

Étude géophysique des dorsales de l'Océan Indien dans la région du point triple de Rodriguez*

Océan Indien
Point triple de Rodriguez
Dorsale médio-océanique
Accrétion

Indian Ocean
Rodriguez Triple Junction
Mid-ocean ridge
Accretion

Marc MUNSCHY, Roland SCHLICH

Institut de Physique du Globe de Strasbourg C.N.R.S. UA 233, Laboratoire de Géophysique
Marine, 5, rue Descartes 67084 Strasbourg Cedex.

*Cet article a été publié précédemment dans : Actes du Colloque sur la Recherche Scientifique dans les Terres Australes, *Strasbourg, 1987*.

RÉSUMÉ

L'océan Indien est caractérisé par un système original de trois dorsales qui convergent en un point triple situé par 25°30'S et 70°E (point triple de Rodriguez). De nombreuses campagnes océanographiques ont permis d'étudier ce système de dorsales et de préciser les taux d'expansion et les directions d'ouverture : 3,0 à 3,1 cm.a⁻¹ et N140° à N133° pour la dorsale est-indienne au sud-est; 2,6 à 2,7 cm.a⁻¹ et N152° pour la dorsale centrale-indienne au nord; 0,7 à 0,9 cm.a⁻¹ et N067° à N082° pour la dorsale ouest-indienne au sud-ouest. En 1984 les campagnes Rodriguez du N/O «Jean Charcot» ont eu pour but l'étude détaillée du point triple de Rodriguez et d'un segment de la zone axiale des trois dorsales associées. L'axe de ces dorsales est marqué par une vallée axiale d'autant plus encaissée et profonde que le taux d'expansion est faible. La vallée axiale n'est pas en équilibre isostatique, mais est le siège d'un déficit de densité (0,4 à 0,8 g.cm⁻³ pour un taux de 1 cm.a⁻¹ et 0,1 à 0,3 g.cm⁻³ pour un taux de 3 cm.a⁻¹) et de masse. Les segments de dorsale se divisent en unités dont la longueur varie entre 10 et 50 km. Ces unités correspondent à l'expression superficielle d'un ensemble de chambres magmatiques à comportement unitaire. Les flancs des dorsales apparaissent en équilibre isostatique régional et leur rigidité en flexion varie en fonction du taux d'expansion : 50 10¹⁷ N.m pour un taux de 1 cm.a⁻¹ et 4 10¹⁷ N.m pour un taux de 3 cm.a⁻¹. L'accrétion océanique n'est pas uniforme à l'échelle d'un segment de dorsale, elle l'est pour les unités de 3 cm.a⁻¹. L'accrétion océanique n'est pas uniforme à l'échelle d'un segment de dorsale, elle l'est pour les unités reconnues le long des segments. L'accrétion apparaît symétrique, discontinue et périodique (1,0 à 1,6 Ma pour un taux de 1 cm.a⁻¹ et 0,3 à 0,5 Ma pour un taux de 3 cm.a⁻¹). L'évolution du point triple de Rodriguez est instable; l'axe de la dorsale centrale-indienne se décale par rapport à l'axe de la dorsale est-indienne à un taux de 0,14 cm.a⁻¹. La jonction triple se reconstitue par des sauts périodiques (1 Ma), ce qui explique l'importance et la répétitivité des reliefs à l'axe de la dorsale ouest-indienne à proximité du point triple.

Oceanologica Acta, 1990. Volume spécial 10, Actes du Colloque Tour du Monde Jean Charcot, 2-3 mars 1989, Paris. 119-128.

ABSTRACT

Geophysical study of the Indian Ocean spreading ridges close to the Rodriguez Triple Junction

The Indian Ocean is dominated by a system of three mid-ocean ridges converging at the Rodriguez Triple Junction located near 25°30'S and 70°E. Numerous studies carried out on these three ridges provided the basic information on spreading rates and spreading directions: 3.0 to 3.1 cm/a and N 140° to N 133° for the Southeast Indian Ridge, 2.6 to 2.7 cm/a and N 148° to N 152° for the Central Indian Ridge to the North, 0.7 to 0.9 cm/a⁻¹ and N 067° to N 082° for the Southwest Indian Ridge. In 1984 the R/V Jean Charcot was able to run a detailed survey over the Rodriguez Triple Junction and over an axial ridge segment located on each of the three associated ridges.

The ridge axes are cut by distinct rift valleys; the depth of these rift valleys is a function of spreading rates. The rift valleys are not in isostatic equilibrium, but show clear density and mass deficits (0.4 to 0.8 g.cm⁻³ for spreading rate of 1 cm/a⁻¹ and 0.1 to 0.3 g/cm⁻³ for spreading rates of 3 cm/a⁻¹). The ridge segments are divided in units varying in length between 10 and 50 km. These units are the superficial expression of the underlying magma chamber system. The ridge flanks appear to be regionally compensated and their flexural rigidity varies as a function of spreading rates: 50.10¹⁷ N.m for spreading rates of 1 cm/a and 4.10¹⁷ N.m for spreading rates of 3 cm/a. Accretion at the ridge axis is not uniform along a same ridge segment, but becomes uniform at the scale of the ridge units. Accretion appears symmetrical, discontinuous and periodic (1.0 to 1.6 Ma for spreading rates of 1 cm/a and 0.3 to 0.5 Ma for spreading rates of 3 cm/a).

The Rodriguez Triple Junction is unstable. The axis of the Central Indian Ridge is offset from the axis of the Southeast Indian Ridge at a velocity of 0.14 cm/a. The triple junction is restored by small periodical jumps (1 Ma); this model accounts for the observations made and in particular explains the relief of the Southwest Indian Ridge close to the Rodriguez Triple Junction.

Oceanologica Acta, 1990. Volume spécial 10, Actes du Colloque Tour du Monde Jean Charcot, 2-3 mars 1989, Paris. 119-128.

LES DORSALES DE L'OCEAN INDIEN

Le système de dorsale de l'océan Indien peut être schématisé par un lambda géant. Comparé à l'océan Atlantique, caractérisé par la présence d'une seule dorsale orientée grossièrement nord-sud, et à l'océan Pacifique marqué par un système de dorsale plus complexe mais essentiellement localisé dans la partie est et orienté généralement nord-sud, le système de dorsale de l'océan Indien correspond à une configuration particulière. Cette configuration originale existe depuis le Crétacé supérieur et plus précisément depuis l'époque de l'anomalie magnétique 30 (Schlich, 1984).

Le centre du Lambda géant correspond au point triple de Rodriguez, situé par 25°30'S et 70°00'E à 900 km au sud-ouest de l'île de Rodriguez (fig. 1). Ce point triple résulte de la convergence de trois dorsales caractérisées par des taux et des directions d'expansion différents: au nord la dorsale centrale-indienne, au sud-est la dorsale est-indienne et au sud-ouest la dorsale ouest-indienne.

