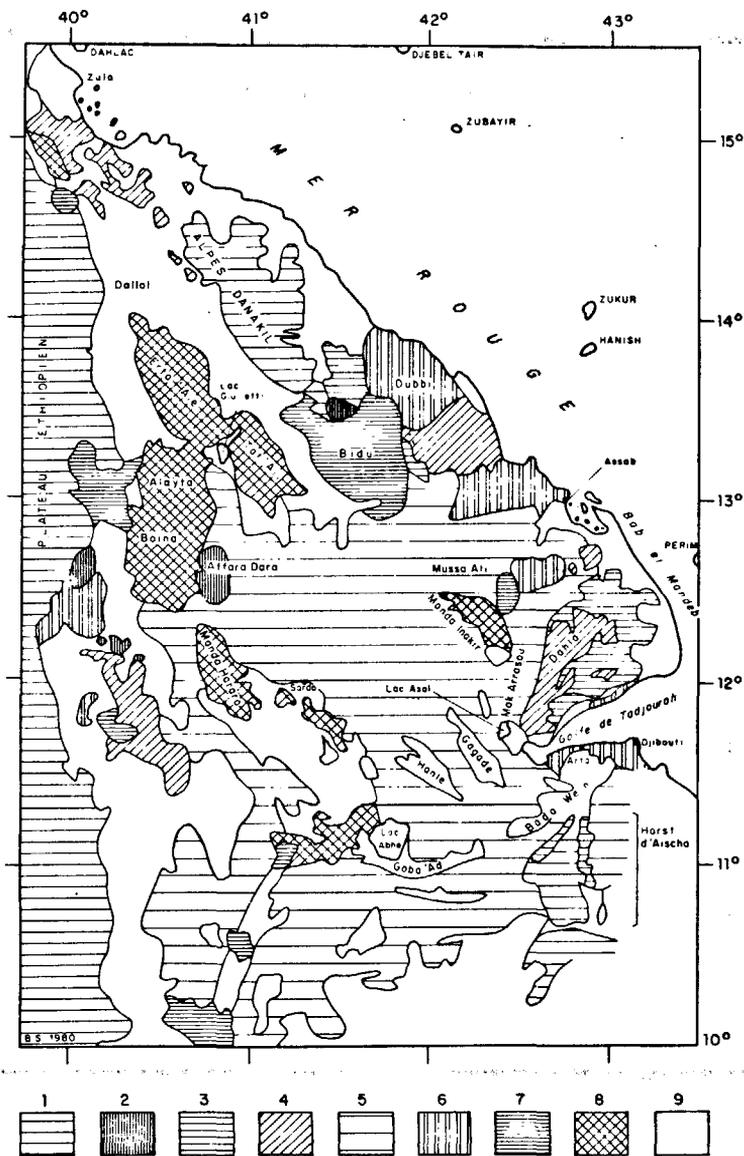


FIG. 1. — Carte géologique simplifiée du triangle Afar d'après Treuil et Varet, 1973.

1 : socle ; 2 : granite ; 3 : rhyolites des Mabra ; 4 : basaltes du Dalha ; 5 : série stratoïde ; 6 : structures transverses ; 7 : centres rhyolitiques des marges de l'Afar ; 8 : séries axiales ; 9 : sédiments.

Au premier degré, déjà, l'unanimité n'est pas faite : l'importance de l'ouverture de la Mer rouge varie de quelques dizaines de kilomètres selon les uns à quelques centaines selon les autres. Les modalités d'ouverture de l'ensemble Mer rouge-golfe d'Aden sont aussi très variables : d'une façon continue durant ces derniers millions d'années, ou en deux épisodes séparés par une longue période de calme. Seul le pôle de rotation Arabie-Afrique semble présenter quelque stabilité. Il ne s'agit pas ici de faire un exposé contradictoire des différents arguments, Le Pichon et Francheteau l'ont parfaitement réalisé récemment [1978]. On peut cependant espérer qu'une des options rendra mieux compte de ce qui est observé au deuxième degré de précision.

#### LES BASES DU MODÈLE.

##### A) Pour l'existence d'un bloc danakil de Zula à Tadjoura.

Cette idée a été émise très tôt [Laughon, 1966], reprise par Mohr [1970], Tazieff *et al.* [1972], Marinelli et Varet [1973], Le Pichon *et al.* [1973], Girdler et Styles [1976] mais également combattue par les partisans d'une accretion récente de la plaque arabique au Nord du golfe de Tadjoura, essentiellement à cause des données de sismique réfraction et de l'absence de sismicité dans le Bab el Mandeb : Varet [1973], Ruegg [1974, 1975], Barberi *et al.* [1975], Barberi et Varet [1977], Le Pichon et Francheteau [1978], etc.

