

LA POSITION DE MADAGASCAR DANS LE CADRE DE L'EVOLUTION GEODYNAMIQUE ET DE L'ENVIRONNEMENT DE L'OCEAN INDIEN

François FRÖHLICH

*Laboratoire de Géologie, Muséum National d'Histoire Naturelle 43, rue de Buffon 75005 Paris,
FRANCE*

ABSTRACT.- The main events of the expansion in the Indian Ocean are now well known from the analysis of complete sequences of magnetic anomalies of the oceanic basement. Thus, on the basis of mesozoic anomalies discovered in the Mozambique and Somali basins, the initial position of Madagascar has been reconstructed: it was located between Kenya, India and the Antarctic continent, and separated from eastern Africa during the end of the Jurassic. Madagascar slid (ca. 140 M.a.) southward along the Davie Ridge transform fault by the action of a new oceanic expansion centre, a process that was completed by the lower Cretaceous (ca. 110 M.a.). The breakup between Madagascar, India and the Australo-Antarctic continental bloc occurred at the beginning of the Upper Cretaceous (ca. 83 M.a.). During the Eocene (ca. 50 M.a.), major geodynamic events took place: collision of the Indian and Eurasian continents; and the separation of Antarctica from Australia, which moved southward to an isolated, polar position. This new distribution of the continental fragments derived from Gondwanaland induced the reorganization of atmospheric and hydrologic systems, and as a consequence, that of the entire biosphere. Pelagic sediments from the Madagascar basin provide a mineralogical record of the resulting evolution of the environment.

KEY-WORDS.- Madagascar, Paleopositions, Indian Ocean, Oceanic expansion, Environmental evolution

RESUME.- Les grandes lignes de l'expansion de l'océan Indien sont à l'heure actuelle mieux comprises grâce à la mise en évidence des séquences complètes d'anomalies magnétiques du plancher océanique. On connaît ainsi la position initiale de Madagascar, placée entre Kenya, Inde et Antarctique, et son décollement du continent africain avec glissement vers le sud suivant la structure de la ride de Davie, dès la fin du Jurassique (environ -140 M.a.). La séparation d'avec l'Inde d'une part et le bloc Australo-Antarctique d'autre part remonte au Crétacé supérieur (-83 M.a.). Enfin, à l'Eocène (environ -50 M.a.), des événements géodynamiques majeurs survinrent : collision Inde-Eurasie, isolement de l'Antarctique en position polaire, qui ont induit une réorganisation totale des systèmes atmosphériques et hydrologiques, avec comme conséquence, celle de la Biosphère. Les sédiments pélagiques accumulés dans le bassin océanique de Madagascar livrent l'enregistrement minéralogique de l'évolution de l'environnement qui en a découlé.

MOTS-CLES.- Madagascar, Paléopositions, Océan Indien, Expansion océanique, Evolution environnement

INTRODUCTION

L'océan Indien trouve son origine dans la dispersion des différentes masses continentales issues du super-continent Gondwana au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque. Madagascar est l'un de ces fragments de Gondwana. La connaissance du déplacement des différentes pièces du Gondwana, de leur position à l'origine et au cours des différentes époques géologiques dépend de la reconstitution de l'histoire de l'expansion de l'océan Indien. Cette histoire peut être connue grâce à l'enregistrement du magnétisme terrestre par le basalte issu de l'action des dorsales océaniques, et constituant les couches supérieures de la croûte océanique. Chaque anomalie magnétique (inversion du champ magnétique par rapport à l'époque actuelle) étant bien datée, l'histoire complexe de l'expansion de l'océan Indien ressort de la lecture des séquences de linéations magnétiques cartographiées. La reconstitution d'un océan à une époque donnée consiste donc à calculer la position des dorsales actives, des fractures qui les segmentent et des masses continentales qui bornent les bassins océaniques créés depuis le début du fonctionnement de ces dorsales.

A l'heure actuelle, la cartographie magnétique de l'océan Indien est suffisamment précise pour permettre des reconstitutions globalement satisfaisantes. L'objectif est ici de faire ressortir les déplacements de Madagascar à partir de ce qui est connu de l'histoire de l'océan Indien, en replaçant ces mouvements dans le contexte plus général de la géodynamique de cet océan. En effet, la dernière étape de la fragmentation du Gondwana a eu des conséquences majeures sur l'environnement global, qu'une fois encore l'océan Indien a enregistré dans les séries sédimentaires qui s'y déposent.

POSITION INITIALE ET DEPLACEMENTS DE MADAGASCAR

On peut considérer que la phase exploratoire des recherches géophysiques et géologiques dans l'océan Indien s'est achevée dans les années 1980. Jusqu'à cette période, l'origine de Madagascar et ses mouvements restaient incertains en raison de l'absence de données magnétiques pour le bassin du Mozambique et le bassin des Somalies. La mise en évidence d'une séquence complète d'anomalies magnétiques mésozoïques (Fig. 1) dans le bassin du Mozambique (SEGOUFIN, 1978; SEGOUFIN & RECQ, 1980) et dans le bassin des Somalies (SEGOUFIN & PATRIAT, 1981) leva l'incertitude. Allant de l'anomalie M22 (environ -150 M.a) à l'anomalie M0 (environ -110 M.a), le plancher océanique constituant le bassin du Mozambique et le bassin des Somalies se classe alors parmi les plus anciens de l'océan Indien. Le système de dorsales dont il est issu a ainsi fonctionné dès le Jurassique supérieur (Fig. 2), dans les premiers moments de la fracturation du Gondwana, à un taux d'expansion moyen de $1,5 \text{ cm.an}^{-1}$ (SEGOUFIN, 1978). Grâce à ces séquences d'anomalies magnétiques, la position initiale de Madagascar a pu être reconstituée, confirmant l'hypothèse préalablement retenue : la grande île est un fragment de Gondwana (Fig. 5), situé à l'origine entre la côte actuelle du Kenya et l'Inde (SEGOUFIN & PATRIAT, 1981).