La dorsale centrale-indienne sépare les plaques africaine et indo-australienne entre le point triple de Rodriguez et l'équateur. Elle est prolongée au nord vers la mer Rouge par les dorsales de Carlsberg et de Sheba. Son taux d'expansion et sa direction d'ouverture varient du nord au sud entre 1,8 cm.a⁻¹ et N142° à 9°S et 2,5 cm.a⁻¹ et N149° au

point triple de Rodriguez (Fisher *et al.*, 1971; Tapscott *et al.*, 1980). La dorsale centrale-indienne est une dorsale lente à intermédiaire avec une vallée axiale assez bien marquée. Elle est décalée, surtout dans sa moitié nord, par de nombreuses failles transformantes à rejets importants; les principales zones de fracture sont la Vema à 9°S, l'Argo à 14°S et Marie Celeste à 18°S (Fischer *et al.*, 1971). Les segments au sud de 21°S, en direction du point triple, apparaissent de plus en plus récents, le dernier grand segment ayant été créé il y a au plus 12 Ma (Tapscott *et al.*, 1980); par ailleurs ces segments sont systématiquement décalés vers le sud-ouest par des failles transformantes.

La dorsale est-indienne sépare les plaques indo-australienne et antarctique entre le point triple de Rodriguez et le point triple des îles Macquarie situé au sud-est de l'Australie. Son taux d'expansion et sa direction d'ouverture varient entre 3,0 cm.a⁻¹ et N137° au point triple de Rodriguez et 3,7 cm.a⁻¹ et N094° au point triple des îles Macquarie (Schlich et Patriat, 1967; Le Pichon et Heirtzler, 1968; McKenzie et Sclater, 1971; Schlich et Patriat, 1971a; Weissel et Hayes, 1972; Sclater et Fischer, 1974; Schlich, 1975; Tapscott *et al.*, 1980; Schlich, 1982; Patriat, 1983; Royer, 1985). Du point triple de Rodriguez à la zone de fracture majeure d'Amsterdam à 37°S, la dorsale est-indienne est découpée en huit segments caractérisés par des décalages de faible amplitude et des vallées axiales dont la profondeur varie entre 500 et 800 m (Royer, 1985;

façon détaillée par Tapscott *et al.* (1980). Sa géométrie et son évolution ont été analysées par Patriat (1983) et Patriat et Courtillot (1984). Le point triple de Rodriguez constitue l'un des rares exemples de jonction de trois dorsales actives. Son originalité résulte de sa configuration qui apparaît relativement simple, sans structure anormale dans son voisinage, et de son évolution qui remonte au Crétacé supérieur.

LES CAMPAGNES DE GÉOPHYSIQUE SUR LES DORSALES DE L'OcéAN INDIEN

Les données géophysiques recueillies sur les dorsales de l'océan Indien à partir de 1967, en particulier par le laboratoire de Géophysique Marine de l'Institut de Physique de Globe de Paris décentralisé en 1980 à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg ont permis de préciser le schéma structural proposé par Heezen et Tharp (1965). Ces données ont été acquises avec le soutien logistique du Territoire des Terres Australes et Antarctiques Françaises, de 1967 à 1972 du M/S «Galiéni» (campagnes Galiéni 0 en 1967, Galiéni 1 en 1968, Galiéni 2 en 1969, Galiéni 3 en 1970, Galiéni 5 et 6 en 1972), puis à bord du N/O «Marion Dufresne» (campagnes Marion Dufresne 1 en 1973, Marion Dufresne 5 en 1975, Marion Dufresne 11 en 1976, Marion Dufresne 15 en 1977, Marion Dufresne 23 en 1980, Marion Dufresne 26 en 1981 et Marion Dufresne 37 en 1983). Le laboratoire a également participé à la campagne du N/O «Atlantis» (campagne Atlantis II-93 en 1976) mise en œuvre par la Woods Hole Oceanographic institution et dispose de nombreuses données géophysiques obtenues par d'autres institutions. Les campagnes Atlantis II-93 et Marion Dufresne 37 ont permis d'aborder l'étude géophysique et géologique détaillée des dorsales de l'océan Indien dans la région du point triple de Rodriguez.

En 1984, les campagnes Rodriguez I (du 14 janvier au 16 février) et Rodriguez II (du 3 avril au 7 mai) programmées par l'IFREMER dans le cadre du tour du monde du N/O Jean Charcot ont eu pour objectif une reconnaissance géophysique, pétrologique et géochimique détaillée du point triple de Rodriguez associée à une exploration similaire d'un segment de la zone axiale des dorsales est-indienne, centrale-indienne et ouest-indienne. Les segments reconnus, d'une longueur voisine de 90 km, sont situés à environ 450 km du point triple de Rodriguez.

Les données bathymétriques ont été acquises à l'aide du sondeur à faisceaux étroits multiples qui équipe le N/O Jean Charcot; il permet de cartographier les fonds océaniques sous le navire sur une largeur égale à environ les trois quarts de la profondeur (Renard et Allenou, 1979). La densité des mesures est d'environ 30 m dans la direction du navire et d'environ 140 m dans la direction perpendiculaire; chacune des mesures représente approximativement la profondeur moyenne d'un disque de terrain

de 120 m de diamètre. Les données gravimétriques ont été acquises à l'aide d'un gravimètre marin BODEN SEEWERK KSS-30 et les données magnétiques à l'aide d'un magnétomètre à protons GEOMETRICS 801. Dans chacune des quatre zones d'étude détaillée, les profils bathymétriques Seabeam, gravimétriques et magnétiques ont été réalisés avec un espacement de 2 à 5 km (Schlich *et al.*, 1987). Ces données ont permis de dresser, pour la zone du point triple de Rodriguez et pour les segments reconnus à l'axe des dorsales centrale-indienne et ouest-indienne, des cartes bathymétriques au 1/200 000 et 1/100 000 associées à des cartes au 1/100 000 de l'anomalie gravimétrique à l'air libre et de l'anomalie magnétique du champ corrigée des variations temporelles (Schlich *et al.*, 1988).

L'interprétation des cartes au 1/100 000 permet d'étudier la structure de la croûte océanique à l'axe des trois dorsales de l'océan Indien, de préciser certains paramètres de l'accrétion océanique, et enfin de décrire l'évolution du point triple de Rodriguez qui correspond à un modèle de type RRF instable.