En réalité la sismique réfraction montre surtout l'anormalité de la région : le horst d'Aischa, dont la nature continentale étirée et « atténuée » a été démontrée [Black *et al.*, 1972], ne semble pas tellement différent du point de vue sismique, de la région Nord Tadjourah qui pourrait être interprétée de même en exagérant à peine le processus d'atténuation. Le caractère pseudo-océanique du reste de l'Afar n'est, par ailleurs, pas remis en cause. Il existe quelques arguments pour étayer cette interprétation :

- la présence de trapps basaltiques datés de 15 à 25 millions d'années apparaissant en boutonnières dans les rhyolites du Mablà au Nord de Tadjoura ainsi que dans la région d'Ali-Sabieh (carte géologique de l'Afar méridional CNR-CNRS) ;

- le contraste magnétique saisissant qui apparaît sur la nouvelle « carte magnétique de la République de Djibouti » [Courtillet et Le Mouél, 1978, Courtillet *et al.*, 1980] entre : d'une part, les régions à fortes anomalies magnétiques de type océanique dans le fossé et le golfe de Tadjoura, le rift d'Asal, et à l'Ouest de ce rift et d'autre part, la zone de Mak' Arrasou et la région au Nord du golfe, caractérisées par des anomalies faibles et peu organisées ;

- les données gravimétriques de Makris *et al.* [1975] font apparaître un alignement d'anomalies de Bouguer négatives depuis le Nord des Alpes danakil jusqu'au Nord du golfe de Tadjoura. Ces anomalies résultent d'un déficit de masse en profondeur interprété comme un épaississement de la croûte mis par ailleurs en évidence par un profil de sismique réfraction entre Assab et Assaita [Berkhemer *et al.*, 1975]. La même constatation gravimétrique peut être faite à propos du horst d'Aischa.

##### B) Frontières du bloc danakil.

La caractéristique fondamentale de l'Afar consiste en un état géodynamique transitoire. Contrairement aux régions où des explications classiques en terme de tectonique de plaques peuvent être utilisées pour décrire des frontières, des mouvements et leur évolution dans le temps, ici la continuité spatio-temporelle n'est pas atteinte. L'utilisation de la sismicité en tant que marqueur des frontières des plaques doit être sérieusement relativisée dans cette région : la condition sismique serait suffisante mais non nécessaire pour qu'existât effectivement une frontière qui fonctionnerait de manière discontinue, le régime stationnaire n'étant pas atteint. L'absence de sismicité en Mer rouge au Nord de 21° N [Fairhead et Girdler, 1972] est frappante à cet égard : personne ne nie pourtant l'existence de la frontière Arabie-Nubie le long de la fosse centrale où apparaissent en outre des traits morphologiques caractéristiques de failles transformantes. Le flux de chaleur en Mer rouge, de 2 à 8 fois supérieur à la moyenne mondiale [Girdler and Evans, 1977], est peut être suffisant pour que les contraintes nécessaires à de forts séismes ne puissent s'accumuler qu'épisodiquement dans des régions où les mouvements sont lents. Dans le Rift africain Est, la possibilité de déformations asismiques a aussi été évoquée [Molnar *et al.*, 1970]. Ainsi Barberi et Varet [1977], dans leur puzzle de micro-plaques, ont multiplié les frontières sans support de sismicité, mais en se servant d'indices morphologiques et géochimiques pour mettre en évidence des « zones axiales ». Ces zones ont certainement toutes joué en extension à un moment ou à un autre mais il serait prudent de ne pas les prendre toutes comme des frontières actuelles ; il n'est probablement pas possible de définir avec précision des limites de plaques instables dans le temps. Dès lors, établir une cinématique sophistiquée est illusoire.

Dans ces conditions on pourrait revenir aux notions simples mais fondamentales suivantes : le horst danakil se prolonge jusqu'au golfe de Tadjoura, représentant un môle de croûte continentale de plus en plus amincie et atténuée vers le Sud. Les seules frontières vraiment nettes actuellement seraient

constituées par les zones axiales et les failles transformantes existant dans le golfe de Tadjoura, le Ghoubbet el Karab et le rift d'Asal. On est ensuite tenté de faire passer la frontière par Mak'Arrasou [Courtillet *et al.*, 1974] pour rejoindre Manda Inakir qui a de nouveau un caractère de rift. Les seuls indices de frontières entre les zones axiales de Manda Inakir et de Manda Hararo sont représentés par les séismes de Sardo [Maasha et Molnar, 1972] dont les mécanismes au foyer ont été réinterprétés [Girdler et Styles, 1976; Barberi et Varet, 1977] comme l'expression d'un mouvement de cisaillement dextre. De Manda Hararo la frontière suivrait les zones axiales d'Alayta et d'Erta'Alc, et s'enfoncerait sous la plaine de sel de Dallol. La position anormale, en plein Afar central, du massif granitique d'Affara Dara est bien la preuve que l'ouverture ne s'est pas toujours faite selon la ligne décrite et qu'elle a aussi eu lieu plus à l'Est dans le prolongement de Tat'Ali par exemple.

