

Évolution de la dorsale de Carlsberg : évidence pour une phase d'expansion très lente entre 40 et 25 Ma (A18 à A7)

Océan Indien
Dorsale de Carlsberg
Anomalies magnétiques
Tectonique des plaques

Indian Ocean
Carlsberg ridge
Magnetic anomalies
Plate tectonics

Serge MERCURIEV ^a, Philippe PATRIAT ^a et Nelly SOCHEVANOVA ^b

^a Institut de Physique du Globe et CNRS URA 729, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France.

^b SPbF IZMIRAN, Académie des Sciences de Russie, 2, pers. Muchnoj, Box 188, St-Petersbourg, 191023, Russie.

Reçu le 10/01/95, révisé le 10/05/95, accepté le 16/05/95.



RÉSUMÉ

La dorsale de Carlsberg (CAR), qui s'étend dans l'océan Indien nord-occidental entre la zone de fracture Owen (57° E) et 66° E où elle rejoint la dorsale Centrale Indienne (CIR), est encore mal connue. Si les auteurs s'accordent pour voir une phase d'expansion lente actuelle (12 à 15 mm/a) et une phase rapide (>50 mm/a) avant l'époque de l'anomalie 23, les opinions sont contradictoires pour la période intermédiaire, en particulier pour la période A20-A23 car déduites d'ensembles de données différents. En réinterprétant l'ensemble de ces données, il est montré que la période 0-50 Ma est caractérisée par trois phases « rapide », « ultra-lente » et « actuelle ». La phase « rapide » est en fait la fin de la période vraiment rapide A27-A23 qui se termine en ralentissant progressivement jusqu'à se stabiliser à un taux très lent à A18; commence alors la phase « ultra-lente », après un changement de direction de plus de 30°; enfin la phase « actuelle », au taux moyen de 1,4 cm/a et de direction 040, débute un peu après l'époque A7, après un nouveau changement de direction en sens contraire de plus de 15°. Par ailleurs il est montré qu'avant A5 l'évolution de la dorsale de Carlsberg est très semblable à celle de la dorsale Centrale Indienne.

ABSTRACT

Evolution of the Carlsberg Ridge: evidence for an ultra-slow spreading period between 40 and 25 Ma (magnetic anomalies A18 to A7).

The Carlsberg Ridge (CAR) is the present plate boundary between Somalia and India. It extends north of the Equator from 57° E at Owen FZ to 66° E where it joins the Central Indian Ridge (CIR), the NW-SE main ridge trend changing to N-S. In the 1960s, CAR was one of the first mid-oceanic ridges to be surveyed, and in the McKenzie and Sclater (1971) Indian ocean synthesis its evolution appears as one of the soundest results of that work: fast spreading from A28 (anomaly 28 epoch) to A23, slow spreading from A5 to the present. After the identification of the A20-A24 series in the Arabian basin by Whitmarsh (1974), no new specific study was devoted to this ridge, although the extensive survey of the surrounding areas showed its probable complex evolution. New interpretations were proposed only in the late 1980s when, from a complete and detailed Russian survey of the north flank (the Arabian basin) and the axial zone, Karasik *et al.* (1986) and Mercuriev (1990) published a new magnetic map with complete series from anomalies 1 to 28, in agreement with the preceding interpretations of McKenzie and Sclater (1971) and Whitmarsh (1974). However, in the southeastern part of the Somalia basin, another set of data of disparate origin reveals clear

lineations interpreted as A23-A20 by Ribet (1989). When this model is applied to the north flank, it is in total disagreement with Whitmarsh's interpretation and consequently with those of Karasik *et al.* and Mercuriev: the same anomaly is numbered either A13 by Karasik *et al.* or A20 by Ribet.

This paper compiles the data which led to these alternative identifications in order to arrive at a consistent interpretation and so decipher the CAR evolution since 50 Ma. The results are the following: (1) Whitmarsh's interpretation must be definitively changed, the anomalies 13, 18, 20 and 21, as shown on the maps of Karasik *et al.* (1986) or Mercuriev (1990), becoming respectively 20, 21, 22 and 23; and (2) both the interpretation of the anomalies younger than A20 and a comparison with the spreading history at the CIR before A5 time suggest a phase of ultra-slow spreading (<8 mm/a) between about A18 and A7 rather than the present spreading rate beginning at A11 and following a period of more than 10 Ma with no spreading at all.

Oceanologica Acta, 1996, 19, 1, 1-13.

INTRODUCTION

La dorsale de Carlsberg (CAR) est la limite actuelle des plaques Inde et Afrique (plus précisément Somalie), elle est située au centre de la Mer d'Arabie dans l'Océan Indien nord-occidental. Les fonds océaniques créés à son axe, le bassin d'Arabie sur son flanc nord-est et le bassin de

Somalie oriental sur son flanc sud-ouest, intéressent une région que nous définirons comme limitée au nord et à l'ouest par l'Inde, l'Arabie et l'Afrique, au sud par le plateau des Seychelles/Mascareignes et à l'est par la ligne Laccadives/Maldives (fig. 1). L'ouverture de cette partie de l'océan Indien est encore très mal connue, même si elle est le résultat de phases d'expansion reconnues dans l'ensemble de l'océan Indien.

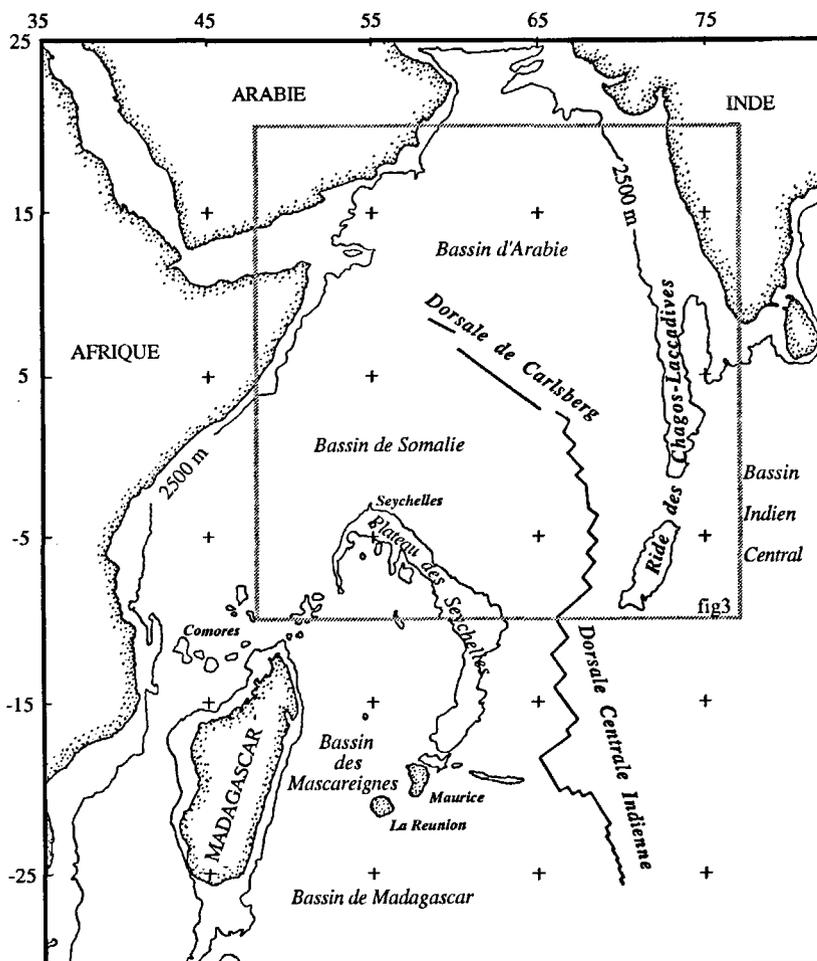


Figure 1

Grands traits structuraux de l'océan Indien nord-occidental (d'après Ribet, 1989). Les bassins conjugués, Indien Central et de Madagascar de part et d'autre de CIR, d'Arabie et Somalie de part et d'autre de CAR, ont enregistré les mêmes événements pendant les périodes où les deux dorsales constituaient une même limite de plaque.