STRUCTURE DE LA CROÛTE OCÉANIQUE À L'AXE DES DORSALES DE L'OcéAN INDIEN

L'examen des cartes bathymétriques au 1/100.000 permet de localiser les vallées axiales, les flancs de chacune des dorsales et les failles transformantes associées à ces structures. Ces cartes permettent également de relever avec précision les directions des linéaments bathymétriques (alignements de hauts ou de bas) et des failles identifiées à des zones allongées dont la pente est supérieure à 20 degrés (fig. 2 et 3). Aux cartes d'anomalie gravimétrique à l'air libre et d'anomalie magnétique correspondent des grilles 57 × 57 au pas d'environ 2 km associées à des grilles bathymétriques de même type. Ces grilles sont traitées numériquement et les résultats obtenus sont utilisés pour analyser la structure de la croûte océanique. A partir d'un modèle de densité (modèle à densité constante, modèle d'Airy et modèle de plaque élastique fine) on génère une grille correspondant à l'anomalie gravimétrique et on la compare aux anomalies observées. L'inversion des grilles de l'anomalie gravimétrique par méthode spectrale permet de calculer, pour chaque zone étudiée, la densité de la croûte océanique. Les grilles de l'anomalie magnétique, associées aux grilles bathymétriques, ont été inversées par méthode spectrale de manière à obtenir des grilles donnant les valeurs de l'aimantation. L'inversion a été effectuée en supposant que l'aimantation de la croûte océanique ne varie pas en fonction de la profondeur et que la couche aimantée garde une épaisseur constante de 500 m.

La dorsale est-indienne à 27°40'S. La dorsale est-indienne possède une vallée axiale peu marquée (300 m) et un relief assez doux. Au nord-ouest de la zone étudiée, une faille transformante décale l'axe de la dorsale de 20 km vers le sud-ouest (fig. 3B). Les failles normales associées aux flancs de la dorsale ont un rejet de 100 à

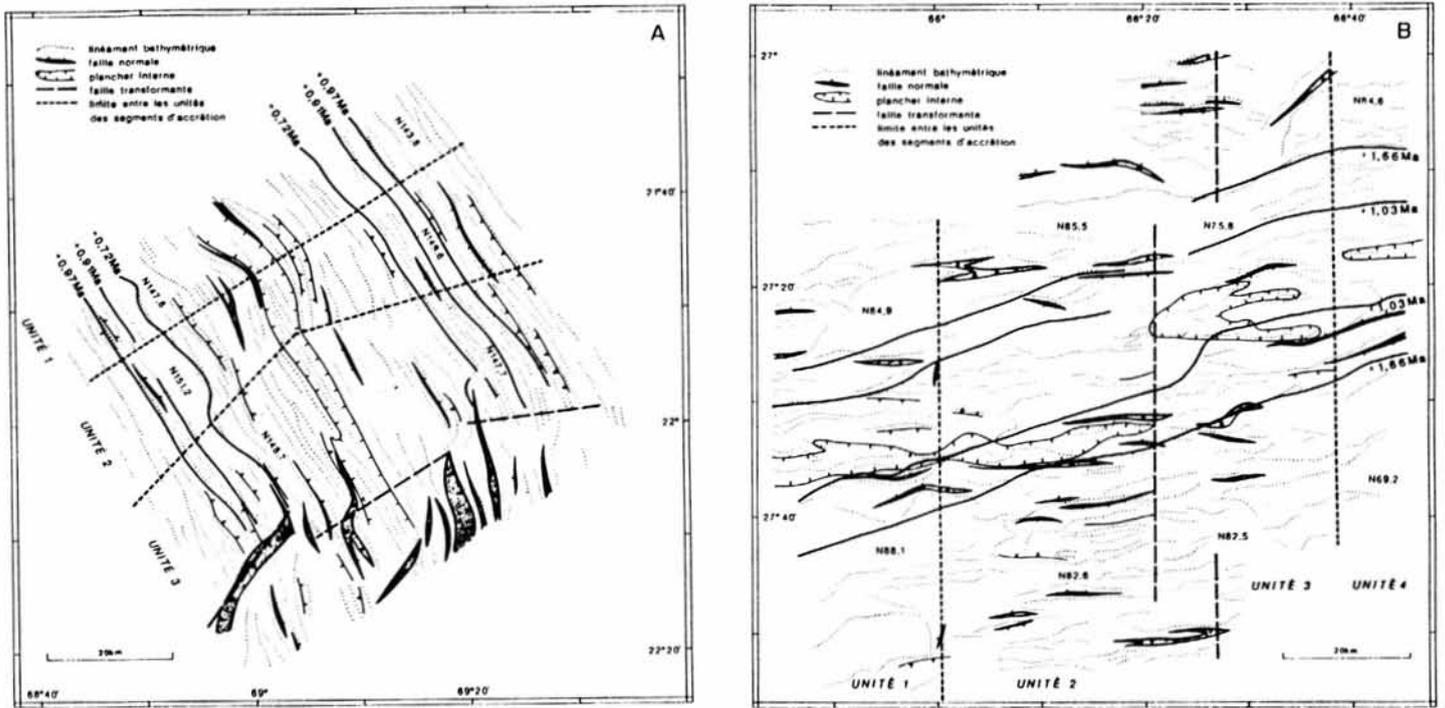


Figure 2

Cartes morphotectoniques déduites de l'analyse des cartes bathymétriques au 1/100 000 : A, dorsale centrale-indienne à 21°50'S. B, dorsale sud-ouest indienne à 27°30'S.

