

Sondeur multifaisceaux  
Fosses  
Ouverture océanique  
Hydrothermalisme

Seabeam  
Deep  
Oceanic rifting and drifting  
Hydrothermalism

# Les fosses de la Mer Rouge : approche géomorphologique d'un stade initial d'ouverture océanique réalisée à l'aide du Seabeam

G. Pautot  
Centre Océanologique de Bretagne, BP 337, 29273 Brest cédex.

Reçu le 17/12/82, révisé le 18/2/83, accepté le 28/2/83.

## RÉSUMÉ

L'utilisation du sondeur multifaisceaux Seabeam au cours d'un transit du N.O. Jean Charcot en Mer Rouge a permis de cartographier les fosses qui se disposent dans la vallée axiale. Les fosses Oceanographer, Kebrit, Vema, Nereus et Atlantis II ont été ainsi cartographiées, et une analyse morphologique est présentée. La région des fosses Atlantis II a été également étudiée pour comprendre la logique structurale de cette partie médiane complexe. Une discussion est amorcée sur la présence de la vallée axiale s'étendant dans la portion septentrionale de la Mer Rouge. L'influence de la couche évaporitique et des accidents transverses est évoquée. Les fosses à hydrothermalisme actif semblent disposées préférentiellement dans la vallée axiale au contact de failles transformantes.

*Oceanol. Acta*, 1983, 6, 3, 235-244.

## ABSTRACT

### Red Sea deeps: a geomorphological study by Seabeam

The axial depression of the Red Sea was studied using the "Seabeam" multi-beam echo-sounder during a cruise of the R.V. Jean Charcot. Several deeps were mapped: Oceanographer, Kebrit, Vema, Nereus and Atlantis II, and a morphological analysis is presented. The Atlantis II area is also studied in order to understand the complex structural framework of this region. The presence or absence of oceanic crust in the northern part of the Red Sea is discussed. The influence of the Miocene evaporitic layer and transverse faults is taken into account in this northern part. Deep with hydrothermal activity and/or deposits appear to be preferentially disposed at the intersection of rift structures and transform faults.

*Oceanol. Acta*, 1983, 6, 3, 235-244.

## INTRODUCTION

Au cours d'un transit du N.O. Jean Charcot du CNEXO entre Port-Saïd et Djibouti, l'utilisation du sondeur multifaisceaux Seabeam a permis d'acquérir de nouvelles données dans la vallée axiale de la Mer Rouge. Le schéma de la figure 1, d'après Bertin *et al.* (1979) rend compte des grandes unités morphologiques et structurales de la Mer Rouge. On y distingue la vallée axiale, emboîtée dans une dépression centrale, et les bordures constituant le plateau. La zone axiale correspond à la phase moderne d'expansion des fonds

marins avec mise en place de basaltes de type océanique. Dans cette zone axiale, on a décrit 24 fosses (Guennoc, Thisse, 1982) qui contiennent des saumures chaudes ou froides et/ou des sédiments hydrothermaux chargés de particules métalliques.

La plupart de ces fosses ont été visitées au cours du transit et cinq d'entre elles ont été cartographiées (fig. 2). Le levé a été effectué à l'échelle du 1/25 000<sup>e</sup> avec équidistance des isobathes de 10 m par des profils parallèles avec recouvrement latéral des zones balayées par le sondeur. L'aide à la navigation était un récepteur satellites.

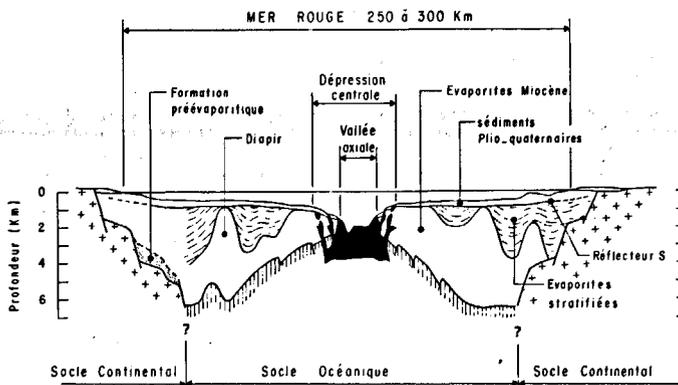


Figure 1  
 Coupe géologique schématique de la Mer Rouge (d'après Bertin et al., 1979).  
 Schematic geological cross section in the central Red Sea (from Bertin et al., 1979).

**CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE LA ZONE AXIALE**

La profondeur de la zone axiale va s'accroissant du Nord au Sud, pour atteindre une profondeur maximum de 2 800 m à la latitude de 19°35'N au niveau de la fosse Suakin. Cette profondeur diminue ensuite vers le Sud à l'approche des îles Farisan, où la vallée axiale s'estompe.

La profondeur de la zone axiale ne varie pas de manière progressive mais par gradins.

On peut, comme Coleman (1974), définir dans l'orientation générale NW-SE de l'axe une succession de segments à orientations successives NW-SE et N-S. Cinq segments peuvent être ainsi individualisés (fig. 2).

Du Nord au Sud et segment par segment, nous avons visité les zones les plus profondes de la vallée axiale, qui constituent des fosses où s'épanchent des saumures et où s'accumulent préférentiellement des sédiments hydrothermaux.

**MORPHOLOGIE DES FOSSES**

Sur le segment I, le plus septentrional, une seule fosse est connue : celle de l'Oceanographer. Elle a été découverte en 1957 par le Navire Oceanographer qui a détecté un écho correspondant au toit des saumures, et des sédiments ont été prélevés en 1971 par le navire Nereus.

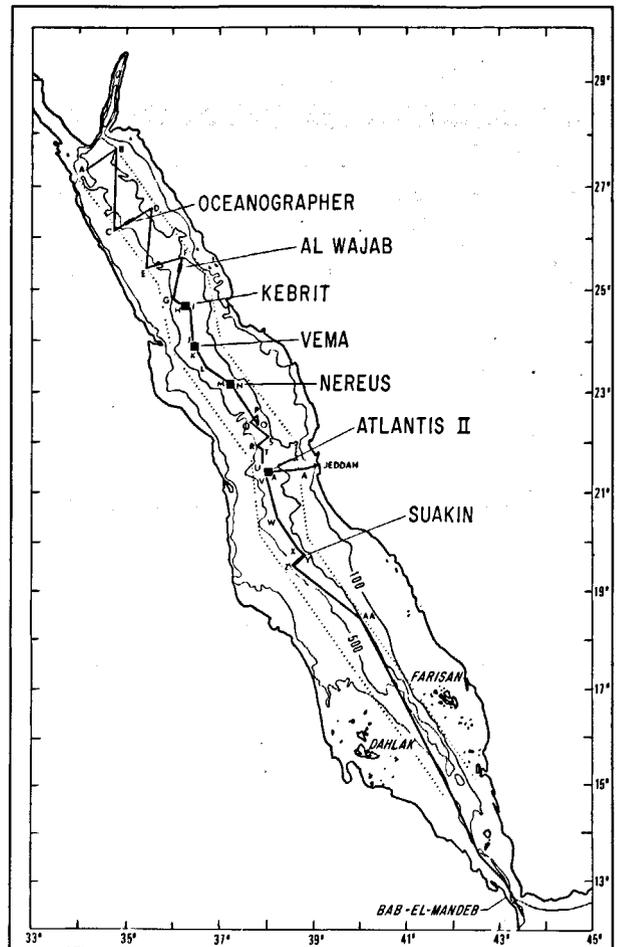


Figure 2  
 Parcours du N.O. « Jean Charcot » durant la campagne Merou. La cartographie complète des fosses est indiquée par un rond noir. Les cinq segments principaux sont représentés en pointillés (Coleman, 1974).  
 Routes of N.O. "Jean Charcot" during Merou cruise. Black circles indicate deeps which are completely mapped. Dotted lines represent the five main segments (after Coleman, 1974).