Main structural features of the NW Indian Ocean (from Ribet, 1989). The conjugate basins – Central Indian and Madagascar as flanks of CIR, Arabia and Somalia as flanks of CAR – have recorded the same tectonic events while CIR and CAR were part of the same plate boundary.

Depuis longtemps en effet l'Océan Indien a attiré l'attention des scientifiques et c'est d'ailleurs en interprétant des anomalies magnétiques observées dans le nord-ouest de cet océan, que Vine et Matthews en 1963 ont démontré l'existence de l'expansion des fonds océaniques, conduisant à la nouvelle théorie de la tectonique des plaques lithosphériques. Si l'Océan Indien reste en partie encore mal compris c'est que sa création est le résultat d'une histoire très compliquée. Sa formation est en effet liée à la rupture du Gondwana et à la dispersion de ses fragments dont les plus grands, l'Afrique, l'Inde, l'Antarctique et l'Australie, constituent encore son environnement actuel, impliquant plusieurs limites de plaques fonctionnant simultanément. Par ailleurs la rupture du Gondwana n'a pas été simultanée à chaque limite de blocs, entraînant une ouverture de l'Océan Indien en plusieurs étapes. Chacune de ces étapes se caractérise par des paramètres d'ouverture (direction et taux d'expansion) spécifiques, déterminés à partir de l'analyse géochronologique des anomalies magnétiques. Ainsi trois séquences d'anomalies magnétiques d'âges différents définissent trois étapes principales d'ouverture.

1 - le premier système est représenté par les anomalies mésozoïques M25 - M0, observées à l'est et à l'ouest de l'Océan Indien. Ces anomalies ont enregistré les premiers événements de rupture du Gondwana, qui concernent les couples Madagascar/Afrique, Inde/Antarctique et Afrique/Antarctique ;

2 - le deuxième système est représenté par les anomalies 34 - 20, qui sont situées dans les bassins profonds, et qui concerne les mouvements Afrique/Seychelles/Inde, et Australie-Inde/Antarctique ;

3 - le troisième système est représenté par les anomalies 19 - 1 (axiale), qui correspondent à l'évolution de l'océan Indien actuel.

L'évolution de la région qui nous intéresse ici s'est déroulée essentiellement pendant les étapes 2 et 3 et sa structure complexe découle pour une large part du passage à l'étape 3 actuelle où s'est produite une vaste réorganisation de la géométrie de la limite de plaque suite au changement de direction de l'expansion. Ces réorganisations se font en général par capture par une plaque (par saut ou propagation plus progressive) d'une surface plus ou moins importante de l'autre plaque avec comme conséquence une rupture des séquences caractéristiques d'anomalies magnétiques qui ne restent intactes, et donc identifiables sur un profil isolé, qu'en de rares endroits.

Cet article s'appuie sur l'ensemble des données géophysiques recueillies par les navires russes depuis 1980, dont la densité a rendu possible la sélection de ces rares profils où les séquences d'anomalies magnétiques ont été peu altérées. Après avoir passé en revue les interprétations existantes, nous montrons qu'il est possible d'observer la séquence complète des anomalies de 1 à 24 (A1 à A24) sur les deux flancs, qui met en évidence une période d'expansion ultra-lente entre A18 et A7 faisant le lien entre les phases 2 (taux rapide) et 3 (taux lent) observées dans l'ensemble de l'océan indien.

LES RECHERCHES PRÉCÉDENTES

L'évolution des idées sur la structure de l'Océan Indien nord-occidental est donnée sur la figure 2 où sont représentées les cartes des anomalies magnétiques proposées par différents auteurs.

Études initiales

L'étude du champ magnétique dans l'Océan Indien a commencé par des levés aéromagnétiques. Dans le bassin d'Arabie, Matthews (1966) et Taylor (1968) ont découvert des anomalies de forte intensité et de direction latitudinale succédant à une zone calme du champ magnétique près des marges. Ensuite, dans le bassin de Somalie, Bowin et Vogt (1966) ont montré l'existence de la série jumelle avec une direction de 120. Les directions des deux séries dans les bassins d'Arabie et de Somalie sont différentes de la direction actuelle de 130 de l'axe de la dorsale de Carlsberg. Sur la base des profils régionaux du R/V *Owen*, traversant l'Océan Indien nord-occidental, McKenzie et Sclater (1971) ont identifié des anomalies d'âge paléocène (23-28) dans le bassin d'Arabie et de Somalie. Le taux d'expansion qui correspond à cette période d'ouverture de la proto-dorsale de Carlsberg, de direction EW en mer d'Arabie, est de 6,5 cm/a (fig. 2a).

Ce sont les données géophysiques recueillies au cours de la campagne 23 du navire de forage *Glomar Challenger* (GC23) qui ont permis de préciser l'idée de la structure et de l'âge des fonds océaniques du bassin d'Arabie. Sur la base de ces nouvelles données, Whitmarsh (1974) a indiqué les nouvelles zones de fractures Rudra et Shiva, qui sont situées au sud-est de la zone de fracture de Anahita (fig. 2b) et il a identifié les anomalies 18 - 24. Cette identification est fondée essentiellement sur le résultat du forage DSDP (Site 221), qui a daté les sédiments au contact des basaltes à 46 Ma.

D'après ces recherches, on distinguait donc deux phases d'expansion dans l'Océan Indien nord-occidental:

- a) la première phase correspond aux anomalies 28-20. L'expansion était très rapide à l'axe de la proto-dorsale de Carlsberg, qui se trouvait à peu près à la latitude 10° S (McKenzie et Sclater, 1971). Les événements de cette phase sont représentés dans les anomalies du bassin d'Arabie et de Somalie;

- b) la dernière phase correspond à la période actuelle, le taux d'expansion de 1,3 cm/a, est uniquement fondé sur l'anomalie 5, identifiée sur de rares profils. La position de la dorsale de Carlsberg, qui correspond à la frontière constructive des plaques de l'Inde et de l'Afrique, est tracée seulement par les centres des séismes.

Pour résumer, c'était un modèle simple et schématique, en accord avec les données alors disponibles. Le changement de direction, qui marque le passage d'une phase à l'autre, n'est localisé, ni dans le temps (il est supposé se produire à l'époque A18 ou A20 synchrone avec le reste de l'Océan Indien), ni dans l'espace (selon les extrapolations pour cette position, un arrêt ou un ralentissement de l'expansion est nécessaire après le changement de direction).

Les travaux plus détaillés de Norton et Sclater (1979) et Schlich (1982) (fig. 2c), qui s'intéressaient à l'ensemble de l'Océan Indien, ne prenant en compte que peu de nouvelles données dans cette région, ont surtout confirmé les résultats de McKenzie et Sclater (1971). L'interprétation de Whitmarsh (1974) est conservée mais néanmoins, Schlich suivant Schlich (1975) se demande si le numéro 22 ne conviendrait pas mieux pour l'anomalie 20 tandis que Norton et Sclater