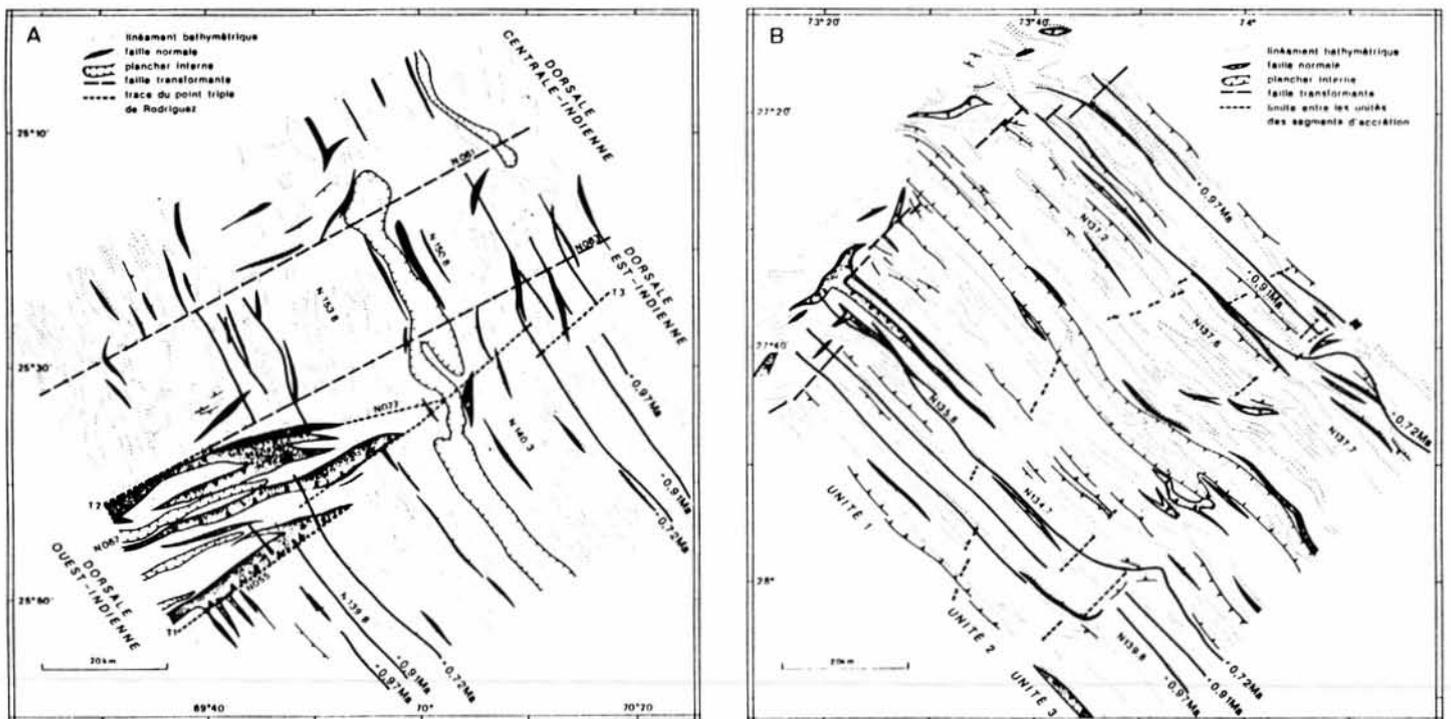


Figure 3

Cartes morphotectoniques déduites de l'analyse des cartes bathymétriques au 1/100 000 : A, point triple de Rodriguez; B, dorsale est-indienne à 27°40'S.

300 m et une longueur importante (jusqu'à 30 km). L'étude de la direction de la vallée axiale et de la répartition des linéaments bathymétriques et des failles montre que le segment étudié est composé de trois unités distinctes :

L'unité 1, dont la direction moyenne d'expansion est N137°, a une topographie influencée par la zone de fracture, l'unité 2 (N136°) a une longueur qui augmente avec le temps; l'unité 3 (N139°) est décalée par rapport à l'unité 2 de 4 km vers le nord-est. Le modèle expliquant au mieux l'anomalie gravimétrique des flancs de la dorsale est le modèle de plaque élastique fine; la rigidité en flexion calculée est de $3,8 \cdot 10^{17}$ N.m. Par contre le calcul des densités permet de montrer que la vallée axiale n'est pas en équilibre isostatique mais qu'elle est le siège d'un déficit de densité (de 0,1 à 0,3 g.cm⁻³) et de masse. L'étude de la carte d'aimantation permet de mettre en évidence trois inversions du champ magnétique terrestre datées à 0,72, 0,91 et 0,97 Ma à partir de l'échelle des inversions du champ magnétique proposée par Lowrie et Alvarez (1981). Sur chacun des flancs, ces zones de transition entre les domaines à aimantation normale et inverse dessinent des linéaments symétriques dont la direction est identique à celle des linéaments bathymétriques voisins. Le taux d'expansion moyen, déduit des mesures de distance entre les zones de transition datées à 0,72 et 0,91 Ma, est de $3,09 \text{ cm.a}^{-1}$.

La dorsale centrale-indienne à 21°50'S. La vallée axiale de la dorsale centrale-indienne est plus marquée (500 m) et le relief est plus rugueux. Au sud-est de la zone étudiée, l'axe de la dorsale est décalé de 15 km vers le sud-ouest par une faille transformante (fig. 2A). Le rejet moyen des plans de faille est compris entre 200 et 400 m. Trois unités distinctes sont individualisées pour le segment étudié; leur direction moyenne est N146° (unité 1), N150° (unité 2) et N148° (unité 3). Le modèle gravimétrique de plaque élastique fine s'applique bien aux flancs de la dorsale et permet de calculer une rigidité en flexion de $3,3 \cdot 10^{17}$ N.m. par contre la vallée axiale n'est pas en équilibre isostatique, mais est le siège d'un déficit de densité (de 0,1 à 0,3 g.cm⁻³) et de masse. Les zones de transition mises en évidence sur la carte d'aimantation et datées à 0,72, 0,91 et 0,97 Ma sont symétriques par rapport à l'axe de la dorsale et parallèles aux linéaments bathymétriques voisins. Le taux d'expansion moyen calculé est de $2,60 \text{ cm.a}^{-1}$.

La dorsale ouest-indienne à 27°50'S. La dorsale ouest-indienne est caractérisée par une vallée axiale très marquée (environ 1000 m) et un relief particulièrement accidenté. La zone étudiée est traversée en son centre par une zone de fracture de direction nord-sud décalant l'axe de la dorsale de 20 km (fig. 2B). Les plans de faille ont des rejets pouvant atteindre 1000 m. Les unités composant les deux segments étudiés sont aisément identifiées; elles sont au nombre de quatre et leurs directions moyennes sont N087° (unité 1), N084° (unité 2), N079° (unité 3) et N077° (unité 4). la rigidité en flexion calculée pour les flancs de la dorsale est de $50 \cdot 10^{17}$ N.m. la vallée axiale n'est pas en équilibre isostatique et le déficit de densité varie de 0,4 à 0,8 g.cm⁻³. Les zones de transition sont peu

marquées sur la carte d'aimantation et leur direction assez différente de celle des linéaments bathymétriques avoisinants; seules deux inversions du champ magnétique terrestre semblent pouvoir être mises en évidence; elles sont datées à 1,03 et 1,66 Ma. Le taux d'expansion moyen calculé à partir de ces repères est de $0,90 \text{ cm.a}^{-1}$.