En un seul passage orienté SW-NE (profil CD, fig. 2) nous avons déterminé la morphologie générale de cette fosse (fig. 3). La position du fond de la fosse est 26°17'N et 35°E. Le fond de la fosse est relativement plan, avec une forme générale ovoïde dont le grand axe mesure un peu plus d'1 km. Deux vallées d'orientation SW-NE sont visibles, et se marquent sur les 500 m de dénivelée des flancs de la fosse. La profondeur maximum est de 1 490 m n.c. (non corrigés). L'épaisseur n.c. des saumures est de 90 m. Le Seabeam pénètre bien les saumures et le réflecteur du toit des saumures est visible seulement sur le faisceau vertical.

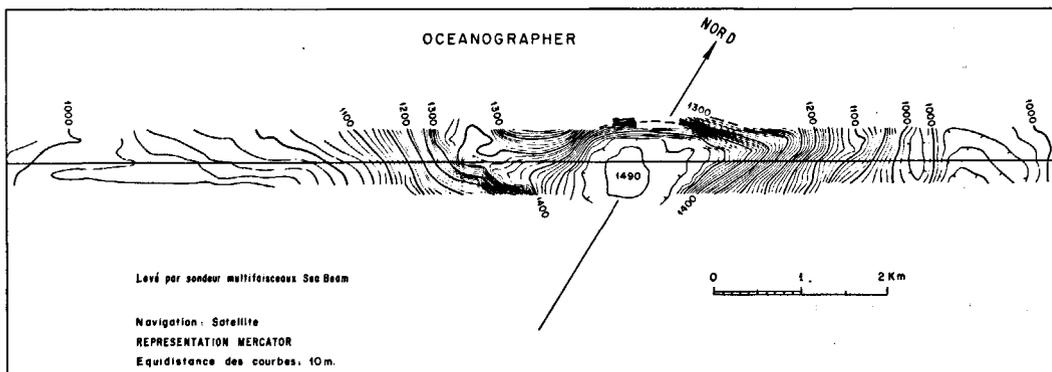
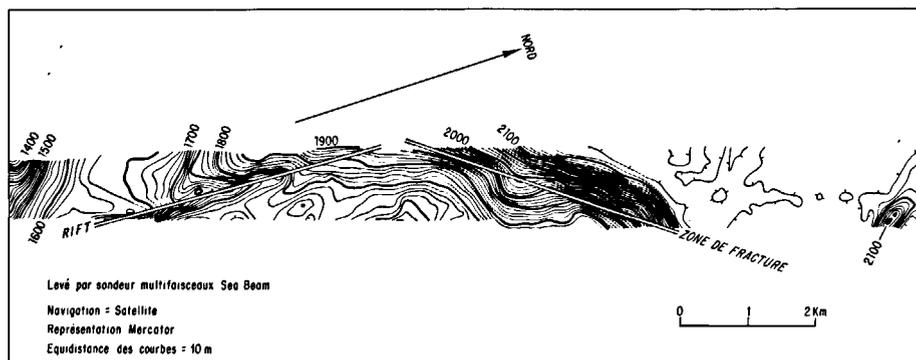


Figure 3  
 Partie du profil CD passant sur la fosse Oceanographer.  
 Section of CD profile crossing Oceanographer deep.

Figure 4

Partie du profil FG passant sur la fosse Al Wajab. La direction rift est orientée NS et la direction transformante est N35° E.

Section of FG profile crossing Al Wajab deep. The rift direction is oriented NS and the transform fault direction is oriented N35° E.



A 25°25'N on arrive à la jonction du segment I et II. Le profil FG (fig. 2) passe sur une dépression dépassant 2 180 m de profondeur : c'est la fosse Al Wajab (36°08'E et 25°20'N). Cette fosse est peu connue, et aucune étude spécifique ne semble avoir été menée (Guennoc, Thisse, 1982). Notre profil (fig. 4) est intéressant, car il souligne deux directions structurales conjuguées : l'une formant des reliefs allongés est de type intrusion dans un rift et orientée NS, et l'autre constitue un flanc de la fosse. Cette dernière direction (N35°E) serait à rattacher à une direction transformante, et elle est soulignée par une anomalie magnétique puissante d'orientation absolument concordante (Hall, 1979). Il est à noter que les directions rift et transformante ne sont pas orthogonales. Sur le segment II, d'orientation NS, une fosse est connue : la fosse Kebrtit (24°44'N et 36°17'E) avec une dépression adjacente : la dépression Gypsum. Une cartographie de la zone Kebrtit-Gypsum a été réalisée à l'aide de 13 profils orientés E-W (fig. 5). Sur le faisceau vertical nous n'avons pas détecté d'écho correspondant au toit de saumures, alors que Bäcker et Schoell (1972) signalent 110 m de saumures à basse température (23°C) mais à chlorinité très élevée (153‰). Le fond de la fosse Kebrtit est plan, ovoïde, de dimension du kilomètre. Sa profondeur est de 1 510 m, soit très comparable à la fosse Oceanographer. L'allongement général de la fosse est NS prolongé par des vallées étroites. Cette direction

dominante est concordante avec celle du segment II. Des vallées plus larges se dessinent sur le flanc occidental avec une direction perpendiculaire soit EW. La partie plane dans laquelle est située cette fosse culmine à 1 100 m de profondeur. Les flancs de la fosse sont abrupts, principalement dans leur partie inférieure. Hall (1979) signale sur cette fosse une anomalie magnétique positive vigoureuse de 500 nT qui est interprétée comme due à une injection volcanique.