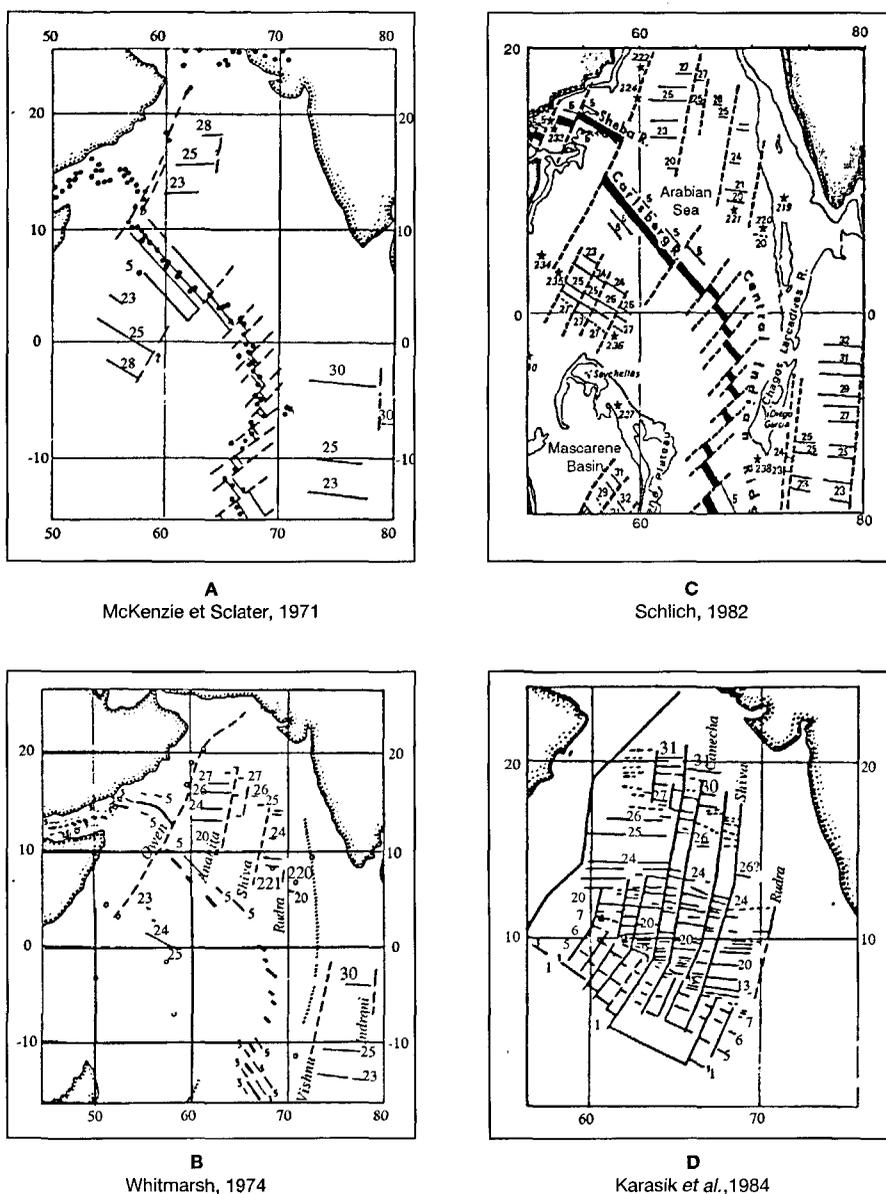


Figure 2

Évolution des schémas structuraux proposés pour la mer d'Arabie entre 1971 et 1986 (d'après Mercuriev, 1990). À chaque étape l'interprétation précédente s'enrichit de nouvelles informations.

Schematic tectonic element maps of the Arabian Sea published between 1971 and 1986 (after Mercuriev, 1990). Each successive step is an addition to the preceding interpretation.

(1979) vont jusqu'à identifier sur le profil GC23 cette anomalie 22 en totale contradiction avec l'interprétation de Whitmarsh. Il faut noter par ailleurs que les nouvelles données présentées par Schlich (1982), concernant les anomalies 23-27 au sud de CAR, discutées en détail par Tisseau (1978), montrent des séquences d'anomalies incomplètes et donc des interruptions de corrélation de profil à profil, bien que ces profils aient été parcourus dans la bonne direction (celle de l'expansion) et que le taux élevé donne en général de claires linéations. Ceci est un indice de zones de fracture en V, traces de propagations de rift, qui rendent difficiles les interprétations à partir de profils isolés.

Premières études détaillées

Le début des recherches détaillées dans l'Océan Indien nord-occidental correspond aux travaux de plusieurs navires russes, qui ont effectué en 1980 des levés dans la mer d'Arabie, sur le flanc NE de la dorsale de Carlsberg (Karasik *et al.*, 1986, 1988, 1990). Ces recherches ont précisé les deux systèmes d'anomalies, qui se distinguent par

les orientations, l'intensité et la longueur d'onde caractérisant différentes étapes d'expansion. En partant de l'axe de la dorsale, on observe des anomalies magnétiques de courte longueur d'onde, qui ont la direction 135, parallèle à la direction de la dorsale. Oblique à ce système « jeune », un autre système d'anomalies magnétiques est observé dans le bassin d'Arabie : ce « vieux » système d'anomalies de longue période a une direction 090 dans le bassin d'Arabie et 065 dans le bassin de Somalie. Sur la base de ces données (fig. 2d), ces auteurs confirment l'existence des zones de fracture connues, Anahita, Brahma et Shiva et en localisent une nouvelle, nommée Ganesh. Les nouveaux profils obtenus sur le flanc Nord de la dorsale de Carlsberg à 68° E ont montré, que, si on acceptait l'identification de Whitmarsh (1974) pour les anomalies A20 - A24 et un taux d'expansion de 1,5 cm/a pour la période A6-A1, il était possible d'interpréter les anomalies intermédiaires A6 - A18 avec un taux d'expansion de 1,8 cm/a; la série complète des anomalies a donc été identifiée, et en particulier celles avec les numéros 5 à 23 dans la zone sans identification de McKenzie et Sclater. Notons que sur la base de cette hypothèse le changement de direction se produit entre

près 50 km dans le nord du bassin d'Arabie, elle varie de 12 à 25 km en se rapprochant de l'axe de la dorsale et enfin de 5 à 10 km dans la région axiale et dans le bassin de Somalie.

Les valeurs des anomalies magnétiques ont été obtenues en soustrayant en chaque point le champ théorique donné par l'International Geomagnetic Reference Field (IGRF) de la mesure de l'intensité du champ. Sans avoir de station pour mesurer les variations temporelles ce sont les points de croisement qui ont permis d'estimer la valeur de la variation diurne pour chacun des levés (Mercuriev, 1984). Les dispersion des valeurs des différences aux points de croisement, sans correction pour la variation temporelles est de 40 - 50 nT à l'équateur géomagnétique et de 20 - 30 nT pour les autres régions. Bien que l'amplitude des variations temporelles estimée par ces méthodes puisse atteindre jusqu'à 100 nT dans les régions soumises à l'effet de l'électrojet, c'est-à-dire dans une bande de 3° de part et d'autre de l'équateur géomagnétique situé à 10° N, cela n'empêche pas d'obtenir les anomalies magnétiques dues aux inversions du champ magnétique terrestre grâce à leurs périodes plus courtes par rapport à celles de la variation diurne.

Tous les profils magnétiques et bathymétriques observés ont été dessinés à bord à l'échelle des levés. Ensuite, sur la base de ces profils ont été dressées la carte des rabattus des anomalies magnétiques et la carte bathymétrique, qui ont servi de base pour l'analyse géochronologique régionale initiale. Pour entreprendre une analyse géochronologique plus détaillée, il était nécessaire de disposer de ces données sous forme numérique, en particulier pour les campagnes où les profils ne sont pas bien orientés ; les données magnétiques et bathymétriques ont été numérisées en fonction du temps, puis combinées aux données de navigation existant déjà sous forme numérique.

La séquence A24-A18

Dans les premières études de la région, le fait remarquable était l'indubitable identification de l'anomalie 24 (en fait de la série A26-A24), cette anomalie constituant, à l'ouest de 65E dans le bassin d'Arabie, une linéation sans décalage sur plus de 500 km (fig. 2d), expliquant la facilité de son repérage sur des profils isolés et mal orientés. Cette série étant tout à fait semblable à celle observée dans les bassins Indien Central, de Madagascar ou de Crozet, il était surprenant de ne pas observer sur les flancs de CAR les anomalies plus jeunes, A23-A21 en particulier, qui forment d'aussi belles linéations dans ces bassins (Schlich, 1982). L'addition de nouvelles données a confirmé la désorganisation de cette longue linéation après l'époque A24 mais a mis en évidence une autre série de linéations de grande longueur, plus près de l'axe mais à l'est de 65E (Karasik *et al.*, 1986) avec son conjugué sur le flanc sud (Ribet, 1989).