Structure des dorsales. La principale caractéristique des zones étudiées est la présence d'une vallée axiale allongée, de direction assez uniforme et à fond généralement plat. La profondeur de cette vallée axiale augmente lorsque le taux d'expansion diminue : de 3 500 m pour un taux de $3,09 \text{ cm.a}^{-1}$ à 5 000 m pour un taux de $0,90 \text{ cm.a}^{-1}$. Il reste que pour un taux d'expansion donné, les variations de profondeur peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres, et ce, en particulier à l'approche de failles transformantes. La vallée axiale n'est pas en équilibre isostatique et on met en évidence un déficit de masse non compensé. Ces résultats constituent un argument important en faveur de l'existence de chambres magmatiques associées à l'axe des dorsales. Le déficit de densité, plus important pour les dorsales à taux d'expansion faibles (0,4 à 0,8 g.cm⁻³ pour un taux de 1000 cm.a^{-1} et 0,1 à 0,3 g.cm⁻³ pour un taux de 3 cm.a^{-1}), semble indiquer que les ensembles de chambres magmatiques sont plus étendus lorsque le taux d'expansion diminue.

Les flancs des segments de dorsale étudiés ont une rugosité qui augmente lorsque le taux d'expansion diminue. Les directions mesurées pour les linéaments bathymétriques et les failles sont uniformes pour les unités définies à l'intérieur d'un même segment de dorsale. Les flancs sont en équilibre isostatique régionale : la compensation locale des reliefs n'est pas assurée en raison de la rigidité de la croûte océanique. Cette rigidité en flexion varie de $4 \cdot 10^{17}$ N.m pour un taux de 3 cm.a^{-1} à $50 \cdot 10^{17}$ N.m pour un taux de 1 cm.a^{-1} .

L'ACCRÉTION OCÉANIQUE

L'étude de la largeur des zones de transition de l'aimantation permet d'évaluer l'extension horizontale de la zone de mise en place de la croûte océanique (zone néovolcanique); elle serait d'environ 4 km quelque soit le taux d'expansion et resterait inférieure ou égale à la largeur de la vallée axiale. La mesure précise des distances entre isochrones de l'expansion océanique permet de montrer que la zone néovolcanique se déplace au sein de la vallée axiale au cours du temps. Le déplacement peut être soit brutal (saut de la zone néovolcanique) soit progressif (migration progressive de la zone néovolcanique). L'étude des formes du relief à grande échelle (longueurs d'ondes supérieures à 5 km) permet de montrer que les traits bathymétriques ainsi individualisés sont essentiellement symétriques par rapport à l'axe de la dorsale, qu'ils présentent un caractère périodique et qu'ils définissent les limites entre les unités reconnues à l'intérieur des segments de dorsale. La périodicité est de l'ordre de 10 à 16 km pour chacune des zones étudiées et semble dépen-

dre du taux d'expansion (1,0 à 1,6 Ma pour un taux de 1 cm.a^{-1} et de 0,3 à 0,5 Ma pour un taux de 3 cm.a^{-1}). L'accrétion océanique apparaît donc périodique, symétrique et uniforme à l'échelle des unités de segment, ce qui n'est pas le cas pour un segment entier. La zone néovolcanique, fonctionnant sans doute en alternance avec les zones tectoniques de part et d'autre, pourrait se déplacer à l'intérieur de la vallée axiale à chaque cycle. Une telle évolution serait la conséquence directe d'un fonctionnement discontinu des chambres magmatiques.

STRUCTURE ET ÉVOLUTION DU POINT TRIPLE DE RODRIGUEZ

Structure du point triple de Rodriguez. Sur la carte bathymétrique au 1/100 000, la jonction de la dorsale ouest-indienne avec les dorsales est-indienne et centrale-indienne est clairement exprimée et peut être localisée dans une zone de 50 km^2 centrée sur $25^{\circ}32'S$ et $70^{\circ}02'E$. Les caractères morphologiques de trois dorsales et la position des traces du point triple sur chacune des plaques lithosphériques sont bien établis.

Le segment de la dorsale est-indienne couvert par la carte bathymétrique a une longueur de 30 km (fig. 3A). Dans cette zone la dorsale est-indienne correspond typiquement à une dorsale à taux d'expansion intermédiaire (McDonald, 1982). La rugosité du relief des flancs est faible et les dénivelés sont de l'ordre de 100 à 400 m. La vallée axiale, bien définie, est profonde de 200 à 600 m et large de 15 à 20 km. De part et d'autre de l'axe de la dorsale, les reliefs sont symétriques et les linéaments bathymétriques sont très allongés. La direction de ces linéaments a été mesurée et en moyenne elle est de $N140,3 \pm 3,7^{\circ}$, pour le flanc nord-est et de $N139,8 \pm 3,7^{\circ}$, pour le flanc sud-ouest. La légère différence entre la direction des deux flancs est liée à la précision des mesures et l'on retient une direction d'expansion moyenne $N140^{\circ}$.

La vallée axiale de la dorsale centrale-indienne prolonge celle de la dorsale est-indienne avec un léger changement de direction (12°) et un décalage de 5 km vers le nord-est (fig. 3A). A $25^{\circ}10'S$, l'axe de la dorsale centrale-indienne est décalé de 14 km vers le nord-est par une faille transformante. Entre le point triple et cette zone de fracture la dorsale centre-indienne sont plus rugueux et moins allongés que ceux de la dorsale est-indienne. La direction moyenne des linéaments bathymétriques est $N150,8 \pm 3,2^{\circ}$ pour le flanc nord-est et $N153,8 \pm 5,4^{\circ}$ pour le flanc sud-ouest. La différence de 3° entre les deux flancs n'apparaît pas significative et la direction moyenne d'expansion de la dorsale centrale-indienne est $N152^{\circ}$.

La dorsale ouest-indienne n'est exprimée que par deux canyons profonds de 4 300 et 5 000 m, sans structure volcanique apparente, distants de 7 km et de direction $N067^{\circ}$ (fig. 3A). On ne retrouve pas au niveau du point triple

les caractéristiques d'une dorsale océanique à taux d'expansion lent; on observe plutôt la présence d'une zone d'étirement où la mise en place de nouvelle croûte océanique se fait à un rythme extrêmement lent, voire nul.

Sur les trois plaques lithosphériques en présence, les traces du point triple correspondent aux frontières de plaque ou zones de contact entre la croûte océanique créée à l'axe de deux dorsales distinctes. La trace du point triple sur la plaque antarctique (-T1) est un relief exceptionnellement bien marqué (fig. 3A): les linéaments bathymétriques de la dorsale est-indienne s'interrompent sur moins de 200 m à l'aplomb d'une faille normale dont le rejet peut atteindre 2 600 m et la pente 45° . La trace T1 a une direction $N055^{\circ}$; à 15 km du point triple elle est décalée de 5 km vers le sud. La trace du point triple sur la plaque africaine (T2) est également très bien marquée: les linéaments bathymétriques de la dorsale centrale-indienne s'interrompent sur moins de 500 m à l'aplomb d'une faille majeure dont le rejet peut atteindre 2500 m et la pente 45° . La trace T2 a une direction $N077^{\circ}$ jusqu'à environ 40 km du point triple; à ce niveau elle est relayée par la zone de fracture signalée précédemment, de direction $N063^{\circ}$ qui identifie deux segments reconnus de la dorsale centrale-indienne (fig. 3A). La trace du point triple sur la plaque indo-australienne (T3) est peu marquée: elle correspond à une zone diffuse, large d'environ 5 km où les linéaments bathymétriques s'interrompent. Le changement de direction entre les linéaments associés à chacune des dorsales est inférieur à 15° .