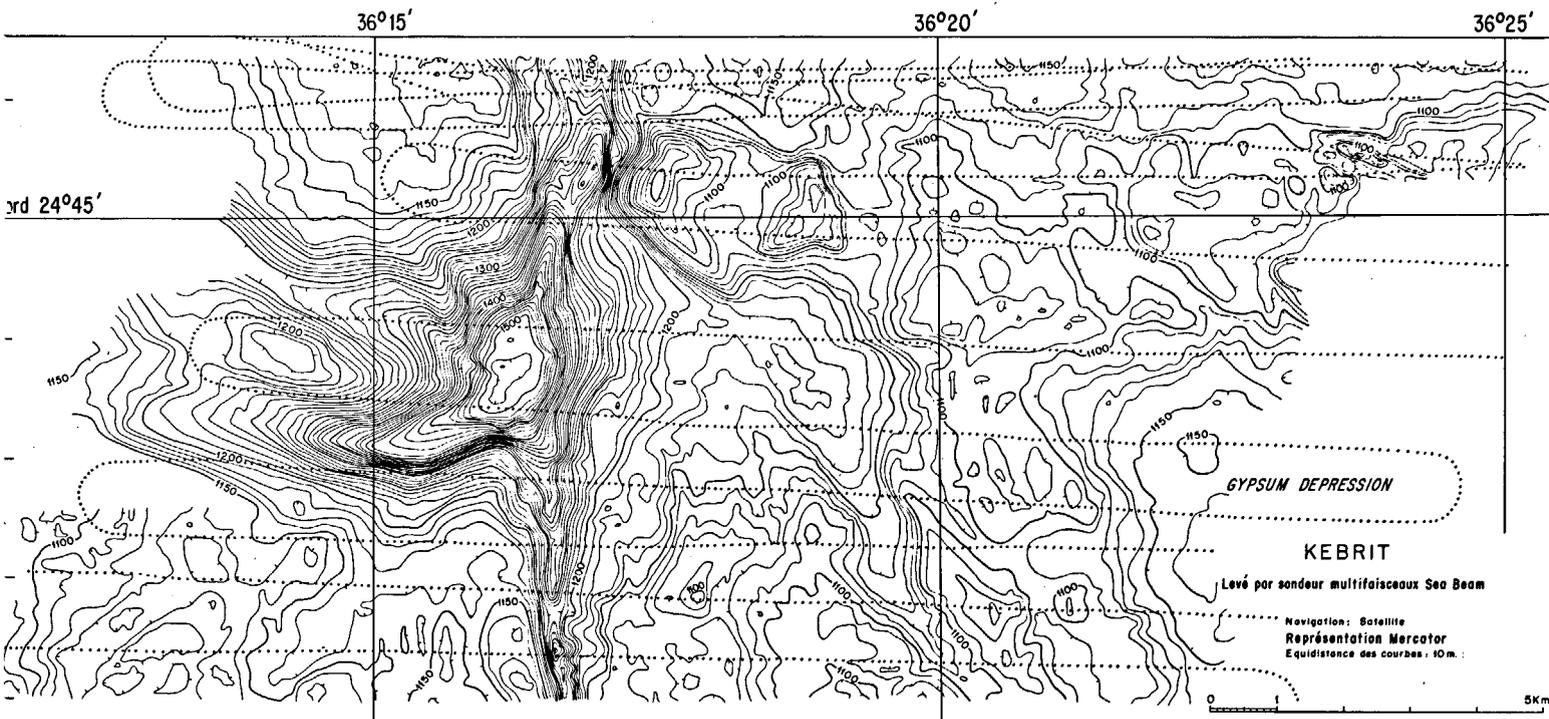
La dépression Gypsum n'a pas les caractéristiques d'une fosse mais celles d'une cuvette évasée avec une dénivelée générale inférieure à 100 m. On n'y signale pas de saumures mais des sédiments hydrothermaux riches en fer et un niveau de gros cristaux de gypse.

A la jonction entre le segment II et le segment III se présente une fosse dénommée Vema. Coleman (1974) place à ce niveau, comme à la jonction des segments I et II, une zone de fracture majeure. La cartographie de la fosse a été réalisée à l'aide de 7 profils orientés NW-SE (fig. 6). Position 23°54'N et 36°30'E.

Figure 5

Carte de la fosse Kebrtit et de son appendice, la dépression Gypsum. 13 profils Seabeam orientés EW ont été réalisés. Les sondes sont en mètres non corrigés. Équidistance des isobathes : 10 m.

Map of Kebrtit deep and the nearby Gypsum depression. 13 Seabeam profiles oriented EW were made. Depth is in non-corrected metres. Isobaths are at 10 m intervals.



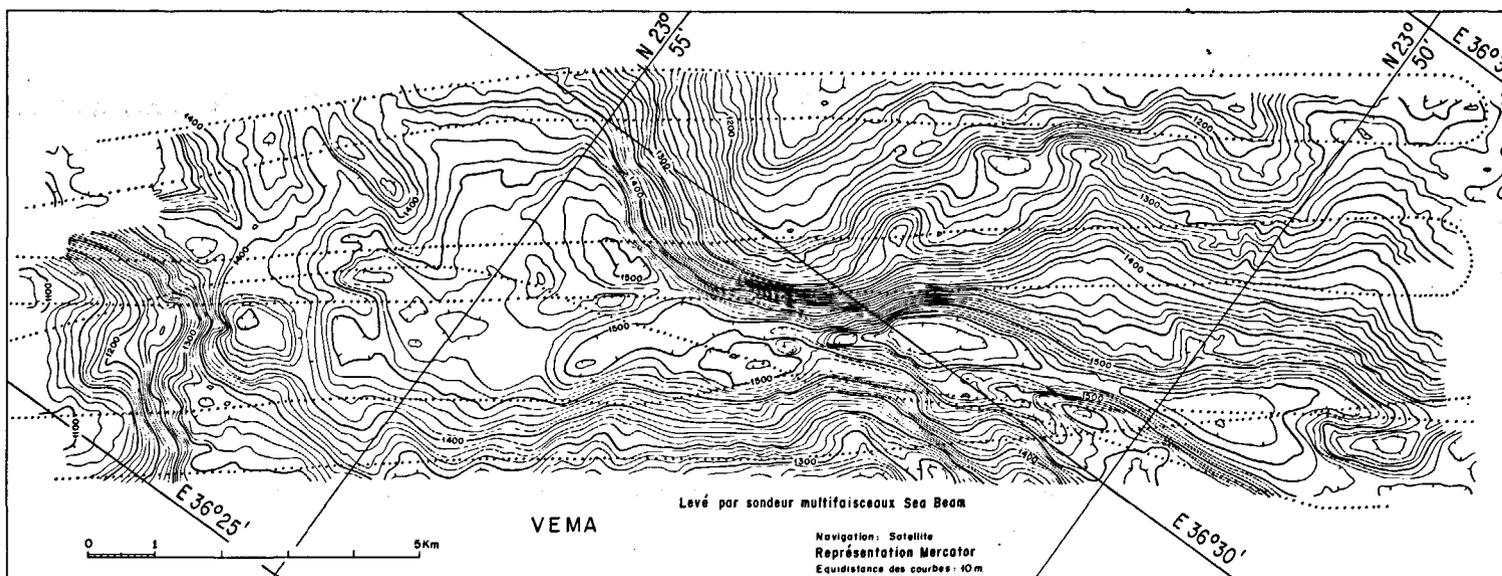


Figure 6

Carte de la fosse Vema; 7 profils Seabeam orientés NW-SE ont été réalisés.

*Map of Vema deep. 7 Seabeam profiles oriented NW-SE were made.*

Nous n'avons pas enregistré d'échos de saumures.

Cette fosse est cartographiée par Bäcker *et al.* (1975) comme une dépression ellipsoïdale. En fait, elle est constituée d'une succession de bassins ovoïdes allongés séparés par des seuils, et donnant à l'ensemble une structure générale linéaire allongée dans la direction du segment III soit NW-SE. Dans le cadran NW de la carte, une vallée transverse pourrait souligner une direction transformante. La profondeur (1 570 m n.c.) est encore comparable aux fosses précédentes. Les flancs présentent une dénivelée accentuée à leur base avec un caractère particulier arrondi et lobé.

Entre les latitudes 23°20'N et 23°30'N se manifeste un décalage latéral de la partie axiale de la Mer Rouge. L'ampleur de ce décalage est d'une vingtaine de kilomètres, avec un mouvement senestre. L'orientation de ce dernier tronçon est encore NW-SE, mais les caractères de la zone centrale se modifient fondamentalement : la profondeur atteint 2 300 m, une vallée axiale s'individualise en s'élargissant et en présentant une morphologie très comparable aux rifts océaniques classiques (Needham, Francheteau, 1974).