Des considérations géométriques d'ouverture minimum, le brusque changement dans l'orientation moyenne des côtes Sud-Ouest de la Mer rouge, l'absence de cisaillement dans la région de Zula-Dahlak conduisent à situer dans cette région le pôle de rotation Afrique-Danakil.

La frontière Est, probablement moins diffuse qu'à l'Ouest, se place naturellement le long de la fosse axiale de la Mer rouge, visible jusqu'à l'île de Zukur. L'existence d'anomalies magnétiques de type océanique, sous les îles Dahlak [Girdler et Styles, 1974], et encore visibles plus au Sud sur les profils 117 et 119 du Valdivia [Roesser, 1975] confirme ce point de vue. Au Sud des Haniche on est réduit à émettre des hypothèses quant à la nature et à la trajectoire de la frontière. Barberi et Varet [1977], le Pichon et Francheteau [1978] font passer une frontière transformante par le massif volcanique à caractère alcalin de Dubbi. Mais l'absence de décrochement visible de la côte et des lignes isobathes montre que le fonctionnement de cette limite est ultra-récent ou très lent.

L'hypothèse d'une frontière en extension, décalée au niveau des Haniche, se poursuivant vers le Sud, et d'un pôle de rotation Arabie-Danakil situé dans le Bab el Mandeb sera reprise ici, suivant en cela un certain nombre d'auteurs déjà évoqués. L'absence de séismes dans le Bab el Mandeb ne doit pas exclure cette possibilité étant donné la faiblesse des mouvements lorsqu'on se rapproche du centre de rotation. Cependant, des déformations faibles ont probablement lieu sous la couche sédimentaire dont on ignore l'épaisseur faute de couverture sismique mais qui est sans doute considérable (taux de sédimentation au forage 229 du D.S.D.P. 200 km plus au Nord 58 cm/millénaire).

## MODÈLE CINÉMATIQUE PROPOSÉ (fig. 2).

La petite plaque dont on vient de définir les limites grossières serait donc articulée au Nord sur la plaque Nubienne considérée comme fixe, et au Sud sur la plaque Arabe mobile. La cinématique de la biellette danakile ainsi définie, est intimement liée au mouvement relatif des points d'articulation, donc au mouvement relatif de l'Arabie par rapport à l'Afrique.

Il s'agit maintenant d'examiner si cette configuration très simple permet de rendre compte des traits morphologiques caractéristiques de la région.

### A) Contraintes morphotectoniques pour la cinématique envisagée.

On peut constater que les côtes Est au Nord et au Sud du golfe de Tadjoura ont subi un décalage d'environ 80 km si on le mesure sur un petit cercle centré sur la région de Zula. Les minima gravimétriques du Dahla et du horst d'Aïscha [Makris *et al.*, 1975] (fig. 1) doivent être décalés de la même amplitude si on veut les amener en regard l'un de l'autre. Il faut effectuer une translation du même ordre de grandeur pour amener les couvertures géologiques de la région d'Ali Sabieh et du Nord Tadjoura dans le prolongement l'une de l'autre.

Tout se passe donc comme si le golfe de Tadjoura était la conséquence d'une rotation anti-horaire de la biellette, de 9,1° par rapport à un horst d'Aïscha fixé ou de 10,8° par rapport à la Nubie en tenant compte de la composante Est du mouvement Somalie/Nubie dans la région d'Aïscha [Le Pichon et Francheteau, 1978]. Ce mouvement dans le golfe serait essentiellement un cisaillement avec une faible composante d'ouverture (fig. 2 et 3). Ce mouvement pourrait aussi être à l'origine de l'épisode de compression mis en évidence dans la région d'Arta et daté de 3,5 Ma. [Arthaud et Choukroune, 1976] : c'est à cette époque, qui voit un changement radical dans le régime de la déformation intralithosphérique [Arthaud *et al.*, 1980] que peut être placé le début des déplacements relatifs Danakil-Aïscha avec le système proposé. Le rift d'Asal serait, dans cette optique, l'équivalent actuel des grandes dépressions de Hanle et de Gaggade qui lui sont grossièrement parallèles, qui représenteraient autant de sauts de dorsale et qui auraient été ensuite plus ou moins ennoyées sous la série stratoïde (la comparaison de la nouvelle carte aéromagnétique avec la carte géologique CNR-CNRS montre que les sources magnétiques ne sont probablement pas localisées dans la série stratoïde).