La carte d'aimantation pour la zone du point triple de Rodriguez, obtenue par inversion spectrale de la carte d'anomalie magnétique, a permis de reconnaître le long des segments des dorsales est-indienne et centrale-indienne étudiés trois inversions du champ magnétique terrestre (Munsch, 1987). Les zones de changement de polarité sont datées à 0,72, 0,91 et 0,97 Ma. La cartographie de ces isochrones (fig. 3A) a permis de calculer les taux d'expansion sur les flancs des deux dorsales. Les valeurs obtenues permettent de montrer que l'asymétrie de l'expansion est faible (inférieur à 10%); les taux d'expansion moyens obtenus sont $2,99 \text{ cm.a}^{-1}$ pour la dorsale est-indienne et $2,73 \text{ cm.a}^{-1}$ pour la dorsale centrale-indienne.

Évolution du point triple de Rodriguez de 0 à 1 Ma.

Les directions et les taux d'expansion précis obtenus dans la zone du point triple de Rodriguez montrent que le point triple ne correspond pas à une jonction ride-ride-ride (RRR) stable (Munsch, 1987; Schlich *et al.*, 1987). En effet, les vecteurs vitesse, calculés pour les dorsales est-indienne et centrale-indienne à proximité du point triple, permettent de calculer un taux d'expansion pour la branche ouest-indienne en admettant que les trois vecteurs forment un triangle; on en déduit directement des traces du point triple; les directions ainsi obtenues diffèrent de 10° de celles observées (fig. 4A et 4B).

La direction de la trace T1 du point triple (plaque antarctique) est tellement bien marquée qu'elle doit nécessaire-

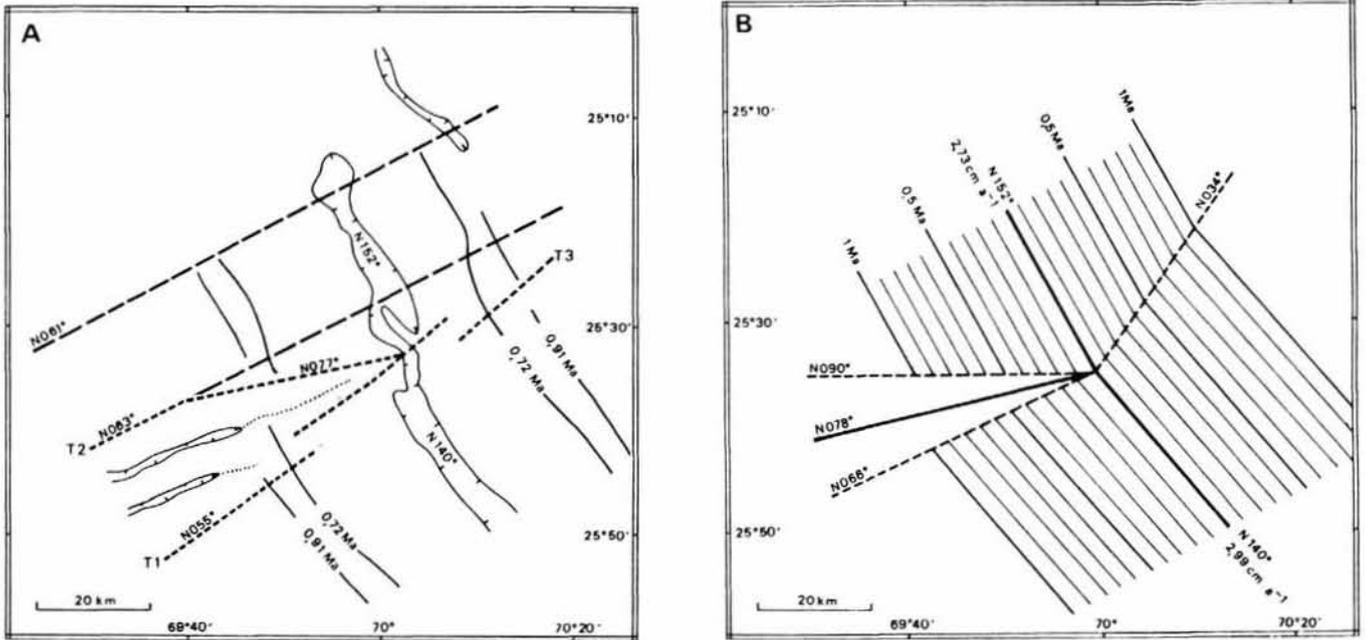


Figure 4

A, carte morphotectonique simplifiée du point triple de Rodriguez déduite de la carte morphotectonique (fig. 3A); B, carte des isochrones déduite du modèle d'évolution RRR stable du point triple de Rodriguez (les isochrones sont tracées tous les 0,1 Ma).