La première fosse de ce type, et la plus caractéristique, est la fosse Nereus (Bignell *et al.*, 1974). Position : 23°10'N et 37°12'E. Onze profils Seabeam ont été réalisés sur cette fosse (fig. 7). On n'a pas mis en évidence d'échos dus aux saumures, qui sont signalées comme étant de faible épaisseur (inférieure à 40 m). Cette vallée présente une forme en U. Les flancs latéraux sont très escarpés, présentant 1 000 m de dénivelée brutale. Ils sont linéaires et parallèles. Le fond de la vallée est large (de l'ordre de 10 km). Le plancher interne présente des reliefs centraux de 200 m disposés en chapelet, et des dépressions bordières circulaires d'une soixantaine de mètres de profondeur. C'est dans ces bassins latéraux du plancher interne de la fosse que Bäcker et Schoell (1972) signalent des saumures et des dépôts métallifères associés. La profondeur de ces bassins atteint 2 380 m n.c. La plate-forme dans laquelle

est située cette fosse est relativement plane et de profondeur comparable à la plate-forme bordant les fosses précédentes : 1 100 m. La différence fondamentale de cette fosse avec les rifts atlantiques ne se signale pas dans le plancher interne mais sur les flancs, qui ne présentent pas les gradins typiques séparés par un faille normal. Le schéma de la figure 1 explique cette morphologie par un comblement des structures océaniques latérales par les évaporites.

Le segment III de l'axe de la Mer Rouge portant la fosse Nereus se poursuit jusqu'à la latitude 21°50'N par les fosses Thetis, Hadarba et Hatiba. Ces fosses n'ont pas été cartographiées.

Vers 22°N, la vallée axiale est affectée par un nouveau décalage qui déplace, vers l'Ouest cette fois, le segment méridional. Il est à noter que cet accident transverse, comme le précédent, qui induit ce décalage, n'est pas visible dans la topographie sinon par un « comblement » de la vallée axiale.

Dans le segment IV, d'orientation générale NS, sont disposées en échelon une succession de fosses orientées NW-SE mais décalées les unes par rapport aux autres pour former une direction générale NS. C'est la portion la plus compliquée de la Mer Rouge au sens de la géomorphologie et où se trouve exacerbé le phénomène d'hydrothermalisme. La fosse Atlantis II est la mieux connue des fosses de Mer Rouge, principalement par les travaux des équipes allemandes. Elle atteint une profondeur de 2 200 m (fig. 8). Nous avons étendu par 27 profils le levé de la fosse Atlantis II sur une superficie d'environ 1 500 km<sup>2</sup> pour appréhender le cadre structural général de cette fosse (fig. 9). La carte de la fosse Atlantis II nous permet d'avancer une interprétation différente de Bäcker et Richter (1973). Ces auteurs considèrent que les deux bassins de la fosse Atlantis II (fig. 8) constituent le plancher interne du rift et le relief au centre serait le haut central. Ce relief est un volcan égueulé bien visible sur notre carte qui est implanté sur une pente abrupte à regard ouest. Nous interprétons cette pente en faille normale de bordure du rift avec la présence de volcan liée à la distension. Ceci nous conduit à proposer que le rift actuel est réduit au bassin occidental de la fosse Atlantis II. Le même type

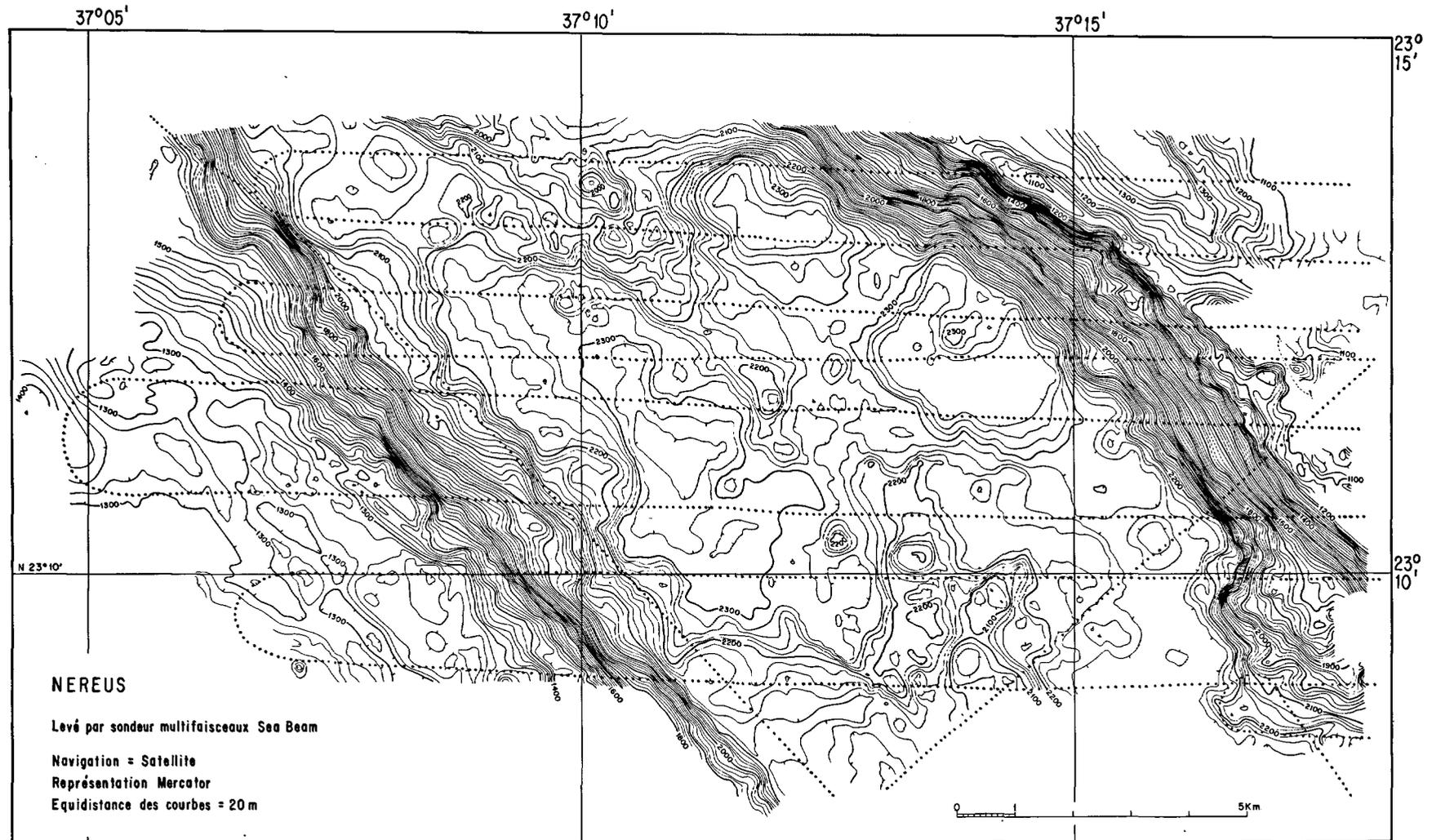


Figure 7

Carte de la fosse Nereus. 11 profils Seabeam orientés EW ont été réalisés. L'équidistance des isobathes est ici de 20 m.

Map of Nereus deep. 11 Seabeam profiles oriented EW were made. Isobaths are at 20 m intervals.