Pour le flanc sud de CAR, les nouveaux profils sélectionnés confirment l'interprétation de Ribet (1989). Des linéations très nettes sont mises en évidence sur une largeur d'environ 300 km (fig. 4a) : les linéations correspondant aux anomalies 22 et 21 sont présentes sur toute la largeur de la zone, sans décalage notable ; par contre en remontant dans le temps, l'anomalie 23 forme des linéations interrompues à l'ouest et l'anomalie 24 n'est pas reconnaissable ;

postérieurement à l'anomalie 21, les anomalies 20 et 18 ne forment plus une seule linéation mais présentent de faibles décalages.

Sur le flanc nord de nouveaux profils existent seulement à l'ouest de GC23 (le profil interprété par Whitmarsh) ; un profil de la campagne MD15 du *Marion-Dufresne*, mal orienté, permet néanmoins de compléter vers le sud la séquence du GC23. En comparant cet ensemble de profils à un modèle calculé avec les mêmes paramètres que ceux du flanc sud, l'identification de la série A23-A18 apparaît indiscutable. Comme pour le flanc sud les linéations correspondant à l'anomalie 23 s'interrompent vers l'ouest et celles correspondant aux anomalies 20 et 18 montrent de faibles décalages (fig. 4b).

Les caractéristiques des deux ensembles d'anomalies démontrent qu'il s'agit bien de deux séries jumelles, c'est-à-dire créées au même segment de dorsale. L'identification de Whitmarsh (1974) et donc de Karasik *et al.* (1986) doit être modifiée, leurs anomalies 13, 18, 20 et 21 devenant respectivement 20, 21, 22 et 23. Les longues linéations correspondantes sont le résultat d'une réorganisation de cette section de l'axe de la dorsale après l'anomalie 24 alors que c'est justement à cette époque que paradoxalement se désorganise la section située à l'ouest de 65E. Notons que l'identification de la série A22-A23 est grandement facilitée par l'introduction dans le modèle d'une courte période de polarité normale peu avant la période normale définissant l'anomalie 22 comme l'avait proposé Patriat (1987) pour une meilleure modélisation de cette série sur les flancs des dorsales Centrale et Sud-Est Indiennes.

La séquence A18-A6

La séquence des anomalies créées antérieurement à l'anomalie 6 est caractérisée par des amplitudes faibles et par de courtes périodes. La première anomalie, qui est bien marquée sur certains profils se trouve à 150 km de l'anomalie 6. À supposer que le taux d'expansion n'ait pas changé au cours des 40 Ma derniers, cette anomalie aurait pu avoir le numéro 13 comme cela a été proposé par Karasik *et al.* (1986) (fig. 5). Puisque nous venons de montrer que cette anomalie porte le numéro 20, cette interprétation avec un taux constant conduit à un arrêt de l'expansion entre A18 et A11.

Pour éviter cette interruption, une autre interprétation consiste à diminuer le taux d'expansion à moins de 0,8 cm/a après l'époque A18 de façon à faire tenir toute la période A18-A6 sur la même distance que la période A11-A6 avec le taux actuel. Pour calculer un modèle avec ce taux d'expansion variable, il est nécessaire de savoir quand s'est produit le changement de vitesse. La période très lente, qui sépare les deux étapes d'ouverture de la mer d'Arabie a commencé après l'anomalie 20 et s'est terminée quelque temps avant l'anomalie 6. Si la frontière entre la période rapide et lente est presque évidente à cause de la grande différence entre les deux vitesses (et aussi à cause du changement de direction), la limite entre les périodes ultra-lente et lente est difficile à repérer. Pour connaître plus précisément le moment du changement du taux d'expansion concernant cette deuxième transition nous avons appliqué la méthode numérique d'identification des anomalies magnétiques, qui a été proposée et utilisée pour l'objecti-

vation du résultat de l'analyse géochronologique par Mercuriev (1990). Le principe de cette méthode, qui consiste à construire et analyser des figures de corrélation, est décrit brièvement en annexe.

Pour réaliser cette analyse qui va permettre de déterminer l'époque du changement de taux, on a choisi le profil UG840990 dont le parcours est situé dans un seul compartiment, c'est-à-dire au dessus de croûte océanique formée à l'axe d'un même segment de dorsale ; ce profil est situé sur le flanc sud de la dorsale de Carlsberg. Premièrement, nous l'avons comparé avec un modèle calculé avec un taux d'expansion de 1,42 cm/a, constant depuis l'anomalie 18. Sur les figures de corrélation obtenues (fig. 6a), il est manifeste que le profil UG840990 et le modèle ont une bonne ressemblance jusqu'à l'anomalie 6, parce que les points se trouvent le long d'une droite jusqu'à cette anomalie ; ensuite, les coefficients de corrélation diminuent et après un petit décalage on continue sur une autre droite. C'est l'âge correspondant à ce décalage que nous avons retenu pour changer le taux d'expansion. La figure 6b, obtenue avec le nouveau modèle dont le taux d'expansion varie, montre que tous les points se trouvent sur la même droite et les valeurs des coefficients de corrélation deviennent plus grandes. La comparaison des deux identi-

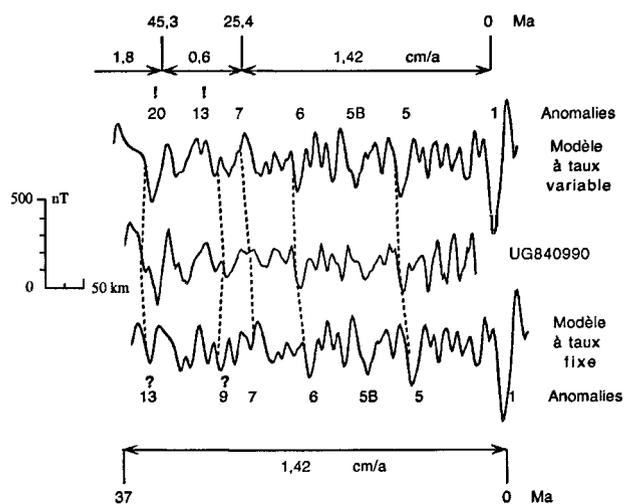


Figure 5

Identification des anomalies observées le long du profil UG840990 sur le flanc sud de CAR. Ces anomalies sont comparées à deux modèles synthétiques, l'un avec un taux constant égal au taux actuel mesuré entre l'axe et A5, l'autre avec un taux variable. Les modèles ont été calculés par la méthode des taux fictifs (Tisseau et Patriat, 1981). L'échelle des inversions est celle de Labrecque *et al.* (1977), la profondeur de la couche aimantée de 1 km d'épaisseur est la profondeur « normale » de Parsons et Sclater (1977) et l'aimantation a été ajustée pour obtenir des amplitudes calculées et observées comparables.

*Possible identifications of the magnetic anomalies observed on the south flank of CAR (profile UG840990, see location on Fig. 3) according to either a constant (bottom) or a variable (top) spreading rate model. The synthetic models have been computed by the method of Patriat and Tisseau (1981) using a fictitious rate factor of 0.7, the magnetic time scale of Labrecque *et al.* (1977), a 1 km thick magnetized layer the depth of which increases with age according to Parsons and Sclater (1977) and a magnetization intensity adjusted to match synthetic and observed amplitudes.*