La dépression de Bada Weyn serait le type de structure témoin de l'écartement avec composante dextre entre Danakil et Aïscha. La série stratoïde

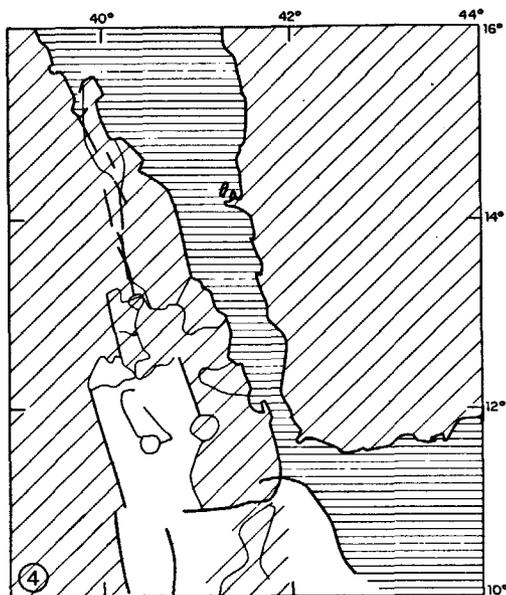
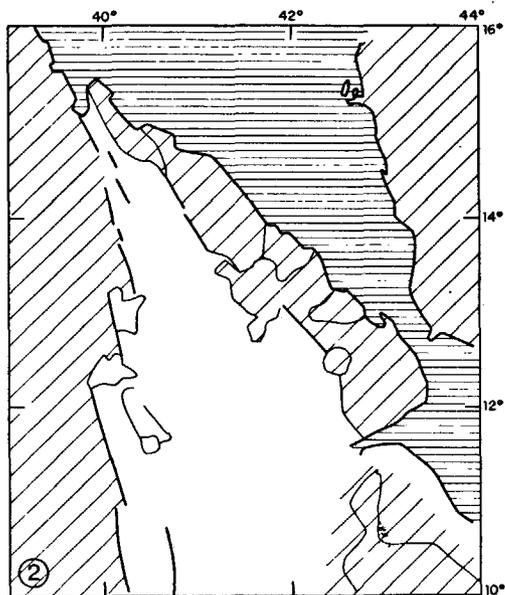


FIG. 2, 3 et 4. — Situations respectives des grands blocs et de la bielle danakile à différentes époques.  $\alpha$  est l'angle de rotation compté négativement dans le sens horaire.

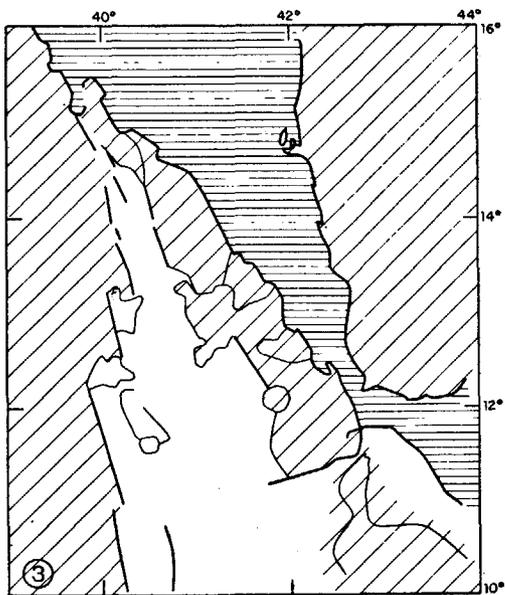
FIG. 2. — Situation actuelle.

FIG. 3. — Situation il y a 4 Ma environ - Afrique fixe.

Rotation finie : Arabie Afrique : lat.  $36^{\circ}5$  N, long.  $18^{\circ}$  E,  
 $\alpha = -1^{\circ}6$   
 — : Biellette Afrique : lat.  $15^{\circ}5$  N, long.  $40^{\circ}$  E,  
 $\alpha = -11^{\circ}$   
 — : Somalie Afrique : lat.  $1^{\circ}07$  N, long.  $27^{\circ}4$  E,  
 $\alpha = 0^{\circ}65$

FIG. 4. — Situation Oligo-Miocène - Afrique fixe

Rotation finie : Arabie Afrique : lat.  $36^{\circ}5$  N, long.  $18^{\circ}$  E,  
 $\alpha = -3,2$   
 — : Biellette Afrique : lat.  $15^{\circ}5$  N, long.  $40^{\circ}$  E,  
 $\alpha = -23^{\circ}$   
 — : Aischa Afrique : lat.  $16^{\circ}2$  N, long.  $40^{\circ}8$  E,  
 $\alpha = -11,4^{\circ}$



est datée de 1 à 4 Ma. En supposant qu'elle s'est épanchée dès le début de la rotation, la région de Tadjoura se serait alors déplacée de 80 km en quatre millions d'années, ce qui correspond à une vitesse d'ouverture de 2 cm/an, valeur proche ou identique aux évaluations antérieures pour le rift d'Asal [1,5 à 2 cm/an, Delebrias *et al.*, 1975]. Si on reprend les paramètres de MacKenzie *et al.* [1970] pour la rotation Arabie-Afrique on trouve une vitesse de déplacement de l'île de Perim de 1,94 cm/an par rapport à l'Afrique.