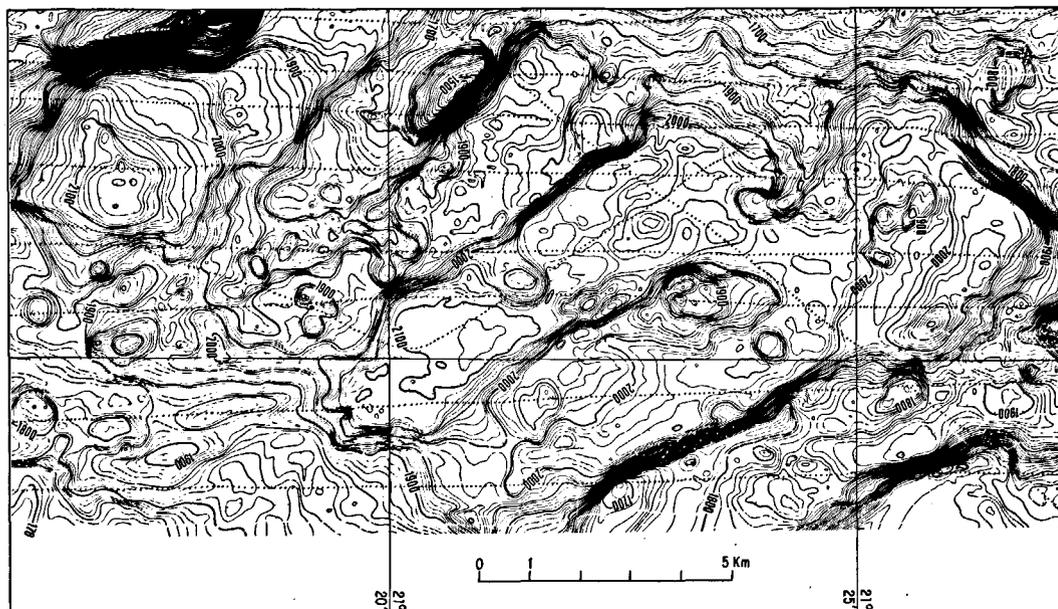


Figure 8  
Carte de la fosse Atlantis II.  
Map of Atlantis II deep.

d'analyse structurale sur toute la zone Atlantis II permet (fig. 10) de proposer une extension de tronçons de rift vers le sud, alors qu'au nord de la fosse Atlantis II les directions structurales sont gommées, vraisemblablement par la couverture évaporitique.

Pour cette interprétation, les volcans liés au failage normal de flancs de rift et les bassins triangulaires de jonction rift-zone transformante ont été utilisés. Les directions transformantes sont discrètes dans leur expression morphologique au nord et au sud du bassin Atlantis II, mais indéniables. Les bassins à saumures sont, dans cette zone, préférentiellement situés à proximité des jonctions rift-zone transformante.

A partir de 20°N, le segment V présente une direction générale NW-SE sans décalages importants apparents. La fosse à saumures la plus méridionale est la fosse *Suakin*, cartographiée par Baumann *et al.* (1973). C'est la fosse la plus profonde de la Mer Rouge (2 800 m) et elle est située vers 19°40'N. Son allure est très comparable à celle de la fosse Nereus : largeur du plancher interne 10 km, haut central, bassins bordiers à saumures, mais les flancs présentent plusieurs gradins comme les rifts atlantiques (fig. 11). Nous n'avons effectué qu'un profil sur cette fosse.

Cette fosse Suakin est fermée au Sud, puis une vallée en U caractéristique prend le relai vers le Sud sans accidents transverses notables et avec des profondeurs moindres, de l'ordre de 1 500 m.

Cette dernière zone a été observée directement par submersible vers 18°N (Monin *et al.*, 1981). Le plancher du rift a 4 km de largeur. Sa profondeur moyenne est de l'ordre de 1 600 m. Le haut central est constitué de collines volcaniques allongées parallèlement à l'axe du rift, et hautes de 200 à 300 m. Ce sont des volcans sous-marins fissuraux de moins de 300 000 ans d'âge. Les flancs sont subverticaux sur plus de 500 m de hauteur.

La zone d'extrusion a moins d'1 km de largeur et, fait remarquable, se dispose obliquement et en échelon sur le plancher du rift, décalée par plusieurs petits accidents transverses d'ordre hectométrique ou décamétrique. Ces

accidents transverses ne sont pas visibles de la surface, mais se manifestent en plongée par des murs de failles et parfois des formations bréchiques. Les murs latéraux sont constitués de pillow-lavas, presque entièrement incrustés de carbonates concrétionnés. Il n'a pas été observé d'activité hydrothermale.

Le taux d'accrétion calculé à ce niveau sur les derniers millions d'années est de 1,5 cm/an.

## DISCUSSION

Les observations directes par submersible (Monin *et al.*, 1981) comme les forages du Glomar Challenger (parcours 23; Whitmarsh *et al.*, 1974) montrent que la partie axiale profonde centrale et méridionale de la Mer Rouge, est de nature océanique. Elle est généralement considérée comme due à l'écartement des plaques Afrique-Arabie au cours des 3 à 5 derniers millions d'années. Cette phase d'ouverture actuelle est soulignée par des séismes du Golfe d'Aden jusqu'à 21°N (McKenzie *et al.*, 1970), soit jusque vers la fosse Atlantis II. La plupart des modèles proposent également un taux décroissant d'ouverture du sud au nord de la Mer Rouge : de 1,5 à 1 cm/an à la pointe du Sinaï (Le Pichon, Francheteau, 1978). Dans ce contexte, que représentent les fosses que nous avons étudiées ?

De façon schématique, on peut dire que si la portion méridionale de la Mer Rouge présente une vallée axiale que l'on peut comparer au rift du domaine atlantique, il en va différemment dans les portions médiane et septentrionale.

La portion médiane avec des fosses du type Atlantis II présente des fragments en forme générale de rift mais avec de nombreux décalages transverses.

En direction du Nord, après la fosse Nereus qui, morphologiquement, est de type rift, on passe à des fosses moins profondes en forme de sillon (Vema) puis enfin de forme ovoïde (Kebrit, Oceanographer).

Du Sud au Nord on a donc soit oblitération croissante du plancher interne du rift, soit un processus d'ouverture plus avancé au Sud qu'au Nord. En d'autres termes, les deux hypothèses en présence sont un comblement de la vallée axiale septentrionale océanique par les sédiments

(évacorites en particulier) ou une absence de plancher océanique dans la portion nord, qui n'en serait qu'au stade d'étirement de la croûte continentale.

Pour lever le doute entre ces deux hypothèses, on est obligé d'utiliser les méthodes géophysiques, seules