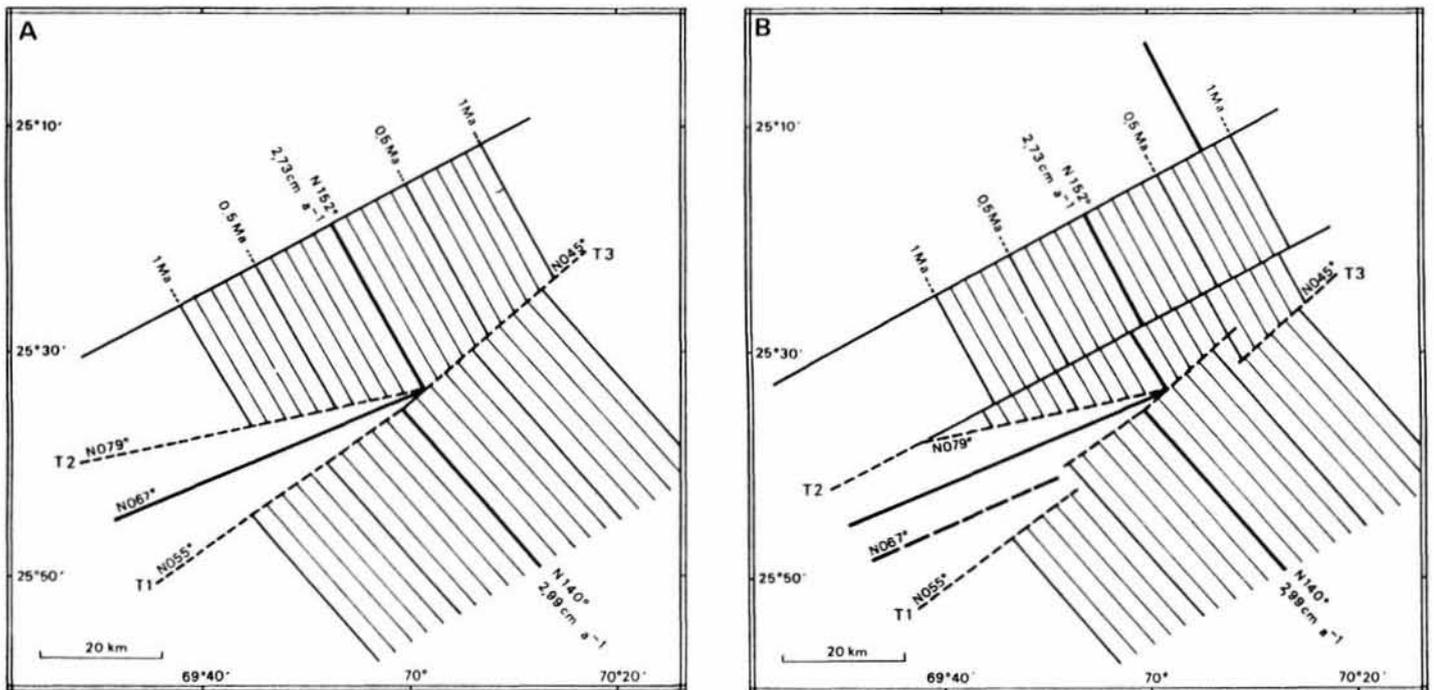


Figure 5

A, carte des isochrones déduite du modèle d'évolution RRF instable du point triple de Rodriguez; B, carte des isochrones déduite du modèle d'évolution RRF instable du point triple de Rodriguez et intégrant le saut de la jonction triple à 0,5 Ma. Les isochrones sont tracées tous les 0,1 Ma.

ment apparaît dans tous les modèles d'évolution proposés. C'est pourquoi le modèle retenu utilise les vecteurs vitesse des branches est-indienne et centrale-indienne à proximité du point triple ainsi que la direction de la trace T1 (N055°) sur la plaque antarctique. On en déduit par symétrie la direction de la trace T3 sur la plaque indo-australienne (N045°) la direction de la trace T2 sur la plaque africaine (N079°) et la direction et le taux d'expansion de la branche ouest-indienne (N067° et $0,65 \text{ cm.a}^{-1}$). Les trois directions calculées sont égales au degré près à celles observées. Le modèle ainsi défini est instable : les axes des branches est-indienne et centrale-indienne se décalent progressivement à un taux de $0,14 \text{ cm.a}^{-1}$. Le point triple correspond à une jonction ride-ride-faille transformante (RRF) instable. Ce modèle RRF instable prédit également un raccourcissement de la branche est-indienne à un taux de $0,18 \text{ cm.a}^{-1}$ (fig. 5A).

Si on compare la carte morphotectonique (fig. 4A) avec la carte des isochrones du modèle RRF instable (fig. 5A), on observe deux différences importantes. A 10 km du point triple l'axe de la dorsale centrale-indienne est décalé de 4 km vers le nord-est par une faille transformante. La trace du point triple T1 sur la plaque antarctique est décalée de 5 km vers le sud à 15 km du point triple. Ce décalage s'est produit il y a 0,5 Ma et correspond à la terminaison d'un canyon profond qui marque la dorsale ouest-indienne. On interprète cette observation par un saut de la jonction triple vers le nord-ouest de 5 km il y a 0,5 Ma. Ce saut s'accompagne de l'allongement de la dorsale est-indienne de 5 km au détriment d'un segment identique de dorsale centrale-indienne. Le modèle proposé (fig. 5B) permet d'expliquer deux traits majeurs observés au voisinage du point triple. Les canyons de la dorsale ouest-indienne sont toujours décalés vers le nord en allant vers le point triple; l'étude de leur répartition le long de la trace T1 jusqu'à 28° suggère que les sauts du point triple auraient lieu tous les 1 Ma environ. La dorsale est-indienne à proximité du point triple garde une longueur à peu près constante; le raccourcissement lié à la direction des traces T1 et T3 est compensé par les sauts périodiques du point triple. Du point triple à environ 21°S, l'axe de la dorsale centrale-indienne est systématiquement décalé vers le nord-est, ce qui s'explique par l'instabilité du point triple : les sauts du point triple semblent être à l'origine de la création des segments récents de la dorsale centrale-indienne.

CONCLUSION

Le système de trois dorsales de l'océan Indien en forme de lambda géant est apparu au Crétacé supérieur. Les dorsales est-indienne et centrale-indienne forment un système d'expansion océanique dont le taux d'expansion varie de $3,1 \text{ cm.a}^{-1}$ à 28°S à $2,6 \text{ cm.a}^{-1}$ à 22°S. La dorsale ouest-indienne, dont le taux d'expansion est particulièrement faible ($0,7$ à $0,9 \text{ cm.a}^{-1}$) rejoint ce système d'expansion en formant le point triple de Rodriguez. A proximité du point triple la dorsale ouest-indienne semble correspondre à une zone d'étirement sans accréation océanique.

L'étude géophysique détaillée de trois zones axiales des dorsales est-indienne, centrale-indienne et ouest-indienne permet de préciser la structure de la croûte océanique et de mieux comprendre les mécanismes de l'accréation. Le flancs des dorsales apparaissent en équilibre isostatique et leur rigidité en flexion varie en fonction du taux d'expansion : $50 \cdot 10^{17} \text{ N.m}$ pour un taux de 1 cm.a^{-1} et $4 \cdot 10^{17} \text{ N.m}$ pour un taux de 3 cm.a^{-1} . Les vallées axiales ne sont pas en équilibre isostatique, mais sont le siège d'un déficit de densité variant de $0,4$ à $0,8 \text{ g.cm}^{-3}$ pour un taux de 1 cm.a^{-1} et de $0,1$ à $0,3 \text{ g.cm}^{-3}$ pour un taux de 3 cm.a^{-1} . L'accréation océanique n'est pas uniforme à l'échelle d'un segment de dorsale, elle l'est pour des unités reconnues le long d'un même segment. Ces unités correspondent à l'expression superficielle de chambres magmatiques. L'accréation océanique apparaît symétrique discontinue et périodique ($1,0$ à $1,6 \text{ Ma}$ pour un taux de 1 cm.a^{-1} et $0,3$ à $0,5 \text{ Ma}$ pour un taux de 3 cm.a^{-1}); la périodicité correspond à un fonctionnement en alternance de la zone néovolcanique, qui se déplace latéralement sur le planter interne, avec les zones tectoniques actives situées de part et d'autre. L'évolution du point triple de Rodriguez n'est pas stable, l'axe de la dorsale centrale-indienne se décale par rapport à l'axe de la dorsale est-indienne à un taux de $0,14 \text{ cm.a}^{-1}$ et la longueur du segment de dorsale est-indienne contigu au point triple diminue à un taux de $0,18 \text{ cm.a}^{-1}$. les sauts périodiques (1 Ma) du point triple vers le nord-ouest reconstituent la jonction et redonnent sa longueur initiale au segment de la dorsal est-indienne. Ces sauts expliquent l'importance et la répétitivité des reliefs de la dorsale ouest-indienne au voisinage du point triple et semblent également à l'origine des décalages observés entre les segments de la dorsale centrale-indienne au voisinage du point triple.