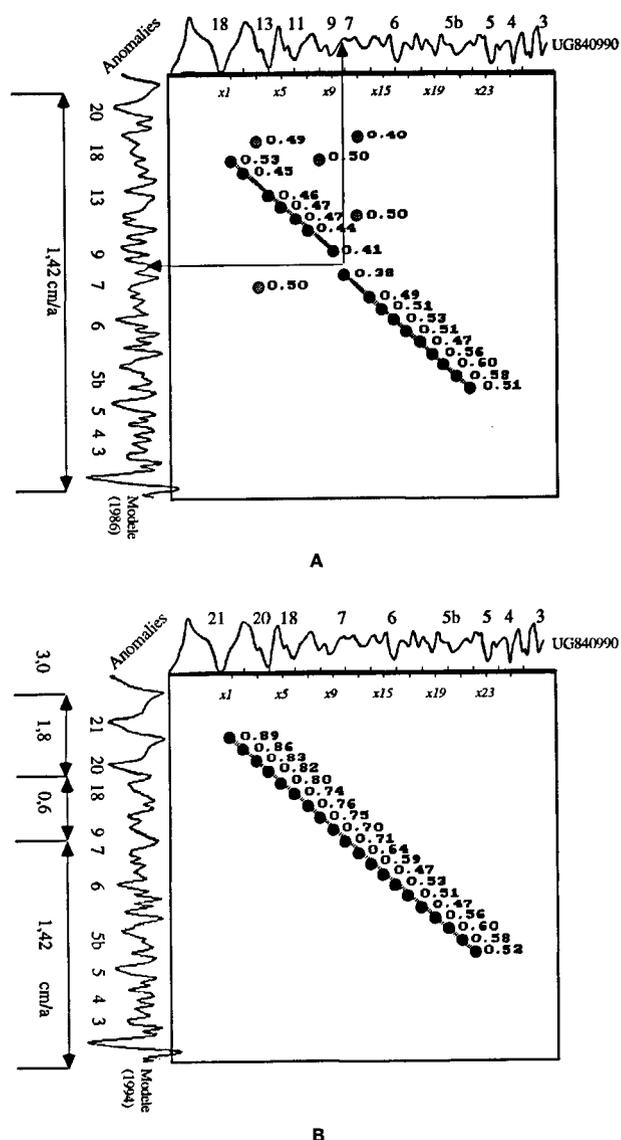


Figure 6

Figures de corrélation, obtenues entre le profil UG840990 et les deux modèles de la figure 5, par la méthode d'objectivation de l'identification des anomalies. On voit clairement sur la figure 6a, qu'il y a un décalage après A7 entre les deux droites constituant la courbe tandis que tous les points sur la figure 6b se trouvent sur la même droite. Par ailleurs les valeurs des coefficients de corrélation sont plus grandes sur la figure 6b.

Objectivation of the magnetic anomalies identification by the correlation figures method applied to the observed and calculated profiles of Figure 5. Each solid circle with its associated number is related to a short section of the observed profile and indicates the location along the model where the best value of correlation is obtained. The constant rate model shows a loss of correlation for anomalies older than A7 (Fig. 6a) whereas the variable rate model gives very good correlation for this period (Fig. 6b).

fications à l'aide d'un critère objectif est donc en faveur, pour ce profil, d'une expansion continue depuis l'époque A20, avec une période d'expansion ultra-lente pendant la période A18-A7 (fig. 5). Notons que la valeur des meilleurs coefficients de corrélation est plus faible pour les anomalies récentes, là où le nombre d'inversions par kilomètre est le plus élevé.

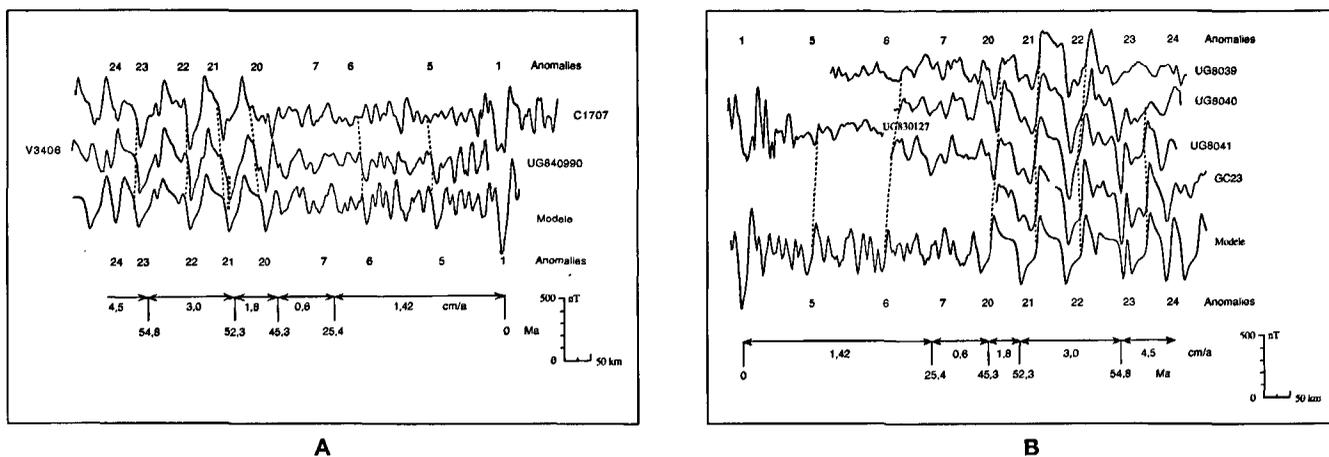


Figure 7

Identification des anomalies A6-A23 dans la partie SE des deux flancs de la dorsale de Carlsberg. Le profil synthétique a été calculé comme celui de la figure 5 ; a) bassin de Somalie ; b) bassin d'Arabie.

A6-A23 identification for profiles located in the southeast part of CAR, a) Somalia basin, b) Arabian basin; synthetic model as in Figure 5.

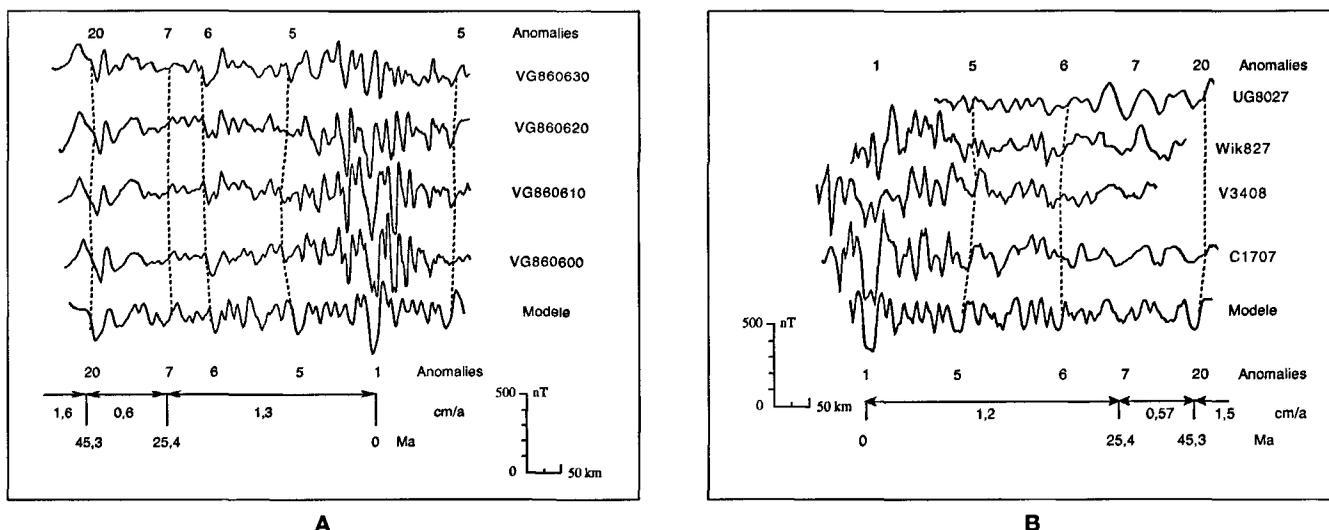


Figure 8

Identification des anomalies A6-A20 dans la partie NW des deux flancs de la dorsale de Carlsberg. Le profil synthétique a été calculé comme celui de la figure 5 ; a) bassin de Somalie ; b) bassin d'Arabie.

A6-A20 identification for profiles located in the northwest part of CAR, a) Somalia basin, b) Arabian basin; synthetic model as in Figure 5.

Pour vérifier que cette interprétation est valable pour l'ensemble de la dorsale, nous avons comparé ce modèle aux anomalies observées le long de profils bien orientés et répartis sur les deux flancs de la dorsale.