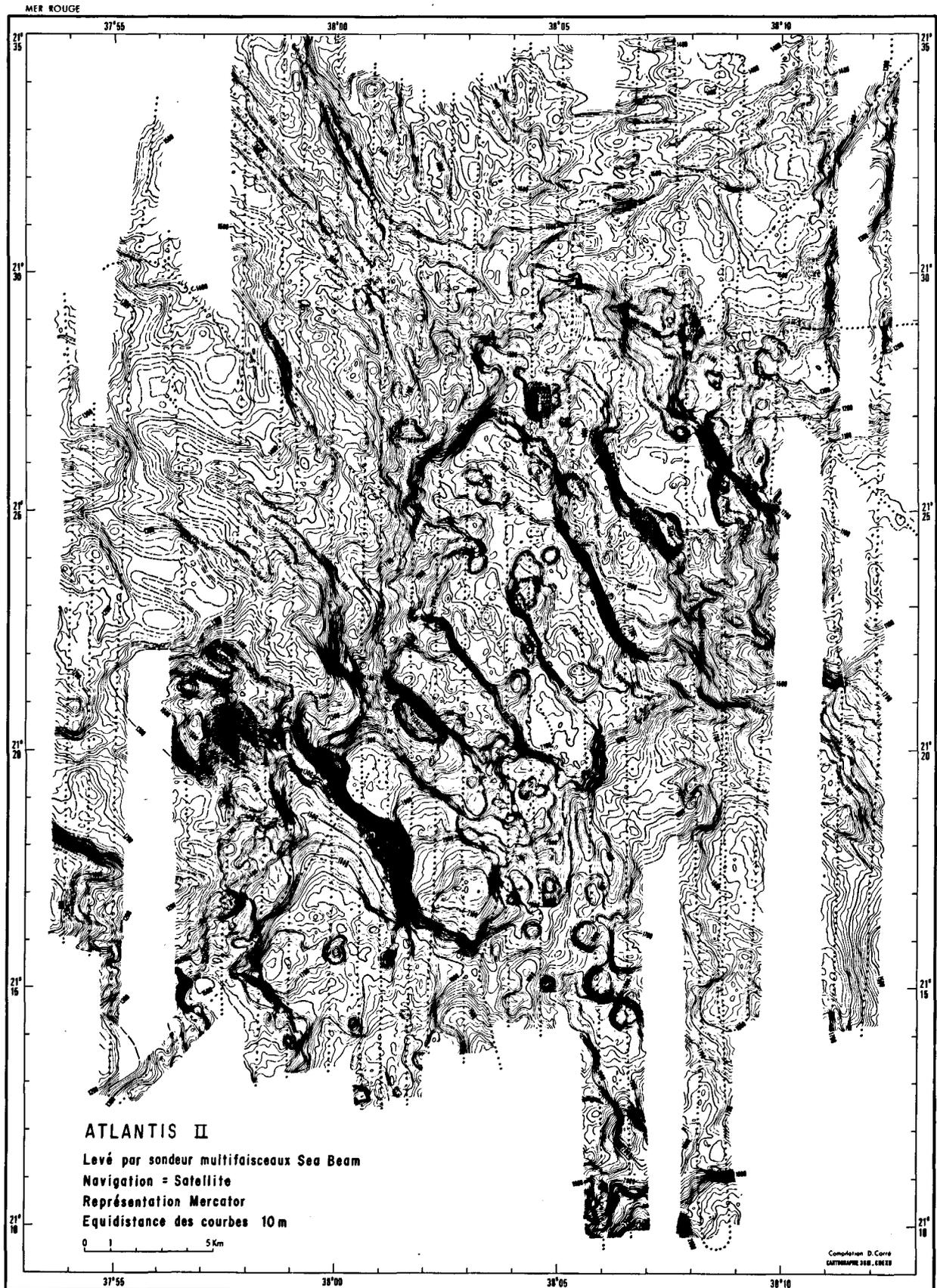


Figure 9  
Carte de la zone Atlantis II. 27 profils Seabeam orientés NS ont été réalisés.  
Map of Atlantis II area. 27 Seabeam profiles oriented NS were made.

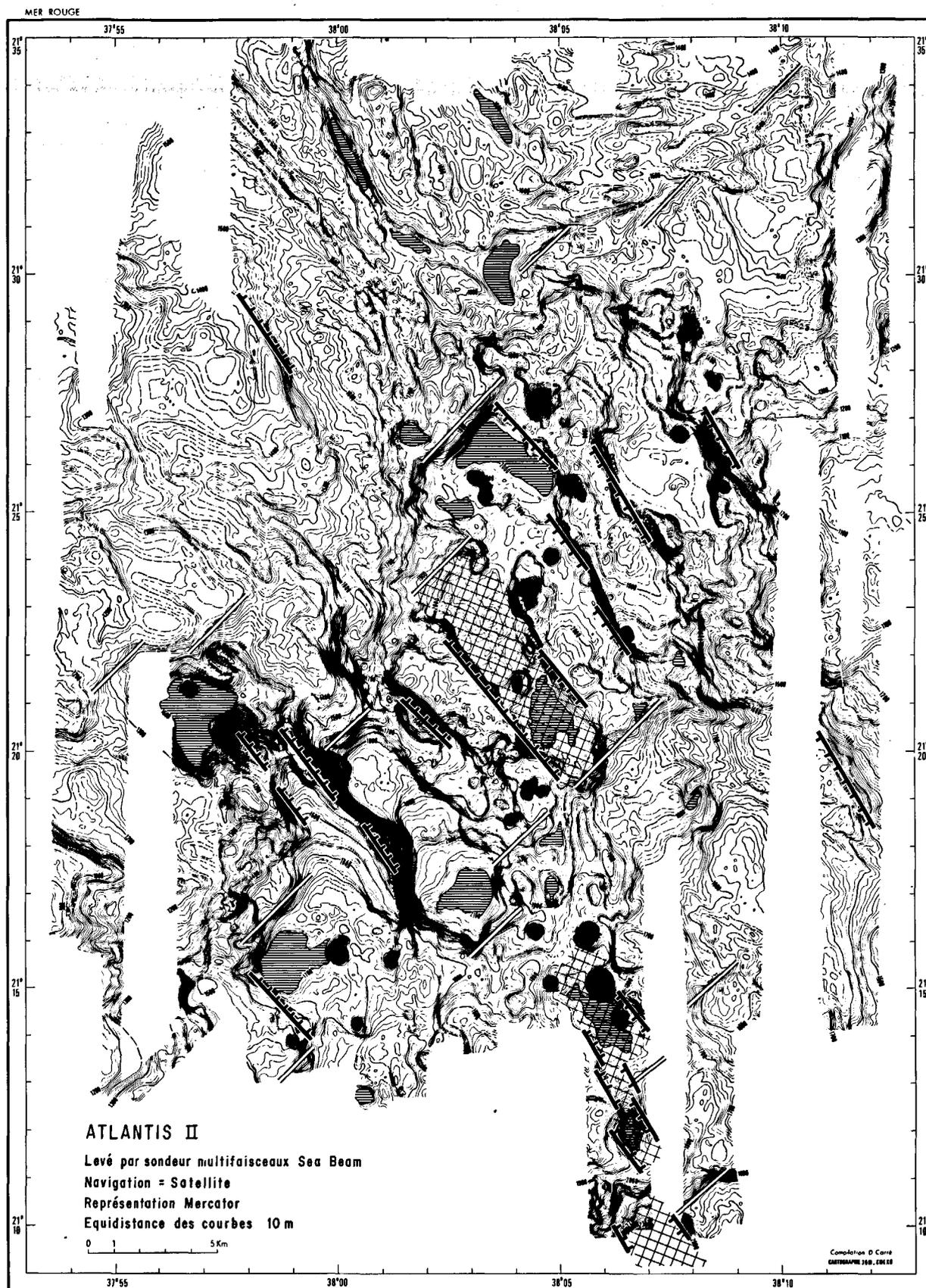


Figure 10

Interprétation morphostructurale de la zone Atlantis II. Légende : 1, les points noirs sont des édifices volcaniques; 2, en hachuré horizontal : les dépressions; 3, en lignes barbelées : les failles normales; 4, en double trait : les directions transformantes; 5, en traits croisés : le rift.