RÉFÉRENCES

Bergh H.W. Sea-floor spreading in the southwest Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, vol. 76, 1971, pp. 6276-6282.
 Fisher R.L., J.G. Sclater, and D.P. McKenzie. Evolution of the Central Indian Ridge, Western Indian, *Ocean. Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 82, 1971, pp. 553-562.
 Heezen B.C. and M. Tharp. Physiographic diagram of the Indian Ocean (with descriptive sheet). *Geol. Soc. Amer. Ind.*, New York, 1965.
 Le Pichon X. and J.R. Heirtzler. Magnetic anomalies in the Indian Ocean and sea-floor spreading. *J. Geophys. Res.*, vol. 73, 1968, pp. 2101-2117.

Lowrie W. and W. Alvarez. One hundred million years of geomagnetic polarity history. *Geology*, vol. 9, 1981, pp. 392-397.
 Macdonald K.C. Mid-ocean Ridges : fine scale tectonic, volcanic, and hydrothermal processes within the plate boundary zone, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 10, 1982, pp. 155-190.
 McKenzie D.P. and J.G. Sclater. The evolution of the Indian Ocean since the Late Cretaceous, *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, vol. 25, 1971, pp. 437-528.

- Munschy M.** Étude géophysique détaillée du point triple de Rodriguez et de la zone axiale des trois dorsales associées (océan Indien). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 1987, 250 p.
- Patriat P.** Évolution du système de dorsales de l'océan Indien. Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1983.
- Patriat P. and V. Courtillot.** On the stability of triple junctions and its relation to episodicity in spreading. *Tectonics*, vol. 3, 1984, pp. 317-332.
- Renard V. et J.P. Allenou.** Le Sea-Beam, sondeur à multi-faisceaux du N/O "Jean Charcot", description, évaluation et premiers résultats. *Int. Hydrog. Rev.*, LVI (1), 1979, pp. 35-71.
- Royer J.Y.** Évolution cinématique détaillée de la dorsale est-indienne entre le point triple de Rodriguez et les îles Saint-Paul et Amsterdam. Thèse de Doctorat (Géophysique marine), Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 1985, 213 p.
- Royer J.Y. and R. Schlich.** The Southeast Indian Ridge between the Rodriguez Triple Junction and the Amsterdam and Saint-Paul islands detailed kinematics for the past 20 Ma. *J. Geophys. Res.*, vol. 93, 1988, pp. 13524-13550.
- Schlich R.** Structure et âge de l'océan Indien occidental. Mem. hors série, *Soc. Geol. de France*, n° 6, 1975, pp. 1-103.
- Schlich R.** The Indian Ocean : aseismic ridges, spreading centers and oceanic basins. In : *The Ocean basins and Margins*, vol. 6, the Indian, Nairn, A.E.M., and Stehli, F.G. (eds), New York Plenum Press, 1982, pp. 51-147.
- Schlich R.** Structure, âge et évolution de l'océan Indien. Implication pour les déplacements relatifs de l'Australie. Communication présentée au colloque sur les recherches françaises dans l'Antarctique, Grenoble, septembre 1984.
- Schlich R. et P. Patriat.** Profils magnétiques sur la dorsale médio-océanique «Indo-Pacifique». *Ann. de Géophys.*, vol. 23, 1967, pp. 629-633.
- Schlich R. et P. Patriat.** Anomalies magnétiques de la branche est de la dorsale médio-indienne entre les îles Amsterdam et Kerguelen. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, vol. 272, 1971a, pp. 773-776.
- Schlich R. et P. Patriat.** Mise en évidence d'anomalies magnétiques axiales sur la branche ouest ouest de la dorsale médio-indienne. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, vol. 272, 1971b, pp. 700-703.
- Schlich R., M. Munschy, J.M. Marthelot, J.Y. Royer et M. Schaming.** Les campagnes du N.O. «Jean Charcot» sur le point triple de Rodriguez (océan Indien) : premiers résultats. *Bull. Soc. Géol., France*, vol. 8, 1987, pp. 693-697.
- Schlich R., M. Munschy et M. Blanck.** Cartes bathymétriques, gravimétriques et magnétiques au 1/200.000 et 1/100.000 du point triple de Rodriguez et de la zone axiale des trois dorsales associées (océan Indien). *Institut de Physique du Globe de Strasbourg*, 1988.
- Sclater J.G. and R.L. Fisher.** Evolution of the east-central Indian Ocean with emphasis on the tectonic setting of the tectonic setting of the Ninetyeast Ridge. *Geol. Soc. Amer. Bull.* vol. 85, 1974, pp. 683-702.
- Sclater J.C., C. Bowin, R. Hey, H. Hoskins H., J. Pierce, J. Phillips and C. Tapscott.** The Bouvet Triple Junction. *J. Geophys. Res.*, vol. 81, 1976, pp. 1857-1869.
- Sclater J.G., R.L. Fisher, P. Patriat, C. Tapscott and B. Parsons.** Eocene to recent development of the Southwest Indian Ridge, a consequence of the evolution of the Indian Ocean Triple Junction. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, vol. 64, 1981, pp. 587-604.
- Tapscott C. R., P. Patriat, R.L. Fisher, J.G. Sclater, H. Hoskins and B. Parsons.** The Indian ocean Triple Junction. *J. Geophys. Res.*, vol. 85, 1980, pp. 4723-4739.
- Weissel J.F. and D.E. Hayes.** Magnetic anomalies in the Southeast Indian Ocean In : *Antarctic Oceanology II : The Australian-New Zealand Sector*, *Antarctic Ser.*, vol. 19, Hayes, D.E., ed., AGU, Washington, D.C., 1972, pp. 165-196.