Les résultats paléomagnétiques de la région d'Assab [Schult, 1974] sur des basaltes de 6,7 Ma indiquent une déclinaison de  $6^\circ \pm 3,4^\circ$  W. Ceux relatifs au volcanisme d'Aden daté de 5 Ma [Tarling, 1970] montrent une déclinaison de  $7^\circ \pm 2,7^\circ$  E. Il faut alors admettre une rotation relative Bielletle-Arabie d'environ  $13^\circ \pm 6^\circ$  en 5 ou 6 Ma. La rotation

correspondante Bielletle - Afrique n'est pas directement accessible faute de résultats paléomagnétiques en Nubie concernant des roches de cet âge. Il est tout de même possible de l'évaluer en considérant le triangle sphérique (fig. 5) constitué par l'Articulation sud (A.S.), symbolisée par l'île de Perim, le pôle Arabie-Nubie et la Bielletle dont on connaît la longueur d'arc. La Bielletle aurait alors tourné de  $14,8^\circ \pm 6,8^\circ$  par rapport à l'Afrique en 5 ou 6 Ma.

L'angle de rotation, estimé à partir des considérations géologiques, bien qu'étant dans la fourchette précédente, est un peu faible, peut-être est-ce l'effet de la différence des durées envisagées : 4 Ma d'une part contre 5 à 6 Ma d'autre part. Mais il faut alors admettre qu'il y avait mouvement vers 5 ou 6 Ma contrairement aux hypothèses de Girdler et Styles [1974, 1976, 1978] qui envisagent une période calme à cette époque.

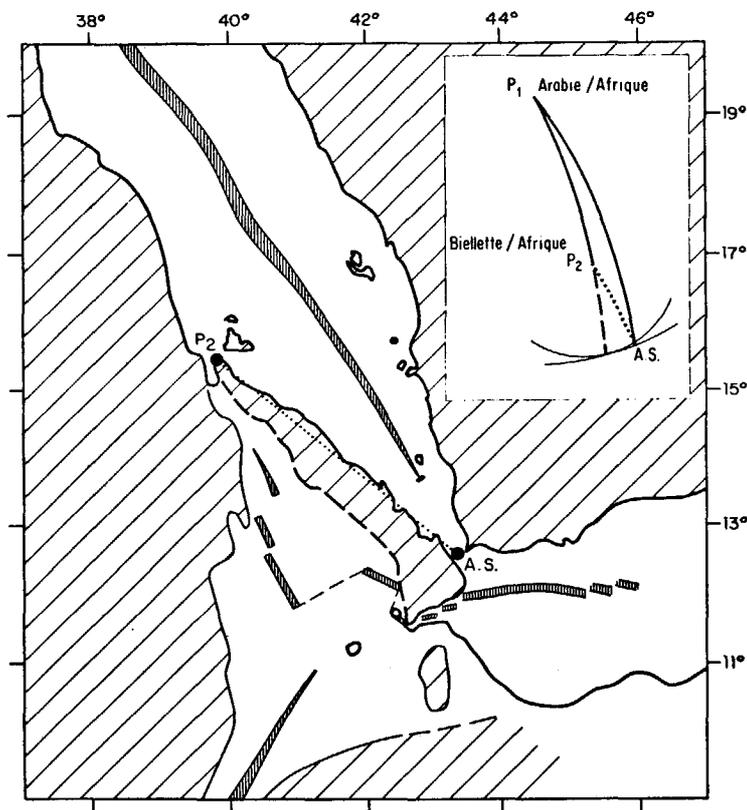


FIG. 5. — Triangle sphérique constitué par les pôles P<sub>1</sub> (Arabie-Afrique), P<sub>2</sub> (Danakil-Afrique) et A.S. (Articulation Sud de la Bielletle).

## B) Discussion.

Le fonctionnement d'une telle biellette est limité dans le temps pour des raisons de géométrie : l'Articulation Sud (A.S.), appartenant à la fois à la plaque arabe et à la plaque danakile ne peut théoriquement pas tourner à la fois autour du pôle  $P_1$ , Arabie/Afrique (36,5 N, 18° E) et autour du pôle  $P_2$ , Danakil/Afrique (15°30 N et 40° E). Pratiquement on peut admettre que ce mouvement est tout de même possible, à des déformations de second ordre près, dans le cas où le petit cercle centré sur le pôle  $P_2$  tangente intérieurement le petit cercle sur  $P_2$ , au point A.S.