Morphostructural interpretation of Atlantis II area. Legend: 1, black spots: volcanoes; 2, horizontal hatching: depressions; 3, barbed lines: normal faults; 4, double lines: transform faults; 5, crossed hatching: rift.

capables de détecter la croûte océanique sous les sédiments. En faveur d'un recouvrement sédimentaire d'une partie axiale océanique de la Mer Rouge

septentrionale, on peut citer les données suivantes :  
— la présence des évaporites dans la partie axiale est soulignée par la continuité du réflecteur S (toit des

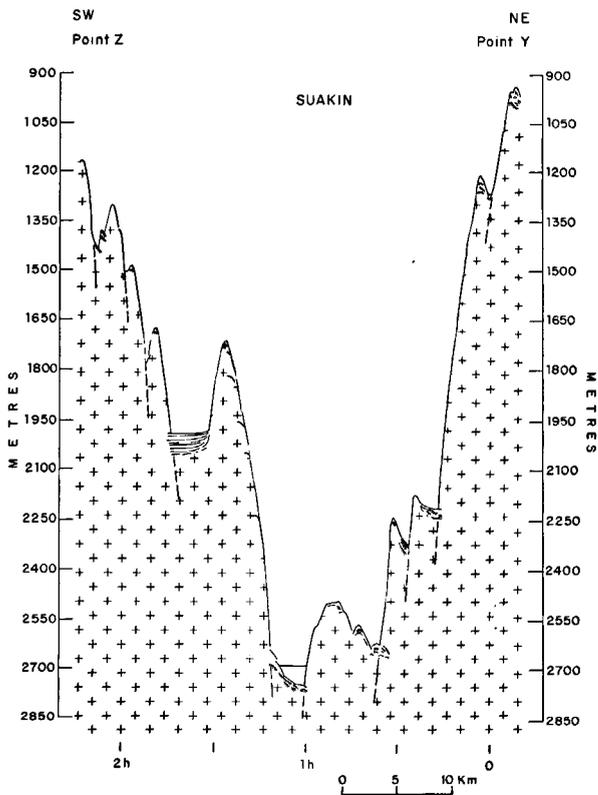


Figure 11

Portion du profil YZ sur la fosse Suakin. Légende : exagération verticale :  $\times 30$ ; les croix représentent le socle basaltique; les traits représentent les sédiments; le trait horizontal dans la partie la plus profonde est le toit des saumures.

Section of YZ profile crossing Suakin deep. Legend: vertical exaggeration:  $\times 30$ ; cross area is basaltic basement; horizontal lines on the basement are sediments; the horizontal line in the deeper part represents the top of brines.

évacuées; Phillips, Ross, 1970), par des profils réfraction (Drake, Girdler, 1964) et des forages pétroliers (Ahmed, 1972).

— Hall (1979) décrit des linéations magnétiques parallèles à la côte et se prolongeant jusque vers le littoral. L'analyse synthétique de ces anomalies donnerait une vitesse d'expansion de 0,6 cm/an sur les 5 derniers millions d'années ou 0,85 cm/an sur les 3,5 derniers millions d'années. Ces anomalies ont cependant une amplitude nettement plus faible que dans la portion sud et une période nettement plus longue (10 à 30 km de maximum à minimum);

— les arguments cinématiques qui font ouvrir l'ensemble Mer Rouge-Golfe d'Aden sur toute sa longueur (McKenzie *et al.*, 1970; Le Pichon, Francheteau, 1978)...

D'autres arguments militent pour l'absence de sol océanique dans la partie septentrionale :

— un profil de sismique réfraction dans l'axe du bassin à 25°N (Drake, Girdler, 1964) qui indique une épaisseur de 5 km de matériel à vitesse 3,92 km/s, reposant directement sur une croûte à vitesse 7,34 km/s;

— l'absence de séismes dans cette portion nord excepté un essaim à l'embouchure du Golfe de Suez;

— la présence d'anomalies magnétiques importantes et continues, de type océanique, de 16°N jusqu'à 20°N. Dans la partie médiane les anomalies magnétiques sont encore importantes mais constituent des « boutonnières » (Bertin *et al.*, 1979).

Dans la portion septentrionale (nord de 23°30'N), les anomalies ont une amplitude moindre, et les plus nettes sont des anomalies transverses (Hall, 1979).

Il paraît admis que dans la portion méridionale (segment V, sud de 20°20'N), les évaporites sont présentes sur les flancs mais absentes dans la vallée axiale, bien que le fluage latéral de ce sel d'âge Miocène supérieur sur de la croûte océanique plus jeune ait été mis en évidence dans le forage DSDP 228 (Girdler, Whitmarsh, 1974). Dans la partie moyenne de la Mer Rouge, le sel existe sur les bordures mais traverse également toute la dépression centrale dans des zones inter-fosses [le réflecteur S du toit des évaporites se suit d'un flanc à l'autre (Phillips, Ross, 1970)].

Dans la portion septentrionale, la couche salifère semble continue, excepté peut-être dans quelques dépressions ovoïdes.

Pourquoi le sol océanique, s'il existe dans la zone Nord, n'a-t-il pu sectionner sa couverture évaporitique? Une des raisons pourrait être la plus grande épaisseur d'évaporites. Mais les profils sismiques et les forages n'indiquent pas un approfondissement évident du bassin Nord au Miocène supérieur, ni un changement de propriétés mécaniques des évaporites.

Les données magnétiques et l'extension des séismes sont les meilleurs arguments pour penser que le nord de la Mer Rouge en est encore au stade d'étirement de la croûte continentale. C'est le stade précurseur de création de croûte océanique, avec déchirures par points et injection de matériel profond.

Une autre grande différence de la vallée axiale du Sud au Nord concerne les failles transformantes et les zones de fracture. Dans la partie méridionale il n'y a pas de failles transformantes majeures. Dans la partie médiane, ces accidents transverses se manifestent en zones inter-fosses comblées. Dans la partie septentrionale ces zones de fracture sont mises en évidence par des anomalies magnétiques transverses importantes, alors qu'il n'y a pas d'anomalies axiales. Ces zones de fracture seraient dans ce cas des zones de fracture marginales qui n'affectent que des compartiments continentaux. Au point de jonction de ces zones de fracture marginales avec la zone d'extension axiale on a création de points de faiblesse avec injection ponctuelle puis linéaire de matériel magmatique. Cette action d'injection profonde peut expliquer que la déclivité des parois évaporitiques des fosses ovoïdes et linéaires du Nord est plus accentuée à la base, ce qui devrait être l'inverse si le fluage latéral en était le moteur.

Au nord de la fosse Nereus, qui représente le dernier segment de rift typique, on assiste à une disparition progressive des fosses qui ne jalonnent que des points de faiblesse particuliers où sont injectés des dykes (exemple de Kebrit). Lorsqu'il y a propagation de la distension entre plusieurs points de faiblesse, on assiste à la création d'une vallée axiale embryonnaire : la fosse Vema en serait l'exemple le plus septentrional.