Sur le flanc nord, dans le bassin d'Arabie, ces profils sont très peu nombreux (figs. 7b et 8b) car les profils russes sont mal orientés pour l'étude de cette période. Dans la partie sud-est (fig. 8b), qui concerne la séquence qui suit la série A24-A18 identifiée plus haut, l'identification sur des profils mal orientés est difficile. Dans la partie nord-ouest, le seul profil bien orienté, V3408, semble être proche d'une zone de discontinuité. Les résultats sont donc peu probants ; notons néanmoins que cette difficulté à identifier des anomalies sur des profils tant soit peu mal

orientés est conforme à notre expérience de la dorsale Sud-Ouest Indienne au taux très lent (Patriat, 1987).

Sur le flanc sud, dans le bassin de Somalie, les profils sont mieux orientés et plus nombreux (figs. 7a et 8a). Dans la partie sud-ouest, outre le profil UG840990 qui nous a servi de référence, le profil C1707 montre une assez bonne corrélation (fig. 7a). Dans la partie nord-est, nous avons choisi quatre profils peu espacés (figs. 3 et 8a) qui montrent que, malgré une variabilité de profil à profil caractéristique des taux lents, les anomalies observées ressemblent plus au modèle au taux ultra-lent qu'à celui au taux actuel. En effet, à des taux supérieurs à 1,25 cm/a, la séquence A12-A8 devrait être bien individualisée sur au moins un profil.

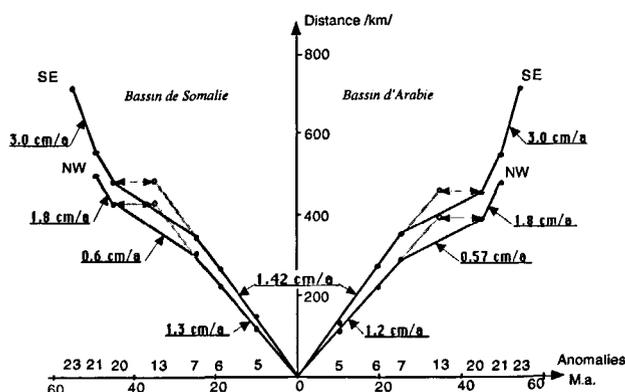


Figure 9

Distance à l'axe en fonction de l'âge pour les deux modèles. Le taux d'expansion est donné par la pente des droites. Le déroulement de l'expansion avec le taux actuel commençant à A13 est représenté en grisé, la double flèche indiquant la période où il serait nécessaire, dans cette hypothèse, d'observer un arrêt de l'expansion.

Variations of the distances to the axis of each characteristic magnetic anomaly with its age. The spreading rate is given by the slope of the line joining two successive anomalies. The grey line indicates one evolution with the present spreading rate beginning at A13 and, in the same hypothesis, the arrows show the period when the spreading should have stopped.

Cette interprétation de la zone « calme » des premiers auteurs par une phase de taux ultra-lent apparaît donc tout à fait acceptable.

Évolution depuis 50 Ma

La séquence complète des anomalies 1 à 23 a donc été reconstruite à l'est de la dorsale de Carlsberg, sur ses deux flancs. Ces observations montrent que le passage entre les deux phases d'expansion, reconnues dès les premières études de cette région, rapide (supérieure à 5 cm/a) entre A27 et A24, lente (inférieure à 1,5 cm/a) entre A5 et A1, se fait en deux temps : diminution du taux à la fin de la phase rapide jusqu'à l'époque A20, puis expansion ultra-lente entre A18 et A7, époque où est retrouvé le taux actuel (fig. 9).

DISCUSSION

Limites de la période d'expansion ultra-lente

Notre modèle de référence (fig. 5) est adapté au profil particulier UG840990 et les âges où les taux changent ont besoin d'être précisés.

Le début de la séquence ultra-lente correspond plutôt à l'anomalie 18 : d'une part, sur la plupart des profils (figs. 4 et 7) la période A20-A18 est observée sur une longueur plus grande que celle prévue par le modèle, avec un petit ressaut qui peut être interprété comme l'anomalie 19 ; d'autre part, c'est là où est observé le changement de direction sur la carte de Karasik *et al.* (anomalies 10-11 de leur interprétation, fig. 2d). Comme pour la dorsale Sud-Est-Indienne

(Patriat, 1987) il semble qu'il y ait un ralentissement continu jusqu'à la stabilisation du taux à l'époque A18.

La fin de cette phase est définie par la perte de corrélation en partant de l'axe de la dorsale entre les observations et le modèle calculé au taux actuel. L'examen détaillé des profils montre que le changement de régime intervient près de l'anomalie 6b plutôt qu'à l'époque A7. Sur le diagramme de corrélation (fig. 6a), cela correspond d'ailleurs à l'absence de l'avant-dernier des points qui définissent la première droite. Notons qu'un changement de régime important se produit à la même époque dans le Pacifique qui a été daté à l'anomalie 6c par Cornaglia (comm. pers.).

Comparaison avec la dorsale Centrale Indienne (CIR)

Même si cette coïncidence avec un événement majeur se produisant dans un autre océan est un argument en faveur de notre interprétation, l'absence d'observation, sur le flanc nord, de séquences A6-A20 réellement jumelles des séries observées sur le flanc sud, ne permet pas d'écarter complètement l'hypothèse d'un arrêt de l'expansion après A18. Un autre test de la validité de notre interprétation est de comparer nos résultats avec ce qui peut être prédit par l'évolution à l'axe de CIR (fig. 1).

En effet on a longtemps considéré que CAR et CIR formaient la même limite de plaque entre Afrique et Inde et c'est seulement après la découverte de mouvements de compression dans le bassin Indien Central qu'il a été montré que deux limites de plaques distinctes étaient nécessaires pour expliquer les mouvements actuels à l'axe de CAR et de CIR (Wiens *et al.*, 1985). Néanmoins cet épisode est estimé avoir commencé au plus tard à 7 Ma, au plus tôt entre 20 et 10 Ma, pendant la période A6-A5 (Royer et Chang, 1991). Aussi, en première approximation, il est raisonnable de penser que les mouvements à l'axe des deux dorsales étaient les mêmes ou tout au moins très semblables pour la période A23-A5. Bien que les paramètres de rotation de Patriat et Ségoufin (1988) aient été déterminés à partir de données recueillies au sud de 10° S, donc très loin du bassin de Somalie, la prédiction des mouvements le long de notre profil de référence UG840-990 conduit à une évolution assez semblable avec un taux lent (1,5 cm/a) entre A6 et A5 et surtout un taux ultra-lent (0,75 cm/a) entre A18 et A8 avec le changement de régime plus proche de A6 que de A8. Malgré les imprécisions liées à cette méthode, il est clair qu'un taux d'expansion supérieur à 1,2 cm/a depuis l'époque A11 nécessiterait un point triple avec des événements s'étant produits à cette autre limite de plaque, qui auraient dû laisser des traces. Cette comparaison est donc en faveur d'un régime ultra-lent entre A18 et A7.

Directions d'expansion

La mesure des taux par comparaison de modèles et de profils isolés n'est exacte que si la direction d'expansion est connue. Celle-ci est indiquée d'abord par les failles transformantes, puis par les zones de fracture majeures ou à défaut par la perpendiculaire aux linéations. On mesure donc le plus souvent des taux apparents. Ainsi au niveau de notre profil de référence, la prédiction de la direction pour la