Connaissant les coordonnées des pôles  $P_1$  et  $P_2$  et du point d'articulation (fig. 5), on peut calculer que l'angle actuel  $P_1 P_2$  A.S. = 170°. Comme on a vu que la biellette avait subi une dizaine de degrés de rotation par rapport à l'Afrique durant ces cinq derniers millions d'années, on peut constater que la condition de tangence des petits cercles était parfaitement réalisée au début de cette période. Néanmoins, il est logique de penser que ce système s'arrête de fonctionner dès qu'il s'éloigne trop de cette condition : on peut aussi interpréter le calme sismique actuel dans la région de Bab el Mandeb comme le signe de cet arrêt. Les causes d'un tel arrêt peuvent être recherchées soit dans le fonctionnement d'une zone transformante Zukur Dubi qui pourrait alors évoluer comme un nouveau golfe de Tadjoura, soit plus vraisemblablement dans la rupture du point d'articulation de Zula ainsi que le suggèrent d'une part la sismicité le long de la marge éthiopienne et d'autre part le prolongement en mer, jusqu'à 17° N (au moins), du « West Danakil Rift » [Lowell et Genik, 1972]. C'est peut-être dans cette région qu'il faut rechercher une ouverture par « déchirement progressif » [Courtilot, 1980].

Pour ces quatre à cinq derniers millions d'années, le modèle d'une biellette de Zula à Tadjoura est susceptible de rendre compte des faits observés y compris le plus récent [A.-M. Anis *et al.*, 1979] et peut s'intégrer dans la cinématique générale de la région.

L'extrapolation du modèle dans le temps est plus hypothétique : l'ajustement Arabie-Afrique, même dans la configuration précédemment définie pour le mio-pliocène, n'est en effet pas résolu. En l'absence de cisaillement et d'une importante ouverture le long du Rift Est Africain, on ne peut éviter un recouvrement de la plaque arabe sur une grande partie de l'Afar et sur le horst d'Aischa [Laughton, 1966 ; MacKenzie, 1970 ; Beydoun, 1970, etc.]. Les résultats paléomagnétiques de Burek [1970] suggèrent que les Alpes danakiles ont tourné de 23 à 30° depuis l'Oligo-Miocène par rapport au plateau Ouest éthiopien. Si les derniers 11° de la rotation proposée avec le système précédent ont eu

lieu au cours des cinq derniers millions d'années, on peut encore rabattre le bloc danakil, ou ce qu'il en existait, de 12° vers l'Afrique et ainsi supprimer le recouvrement Ouest. Cependant, rien n'est changé au Sud : le horst d'Aischa ne peut donc avoir été fixe par rapport à la Somalie. On peut alors imaginer deux hypothèses : 1) soit le fonctionnement précoce d'une biellette intégrant ce microbloc méridional qui aurait subi avec le bloc danakil une rotation anti-horaire de  $\approx 12^\circ$  autour du pôle situé dans la région de Zula (fig. 4) ; 2) soit un déplacement indépendant par rapport au horst danakil [Choukroune, 1980 : comm. pers.] prenant en compte l'atténuation crustale de cette région évoquée précédemment [Black *et al.*, 1980].

## CONCLUSION.

Des tests simples peuvent être proposés pour décider de la solution à envisager : des terrains identiques s'échelonnent de 6 à 25 millions d'années dans la région d'Ali Sabieh et au Nord de Tadjoura. On peut penser qu'une étude paléomagnétique différentielle étroitement associée à une géochronologie fine, permettra de mettre en évidence des différences de déclinaison moyenne de l'ordre de 10° entre des roches de même âge. Si l'interprétation de ces différences s'avérait ambiguë il serait encore possible de comparer ces résultats à ceux qui ont été obtenus sur les trapps des plateaux éthiopiens : des différences angulaires doubles ou triples représentant alors les rotations totales des blocs ne pourraient passer inaperçues. En définitive, que les résultats paléomagnétiques confirment ou infirment le « modèle biellette », les limites de la tectonique des plaques en sortiront précisées.

On peut rappeler que dans l'Atlantique, certaines structures obliques anormales, de type « micro-continent », ont été interprétées de façon analogue par Auzende *et al.* [1980]. Il s'agit par exemple du banc de Rockall, de la ride de Jan Mayen, ou de plateaux marginaux comme ceux de Voringe, de Black, ou même des Baléares en Méditerranée. Tout récemment, une hypothèse relativement comparable a été proposée pour l'interprétation de la ride de Walvis en Atlantique Sud [Van der Linden, 1980].