Cette étude géomorphologique des fosses de la Mer Rouge montre enfin que dans la portion méridionale où la vallée axiale présente les caractères de rift sans failles transformantes majeures, les fosses à hydrothermalisme

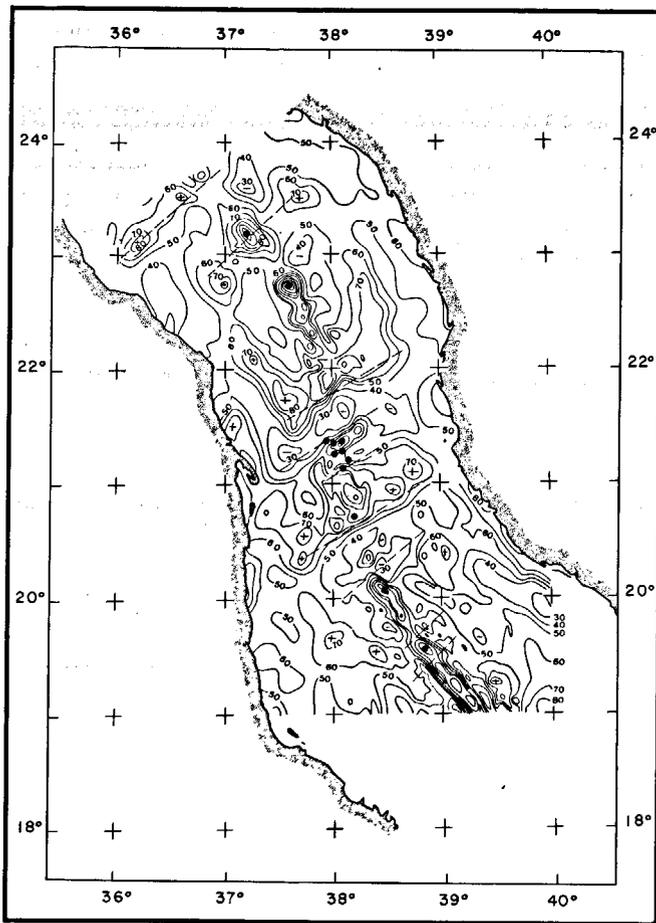


Figure 12

Position des fosses à saumures et/ou à sédiments hydrothermaux sur la carte du champ magnétique intégré réduit au pôle (carte magnétique d'après El Tayeb *et al.*, 1979). Contour tous les 10  $\gamma$ . Les accidents transformants sont en pointillés.

Location of deeps with hot brines and/or hydrothermal deposits on the map of integrated magnetic field reduced to the pole. Contour interval 10  $\gamma$ . Dotted lines are transform zones.

## RÉFÉRENCES

- Ahmed S.S., 1972. Geology and petroleum prospects in Eastern Red Sea, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **56**, 4, 707-719.
- Bäcker H., Schoell M., 1972. New deeps with brines and metalliferous sediments in the Red Sea, *Nature Phys. Sci.*, **240**, 153-158.
- Bäcker H., Richter H., 1973. Die rezente hydrothermal-sedimentäre Lagerstätte Atlantis II -Tief im Roten Meer, *Geol. Rundsch.*, **62**, 3, 697-741.
- Bäcker H., Lange K., Richter H., 1975. Morphology of the Red Sea central graben between Subair Islands and Abul Kizaan, *Geol. Jb., Hannover*, **D13**, 79-123.
- Baumann A., Richter H., Schoell M., 1973. Suakin Deep: brines and hydrothermal sediments in the deepest part of the Red Sea, *Geol. Rundsch.*, **62**, 3, 684-697.
- Bertin J., Pedoux J.P., Magenham J.C., 1979. Contribution de la géophysique et de l'océanographie physique à la recherche et à l'exploration des boues métallifères de la Mer Rouge. Séminaire International : Ressources minérales sous-marines, Orléans, octobre 1978, *Documents BRGM n° 7*, 339-365.
- Bignell R.D., Tooms J.S., Cronan D.S., Horowitz A., 1974. An additional location of metalliferous sediments in the Red Sea, *Nature*, **248**, 127-128.
- Coleman R., 1974. Geologic background of the Red Sea, *Initial Reports of the DSDP*, vol. 23, edited by R.B. Whitmarsh, O.E. Weser, D.A. Ross *et al.*, US Government Printing Office, Washington D.C., 813-821.
- Cyamex Scientific Team, 1979. Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise, *Nature*, **277**, 523-528.
- Drake C.L., Girdler R.W., 1964. A geophysical study of the Red Sea, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **8**, 473-495.
- El Tayeb M., Izzeldin Y., Horn R., Tixeront M., 1979. Les données géophysiques de la Mer Rouge centrale : entre 18 et 24°N : leur traitement par la technique SIGMA. Séminaire International : Ressources minérales sous-marines, Orléans, octobre 1978, *Documents BRGM n° 7*, 367-379.
- Girdler R.W., Whitmarsh R.B., 1974. Miocene evaporites in Red Sea cores, their relevance to the problem of the width and age of oceanic crust beneath the Red Sea, *Initial Reports of the DSDP*, vol. 23, edited by R.B. Whitmarsh, O.E. Weser, D.A. Ross *et al.*, US Government Printing Office, Washington D.C., 913-923.
- Guenoc P., Thisse Y., 1982. Histoire de l'ouverture de la Mer Rouge et minéralisations des fosses axiales. Synthèse bibliographique, Rapport du BRGM, 82 SGN 138 MAR, mars 1982.
- Hall S.A., 1979. A total intensity magnetic anomaly map of the Red Sea and its interpretation, US Geological Survey, Saudi Arabian Project, Report 275, 259 p.
- Le Pichon X., Francheteau J., 1978. A plate-tectonic analysis of the Red Sea-Gulf of Aden area, *Tectonophysics*, **46**, 369-406.
- Mc Kenzie D.P., Davies D., Molnar P., 1970. Plate tectonics of the Red Sea and East Africa, *Nature*, **226**, 243-248.
- Monin A.S., Plakhin E.A., Podrazhansky A.M., Sagalevich A.M., Sorokhtin O.G., 1981. Visual observations of the Red Sea hot brines, *Nature*, **291**, 21, 222-225.
- Needham H.D., Francheteau J., 1974. Some characteristics of the Rift Valley in the Atlantic Ocean near 36°48' North, *Earth Planetary Sci. Lett.*, **22**, 29-43.
- Phillips J.D., Ross D.A., 1970. Continuous seismic reflection profiles in the Red Sea, *Philos. Trans. R. Soc. London*, **A**, **267**, 143-152.
- Whitmarsh R.B., Weser O.E., Ross D.A. *et al.*, 1974. *Initial Reports of the DSDP*, vol. 23, US Government Printing Office, Washington D.C.

actif et/ou dépôts hydrothermaux paraissent absentes. Les fosses à hydrothermalisme exacerbé sont disposées préférentiellement dans la partie médiane de la Mer Rouge, où les directions transformantes sont nombreuses et importantes. Les fosses à exhalaisons hydrothermales paraissent disposées préférentiellement à la jonction des segments de rift et de failles transformantes (fig. 12).

## CONCLUSION

L'étude des fosses à saumure de Mer Rouge apporte des éléments nouveaux sur l'expression morphologique de la vallée axiale de la Mer Rouge vers le Nord. Elle montre plusieurs familles de fosses qui sont liées à la propagation vers le Nord du phénomène d'ouverture océanique. L'influence des zones transformantes semble dominante dans l'hydrothermalisme de Mer Rouge. Toutes les fosses contenant des saumures et/ou des sédiments hydrothermaux sont en contact avec des structures transverses bien visibles sur les cartes magnétiques (fig. 12).

Cet hydrothermalisme de Mer Rouge, exceptionnel par l'influence des évaporites, serait de type atlantique et associé aux zones transformantes, et non de type axial comme observé dans les dorsales rapides de type Pacifique (Cyamex, 1979).

## Remerciements

D. Carré a réalisé le montage et la compilation des cartes « Seabeam ». B. Sichler, M. El Tayeb et D. Carré ont participé à la campagne Merou. Cette campagne a été réalisée par le N.O. « Jean Charcot » commandé par G. Paquet. D. Carré et J.P. Mazé ont réalisé l'illustration et N. Guillo-Uchard a effectué la frappe du manuscrit.