phase ultra-lente (ici calculée sur la période A20-A6) est de 055, soit suffisamment différente de la direction actuelle pour entraîner une augmentation du taux mesuré. Pour avoir une estimation de cette direction, nous avons déterminé les paramètres de rotation pour ces deux époques par superposition des anomalies A6 de Mercuriev (1990) (fig. 3) d'une part, et des quelques anomalies A20 identifiées avec certitude dans la partie sud-est de la dorsale (fig. 4) d'autre part. Si on obtient facilement un pôle acceptable pour A6 (23,3° N, 32,8° E, 9,24°), il n'en est pas de même pour A20 (30,7° N, 29,0° E, 13,52°) où, toutes les anomalies observées provenant du même segment, il a fallu « caler » cette reconstruction en mettant en coïncidence les limites de ce segment ; comme il n'y a aucun profil à l'est de GC23 sur le flanc nord, seule est utilisable la limite ouest, définie par l'interruption probable de la linéation à 60° E sur le flanc sud et 66° E sur le flanc nord. Par différence entre ces deux reconstructions, on obtient un pôle qui donne sur le flanc sud, près du profil UG84-990, un taux de 0,65 cm/a et une direction de 068 donc proches des valeurs prédites (fig. 10). Bien qu'il ne s'agisse que d'une première estimation, puisque d'une part la prédiction se fait dans une zone très éloignée du sud de CIR et que d'autre part nos reconstructions de CAR sont le résultat de mise en coïncidence grossière, il n'en reste pas moins qu'elle confirme que la direction d'expansion pendant la phase ultra-lente était supérieure à 045 et donc nettement différente à la fois de la phase rapide et de la phase actuelle. Cette différence n'est pas apparente sur les zones de fracture déjà cartographiées mais il en a été de même pour la courte période de direction d'expansion différente qui s'est produite entre les époques A31 et A24 sur la dorsale Sud-Ouest Indienne (Patriat *et al.*, 1985). La faible longueur de zone de fracture créée pendant ces courtes phases, et les perturbations liées aux deux changements de direction qui les définissent, font que ces événements ne sont visibles que sur des levés détaillés. La dernière carte gravimétrique de Sandwell *et al.* (1994), bien que dérivée de données altimétriques encore trop espacées au nord de 30° S, laisse entrevoir sur les flancs de CAR des directions voisines de celles prédites.

CONCLUSION

Cet article avait pour but de définir les grandes lignes de l'évolution de la dorsale de Carlsberg depuis 50 Ma. Grâce à de nouvelles données recueillies en particulier par des navires russes, il a été montré que cette période était caractérisée par trois phases, « rapide », « ultra-lente » et « actuelle » (fig. 10). La phase « rapide » est la fin de la période vraiment rapide A27-A23, de direction 030 sur le flanc sud, qui se termine en ralentissant progressivement jusqu'à se stabiliser à un taux très lent à A18 ; commence alors la phase « ultra-lente », de direction 055 ; enfin la phase « actuelle » débute à l'époque A6 au taux moyen de 1,4 cm/a et de direction 040. Par ailleurs il a été montré que, avant A5, l'évolution de CAR est très semblable à celle de CIR.

Avec ce schéma d'évolution, il va maintenant être possible d'étudier l'évolution souvent particulière et complexe de la segmentation de CAR, avec en particulier les réorganisations fréquentes de sa géométrie. Celles-ci se font soit par

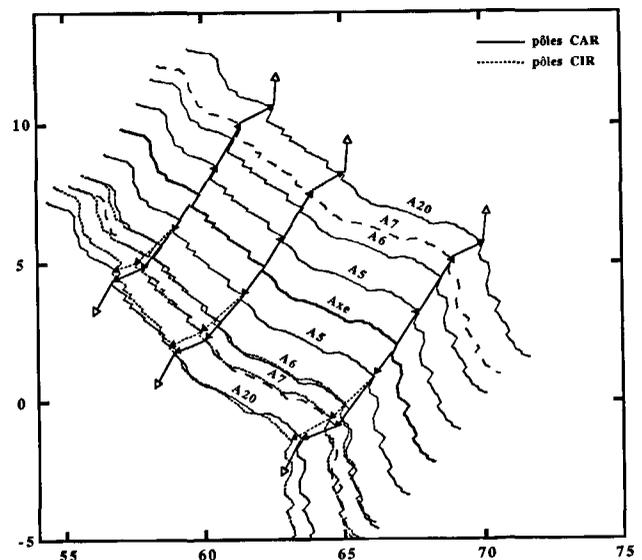


Figure 10

Comparaison entre les mouvements calculés d'après les anomalies magnétiques observées sur les deux flancs de CAR (en trait plein) et ceux prédits à partir des pôles de Patriat et Ségoufin (1988) décrivant l'ouverture de CIR (en pointillé) avant A5. Les différents isochrones représentent l'axe de CAR après une demi-rotation vers les deux flancs ; la géométrie ainsi obtenue ne serait exacte que si l'expansion avait été rigoureusement symétrique et la segmentation de la dorsale stable. La rotation pour A7 (en tireté) a été extrapolée en supposant que les mouvements, aussi bien sur CAR que sur CIR, étaient les mêmes qu'entre A6 et A5, et que l'angle était une fonction linéaire de l'âge. Il faut noter que pour l'époque A20, les deux courbes se superposent au niveau de la section de CAR où ont été observées les anomalies utilisées dans le calcul du pôle.

Sketch of the flow lines from Euler poles computed from magnetic anomalies observed along either CAR (this paper; solid line) or CIR (Patriat and Ségoufin, 1988; dotted line, before A5). Each isochron is obtained by a rotation of the ridge axis by an half angle on either flank; the resultant geometry would be exact only if the spreading had been symmetric and the ridge segmentation stationary. The rotation parameters for A7 (dashed line) have been determined by adding the A5-CAR finite rotation and the A5/A7 rotation defined by the stage poles of the A5/A6 CAR or CIR rotation with an angle increased proportionally to the age of A7 (25.4 Ma). Concerning the A20 isochrons, note the superposition of the two lines occurs along the CAR section where the data used in the new pole determination were obtained.

sauts de dorsale, probablement au début de la phase ultra-lente, soit par allongements/raccourcissements de certains segments pendant les phases rapides et actuelles, phénomènes de propagation qui semblent plus fréquents qu'ailleurs et qui sont à l'origine de la difficulté qu'il y avait d'élaborer un schéma d'évolution simple mais complet sans les données détaillées dont nous disposons maintenant.

La détermination des paramètres de l'ouverture de CAR va permettre de progresser dans l'étude des mouvements différentiels entre Australie et Inde ou encore dans le détail des mouvements liés à la collision Inde/Asie depuis 25 Ma. Enfin les conditions du transfert de l'activité de la dorsale du bassin de Mascareignes (MMR, Mid-Mascarene Ridge) à CAR et plus généralement celles de l'ouverture initiale de cette région, pourront être étudiées avec quelque chance de succès.

Remerciements

Ce travail a été rendu possible grâce au soutien accordé au premier auteur (S.M.) d'abord par le MRT puis par le MEN dans le cadre d'un contrat triennal. Cet article a bénéficié d'une lecture critique très constructive

de J. Ségoufin. Nous remercions R. Schlich et M. Munsch pour avoir mis à notre disposition les données des campagnes du laboratoire de Géophysique Marine de l'EOPG Strasbourg. La version finale a été grandement améliorée grâce aux nombreuses corrections suggérées par O. Dauteuil, J. Goslin et un lecteur anonyme.