Toutes ces structures plus ou moins décollées de leur continent d'origine pourraient représenter d'anciennes biellettes dont une articulation s'est rompue.

Je remercie G. Auffret, J. M. Auzende, P. Beuzart, P. Choukroune et J. L. Olivet qui m'ont aidé par leurs remarques et leurs critiques sur la forme et sur le fonds. Sans l'intérêt et les encouragements de Norbert Bonhommet, l'idée n'aurait sans doute pas pris forme.

1. Il faut remarquer que l'angle total utilisé représente la limite inférieure de ce qui est indiqué par le paléomagnétisme. Si on veut éviter le recouvrement du Plateau éthiopien et du bloc Danakil on ne peut augmenter cet angle, et la fermeture totale de la Mer rouge n'est pas réalisée. Mais si l'extension crustale du bloc Danakil peut atteindre 100 % [Le Pichon, 1980, comm. pers.], alors les dimensions transversales initiales étant réduites de moitié on peut augmenter l'angle de rotation

comme le suggèrent les données paléomagnétiques (qui ne sont théoriquement pas affectées par l'extension), et la fermeture de la Mer rouge s'en trouve facilitée.

Pour préciser les mouvements et leur chronologie il faudrait considérer l'éirement en fonction du temps et le chiffrer en différents points du méga-système golfe d'Aden - Afar - Mer rouge, ce qui dépasserait, bien évidemment, le cadre envisagé ici.

## Références

- ANIS A.-M., COURTILOTT V., KASSER M., LE DAIN A. Y., LÉPINE J. C., ROBINEAU B., RUEGG J. C., TAPFONNIER P. et TARANTOLA A. (1979). — Relevance of Afar seismicity and volcanism to the mechanics of accreting plate boundaries. *Nature*, vol. 282, p. 17-23.
- ARTHAUD F. et CHOUKROUNE P. (1976). — Mise en évidence d'une phase de compression à 3,5 Ma séparant deux épisodes d'ouverture du rift océanique de Tadjourah (TFAI). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, D, 283, p. 13-16.
- AUZENDE J. M., BEUZART P., BONNIN J., OLIVET J. L., SICHLER B. et UNTERNEHR P. (1980). — Mode de dislocation des continents lors des stades initiaux d'ouverture. 8<sup>e</sup> Réunion. ann. sci. Terre, Marseille. Livre en dépôt à la Soc. géol. de France.
- BARBERI F., FERRARA G., SANTACROCE R. et VARET J. (1975). — Structural evolution of the Afar triple junction. *In*: Afar depression of Ethiopia. Schweizerbart, Stuttgart, p. 38-54.
- BARBERI F. and VARET J. (1977). — Volcanism of Afar: small scale plate tectonics implications. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, v. 88.
- BERCKHEMER H., BAIER B., BARTELSSEN H., BEHLE A., BURKHARDT H., GEBRANDE H., MAKRISS J., MENZEL H., MILLER H. et VEES R. (1975). — Deep seismic soundings in the Afar region and on the highland of Ethiopia. *In*: Afar depression of Ethiopia. Schweizerbart, Stuttgart, p. 89-107.
- BEYDOUN Z. R. (1970). — Southern Arabia and northern Somalia: comparative geology. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A 267, p. 267-292.
- BLACK R., MORTON W. H. and VARET J. (1972). — New data on Afar tectonics. *Nature Phys. Sc.*, 240, p. 170-173.
- BUREK P. J. (1970). — Paleomagnetic evidence for an anticlockwise rotation of the Danakil Alps, Ethiopia. *EOS*, t. 51, p. 271.
- COURTILOTT V. (1980). — Opening of the gulf of Aden and Afar by progressive tearing. *Phys. Earth Planet. Int.*, 21, p. 343-350.
- COURTILOTT V. et LE MOUËL J. L. (1978). — Le levé aéromagnétique de la République de Djibouti, IPGP. Observations Magnétiques, Paris, 39 p.
- COURTILOTT V., TAPFONNIER P. et VARET J. (1974). — Surface feature associated with transform faults: a comparison between observed examples and our experimental model. *Tectonophysics*, 24, p. 317-329.
- COURTILOTT V., GALDEANO A. et LE MOUËL J. L. (1980). — Propagation of an accreting plate boundary: A discussion of New Aeromagnetic Data in the gulf of Tadjura and southern Afar. E.P.S.L. (in press).
- DELIBRIAS G., MARINELLI G. et STIELTJES L. (1975). — Spreading rate of the Asal Rift: a geological approach. *in*: Afar depression of Ethiopia. Schweizerbart, Stuttgart, p. 214-221.
- FAIRHEAD J. D. and GIRDLER R. W. (1972). — The seismicity of the east african Rift system. *in*: R. W. Girdler (Editor), East African Rifts. *Tectonophysics*, 15 (1/2), p. 115-122.
- GIRDLER R. W. and EVANS T. R. (1977). — Red Sea heat flow. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 51, p. 245-251.
- GIRDLER R. W. and STYLES P. (1974). — Two stage Red Sea floor spreading. *Nature*, vol. 247, p. 7-11.
- GIRDLER R. W. and STYLES P. (1976). — The relevance of magnetic anomalies over the southern Red Sea and gulf of Aden to Afar. *in*: Afar between continental and oceanic rifting. Schweizerbart, Stuttgart, p. 156-170.
- GIRDLER R. W. and STYLES P. (1978). — Sea floor spreading in the western gulf of Aden. *Nature*, vol. 271, n° 5 646, p. 615-617.
- LAUGHTON A. S. (1966). — The gulf of Aden in relation to the Red Sea and the Afar depression of Ethiopia. The world Rift system (Report of UMC Symposium, Ottawa, sept. 1965). *Geol. Surv. Pap. Can.*, 66-14, p. 78-97.
- LE PICHON X., FRANCHETEAU J. et BONNIN J. (1973). — Plate tectonics. Elsevier, Amsterdam, 300 p.
- LE PICHON X. et FRANCHETEAU J. (1978). — A plate tectonic analysis of the Red Sea - Gulf of Aden area. *Tectonophysics*, 46, p. 369-406.
- LOWELL J. D. and GENIK G. J. (1972). — Sea floor spreading and structural evolution of southern Red Sea. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 56, p. 247-259.
- MAASBA N. and MOLNAR P. (1972). — Earthquake fault parameters and tectonics in Africa. *J. Geophys. Res.*, vol. 77, n° 29, p. 5731-5743.
- MACKENZIE D., DAVIES D. and MOLNAR P. (1970). — Plate tectonics of the Red Sea and East Africa. *Nature*, vol. 226, p. 243-248.
- MAKRIS J., MENZEL H., ZIMMERMAN Y. and GOUIN P. (1975). — Gravity field and crustal structure of North Ethiopia. *in*: Afar depression of Ethiopia. Schweizerbart, Stuttgart, p. 135-144.
- MARINELLI G. et VARET J. (1973). — Structure et évolution du Sud du « horst Danakil » (TFAI et Ethiopie). *C. R. Ac. Sc.*, Paris, t. 276, p. 1119-1122.
- MOHR P. A. (1970). — The Afar triple junction and sea-floor spreading. *J. Geophys. Res.*, 75, p. 7340-7352.