RÉFÉRENCES

- Bowin C., P.R. Vogt** (1966). Magnetic lineations between Carlsberg Ridge and Seychelles Bank, Indian ocean. *J. Geophys. Res.* **71**, 2625-2630.
- Bullard E.C.** (1968). The Bakerian Lecture 1967: Reversals of the Earth's magnetic field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **263**, 481-542.
- Dyment J.** (1991). *Structure et évolution de la lithosphère dans l'océan Indien : apport des anomalies magnétiques*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Jekhowsky B.** (1963). La méthode des distances minimales, nouveau procédé quantitatif de corrélation stratigraphique ; exemple d'application en paléontologie. *Rev. Inst. Fr. Pétrole* **18**, 629-653.
- Karasik A.M., S.A. Mercuriev, L.I. Mitin, N.A. Sochevanova, V.N. Yanovskiy** (1986). Main features in history of opening of the Arabian Sea, according to data of a systematic magnetic survey. *Transaction of the USSR Academy of Sciences (earth science sections)* **286**, 81-84.
- Karasik A.M., S.A. Mercuriev, N.A. Sochevanova, V.N. Yanovskiy** (1988). Morphologie et nature des anomalies magnétiques dans l'océan Indien nord-occidental, in: « Les champs géophysiques de l'océan Pacifique et de l'océan Indien ». Moscou, 80-90 (en russe).
- Karasik A.M., N.A. Sochevanova et al.** (1990). International Geological-Geophysical Atlas of the Atlantic Ocean (maps 47, 48, 50, 54). UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission, Moscow.
- La Brecque J.L., D.V. Kent, S.C. Cande** (1977). Revised magnetic polarity time scale for Late Cretaceous and Cenozoic time. *Geology* **5**, 330-335.
- Loncarevic B.D., R.L. Parker** (1971). The Mid-Atlantic Ridge near 45° W. Magnetic anomalies and ocean floor spreading. *Can. J. Earth. Sci.* **8**, 883.
- Matthews D.H.** (1966). The Owen fracture zone and the northern end of the Carlsberg Ridge. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **259**, 172-186.
- McKenzie D.P., J.G. Sclater** (1971). The evolution of the Indian Ocean since the late Cretaceous. *Geophys. J.* **24**, 437- 528.
- Mercuriev S.A.** (1984). Programme « ASMA » pour corriger des variations temporelles par la méthode indirecte, in: Correction des variations au cours des levés magnétiques. Jdanov M. eds. IZMIR AN, Moscou, 290-300 (en russe).
- Mercuriev S.A.** (1990). *Les anomalies magnétiques et la géodynamique de l'océan Indien nord-occidental*. Thèse de doctorat, Académie des Sciences d'URSS, LO IZMIR AN, Leningrad (en russe).
- Mercuriev S.A., N.A. Sochevanova** (1990). Inhomogénéités du champ magnétique, comme la conséquence d'un point triple ancien de la dorsale de Carlsberg ? in : Induction électromagnétique dans l'Océan Mondial. Jdanov M. eds. Moscou, 48-56 (en russe).
- Mercuriev S.A., N.A. Sochevanova** (1993). l'océan Indien nord-ouest, in: Le champ magnétique dans les Océans. Gorodnitsky A. eds. Nauka, Moscou, 134-156 (en russe).
- Morgan W.Y., T.P. Loomis** (1971). Correlation coefficients and sea-floor spreading and automated analysis of magnetic profiles. *Marine Geophys. Res.* **1**, 248-260.
- Norton I.O., J.G. Sclater** (1979). A model for the evolution of the Indian Ocean and the breakup of Gondwanaland. *J. Geophys. Res.* **84**, 6803-6830.
- Parsons B., J. Sclater** (1977). An analysis of the variation of ocean floor, heat flow, and bathymetry with age. *J. Geophys. Res.* **82**, 803-827.
- Patriat P., J. Segoufin, J. Goslin, P. Beuzart** (1985). Relative positions of Africa and Antarctica in the upper cretaceous: evidence for non-stationary behaviour of fracture zones. *Earth Planet. Sci. Lett.* **75**, 204-214.
- Patriat P.** (1987). *Reconstitution du système de dorsales de l'Océan Indien par les méthodes de la cinématique des plaques*. Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises, Paris, 308 p.
- Patriat P., J. Segoufin** (1988). Reconstruction of the Central Indian Ocean. *Tectonophysics* **155**, 211-234.
- Ribet B.** (1989). *Étude Géophysique du Nord-Ouest de l'océan Indien : cinématique Inde-Afrique*. Thèse de doctorat, Université de Paris 7.
- Royer J.-Y., J.G. Sclater, D.T. Sandwell** (1989). A preliminary tectonic chart of the Indian Ocean. *Proc. Indian Acad. Sci., Earth Planet. Sci.* **98**, 7-24.
- Royer J.-Y., T. Chang** (1991). Evidence for Relative Motions Between the Indian and Australian Plates During the Last 20 m.y. From Plate Tectonic Reconstructions: Implications for the Deformation of the Indo-Australian Plate. *J. Geophys. Res.* **96**, 11779-11802.
- Sandwell D.T., W.H. Smith, M.M. Yale** (1994). ERS-1 Geodetic Mission reveals detailed tectonic structures. *EOS* **75**, 155
- Schlich R.** (1975). *Structure et Age de l'océan Indien Occidental*, Mém. hors-série Soc. géol. de France, **6**, Paris, 103 p.
- Schlich R.** (1982). The Indian Ocean: aseismic ridges, spreading centers and oceanic basins, in: The Ocean Basins and Margins. Nairn and Stehli eds. New York, London, 51-147.
- Taylor P.T.** (1968). Interpretation of the north Arabian sea aeromagnetic survey. *Earth Planet. Sci. Lett.* **4**, 232-236.
- Tisseau J.** (1978). *Étude structurale du golfe d'Aden et du bassin de Somalie (océan Indien occidental nord)*. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Paris-sud.
- Tisseau J., P. Patriat** (1981). Identification des anomalies magnétiques sur les dorsales à faible taux d'expansion : méthode des taux fictifs. *Earth Planet. Sci. Lett.* **52**, 381-396.
- Vine F.J., D.H. Matthews** (1963). Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature* **199**, 947-949.
- Whitmarsh R.B.** (1974). Some aspects of plate tectonics in the Arabian Sea, in: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, volume 23. Whitmarsh R.B., O.E. Weser and D.A. Ross eds. Washington, 527-535.
- Wiens D.A., D.C. DeMets, R.G. Gordon, S. Stein, D. Argus** (1985). A diffuse plate boundary model for Indian Ocean tectonics. *Geoph. Res. Lett.* **12**, 429-432.

ANNEXE

Méthode numérique d'identification des anomalies magnétiques

À l'heure actuelle on doit constater que personne n'utilise de procédures formelles pour identifier les anomalies magnétiques, et que par conséquent il n'y a pas d'estimation de l'authenticité des résultats obtenus. C'est Bullard (1968), qui a souligné la difficulté de ce problème. Il y a eu des tentatives (Morgan et Loomis, 1971; Loncarievic et Parker, 1971) pour appliquer ces procédures formelles, mais ces méthodes n'ont pas trouvé d'application dans la pratique habituelle de l'analyse géochronologique. À notre avis la reconnaissance des anomalies magnétiques est proche de la reconnaissance de forme et il est donc utile d'y appliquer des principes différents de ceux liés à l'analyse de corrélation habituelle.

La méthode que nous proposons a pour base le principe de l'arrangement, mis en œuvre par Jekhowsky (1963) pour construire un algorithme de corrélation lithologique. Ce principe repose sur l'affirmation que la courbe qui relie les points de corrélation est monotone. Les points de corrélation sont les points où est obtenu le coefficient de corrélation le plus grand entre un intervalle sur une courbe et tous les intervalles de même longueur sur l'autre. C'est la combinaison du principe de l'arrangement (Jekhowsky, 1963) et de la mesure de la ressemblance, qui constitue l'idée de cet algorithme.

Le principe de cette méthode consiste à construire et analyser des figures de corrélation, que l'on peut obtenir de la façon suivante : sur le profil observé on choisit les inter-

valles à corréler, définis par leur longueur l (ici la même longueur pour tous les intervalles) et leur point milieu x_1, x_2, \dots, x_n . Pour chacun de ces intervalles on calcule les coefficients de corrélation avec le profil modèle au moyen de fenêtres glissantes de même longueur, décalées d'un pas d'échantillonnage à chaque itération ; l'ensemble de ces coefficients forme la fonction

$$R_{xy}^1(t) = \frac{\sum_{i=1}^l X(i) Y(t+i-1)}{\sqrt{\sum_{i=1}^l X^2(i) Y^2(t+i-1)}},$$

correspondant à l'intervalle de point milieu x_1 qui atteint plusieurs maxima à certaines distances $t_1^1, t_2^1, \dots, t_n^1$. Ensuite, dans un système de coordonnées rectangulaires, où les axes représentent les distances le long du profil observé pour les abscisses et le long du modèle calculé pour les ordonnées, on reporte les points de coordonnées x_1, t_n^1 correspondant aux maxima importants, au côté desquels on marque la valeur du coefficient de corrélation obtenu à ce point.

On continue de la même façon avec l'intervalle suivant de milieu x_2 et on obtient la fonction $R_{xy}^2(t)$ avec les valeurs du coefficient de corrélation et leurs coordonnées pour le deuxième intervalle sur le profil observé. Ainsi, finalement on obtient les fonctions de corrélation pour tous les intervalles.

On voit, que « l'arrangement » des points de corrélations est meilleur sur la figure 6b que sur la figure 6a.