- MOHR P. A. (1972). — Surface structure and plate tectonics of Afar in East African Rifts. *Tectonophysics*, 15 (1/2), p. 3-18.
- MOLNAR P., FITCH T. J. and ASFAW L. M. (1970). — A micro-earthquake survey in the Ethiopian rift. *Earthquake notes* 41, p. 37.
- ROESER H. A. (1975). — A detailed magnetic survey of the southern Red Sea. in : *Geologisches Jahrbuch D* 13, p. 131-153. Hannover.
- RUEGG J. C. (1974). — Structure profonde de la croûte terrestre au moyen des grands profils sismiques. Application à l'étude des zones de distension (sud-est Afar et Massif central français). Thèse doctorat d'État, Paris.
- RUEGG J. C. (1975). — Structure profonde de la croûte et du manteau supérieur du sud-est de l'Afar d'après les données sismiques. *Am. Geophys. t.* 31, n° 3, p. 329-360.
- SCHULT A. (1974). — Paleomagnetism of tertiary volcanic rocks from the Ethiopian southern plateau and the Danakil block. *J. Geophys.* 40, p. 203-212.
- TARLING D. H. (1970). — Paleomagnetism and the origin of the Red Sea and gulf of Aden. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A 267, p. 219-226.
- TAZIEFF H., VARET J., BARBERI F. and GIGLIA G. (1971). — Tectonic significance of the Afar (of Danakil) depression. *Nature*, vol. 235, n° 5 334, p. 144-147.
- TREUIL M. et VARET J. (1973). — Critères volcanologiques, pétrologiques et géochimiques de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques : exemple de l'Afar. *Bull. Soc. géol. France* (7), XV, p. 506-540.
- VARET J. (1973). — Critères pétrologiques, géochimiques et structuraux de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques : exemple de l'Afar. Thèse Doctorat d'État, Univ. Paris-Sud, 491 p.
- VAN DER LINDEN WILLEM J. M. (1980). — Walvis Ridge, a piece of Africa? *Geology*, v. 8, p. 417-421.
- WEGENER A. (1929). — Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Vieweg, Braunschweig.