Les reconstitutions (Fig. 3) montrent qu'entre les époques des anomalies M22 et M0, l'expansion océanique s'est effectuée en séparant l'Afrique d'un bloc encore solidaire comprenant Madagascar, l'Inde, l'Antarctique et l'Australie (VEEVERS *et al.*; SEGOUFIN & PATRIAT, 1981; SCOTSE *et al.*, 1988). En fait, poussée par le centre d'expansion du bassin des Somalies, Madagascar a coulissé le long d'un important système de failles

transformantes actuellement matérialisé par les hauts fonds constituant la ride de Davie (Figs 1 à 3). Ce coulisement aurait donc fonctionné entre -145 M.a. et environ -110 M.a. Entre les anomalies M0 et 34 (-83 M.a.), durant la longue période de silence magnétique, le système d'expansion indien a évolué, et la fracturation du reste du Gondwana s'est poursuivie : la dorsale alimentant la formation du bassin des Somalies a cessé de fonctionner, cependant qu'un nouveau segment de dorsale s'installait plus au sud, détachant le bloc indo-malgache du bloc australo-antarctique (Fig. 4). c'est également vers l'époque de l'anomalie 34 que Madagascar s'individualisa définitivement en se détachant du bloc indien, dès lors poussé vers le nord par l'action d'une dorsale rapide.

La reconstitution des positions relatives de l'Inde, de Madagascar et de l'Antarctique entre les époques des anomalies M0 et 34 pose encore quelques problèmes, non encore totalement résolus (Fig. 4). Suivant les différents schémas proposés, Madagascar aurait été initialement située contre le nord de l'Inde (et n'aurait jamais alors été proche de l'Antarctique), ou bien au sud du continent indien, donc exactement à la jointure Inde-Antarctique-Afrique. Ce dernier schéma paraît le plus probable.

A partir de l'anomalie 34, l'activité de la nouvelle dorsale indienne aurait maintenu Madagascar dans sa position actuelle par rapport à l'Afrique, tout en comprimant les structures tectoniques de la ride de Davie, provoquant l'activité volcanique qui lui est associée (LECLAIRE *et al.*, 1989). Une connexion a-t-elle existé entre Madagascar et le continent africain au cours du Crétacé supérieur, ainsi que le propose TAQUET (1982) à partir de l'étude des faunes de reptiles? Cette connexion éventuelle aurait pu être réalisée par les hauts fonds associés à la ride de Davie. Mais rien ne permet à l'heure actuelle d'envisager l'émergence partielle de la ride de Davie avant le Paléocène, comme l'indiquent les altérations aériennes de matériel volcanique, ou encore la karstification locale du socle de la ride à cette époque (LECLAIRE *et al.*, 1989).

C'est vers l'époque de l'anomalie 27 (-60 M.a.) que le fragment de croûte continentale que constituent les Seychelles s'est détaché du continent indien, quelque 10 millions d'années avant la collision Inde-Eurasie. Ce dernier événement est probablement le plus important de l'histoire géodynamique de l'océan Indien, avec sauts de dorsales, changement de la vitesse et de la direction de l'expansion, fragmentation du dernier bloc issu du Gondwana (séparation Antarctique-Australie) par l'activité d'une nouvelle dorsale: l'actuelle dorsale sud-est indienne, responsable également de la fracturation du plateau de Kerguelen, de son émergence et de l'intense volcanisme associé (FRÖHLICH *et al.*, 1994).

LES ENREGISTREMENTS SEDIMENTAIRES DE LA REVOLUTION CLIMATIQUE NEOGENE

L'analyse minéralogique des sédiments qui se déposent au fond des bassins océaniques permet de mettre en évidence des signaux minéralogiques stratigraphiques, représentatifs de l'évolution des environnements. L'étude des séries sédimentaires pélagiques du bassin de Madagascar est de ce point de vue très significative. On a ainsi représenté sur la figure 6 la distribution des principaux silicates en fonction de l'âge des sédiments qui les contiennent. On observe un contraste entre les séries du Néogène (postérieures à -25 M.a.), riches en minéraux d'origine détritiques (minéraux hérités de l'érosion des cuirasses latéritiques de Madagascar) et celles du Paléogène (antérieures à -25 M.a.), qui n'en contiennent pas. Mais l'opposition entre les deux période est encore

plus marquée en ce qui concerne les silicates de néoformation, qui se sont développés à l'interface eau/sédiment au moment de la sédimentation, et qui sont donc représentatifs de la composition chimique des eaux qui leur ont donné naissance. Les associations minéralogiques du Paléogène sont caractérisées par l'abondance de la silice libre (opale-CT, calcédoine : niveaux silicifiés, cherts), des silicates hypersiliceux (clinoptilolite) et des argiles magnésiennes (palygorskite); celles du Néogène sont à l'opposé caractérisées par l'absence totale de silice libre, par la néoformation de silicates pauvres en silice, et de silicates ferrifères.

Ces signaux minéralogiques traduisent directement deux faits majeurs.

-1) Le socle cristallin de Madagascar a été soumis depuis au moins le Crétacé à une pédogenèse ferralitique sous couvert forestier tropical donnant lieu à une intense altération des silicates avec fixation dans les profils latéritiques du quartz résiduel et de minéraux néoformés (kaolinite, gibbsite, hydroxydes de fer...) et évacuation en solution de la silice excédentaire ainsi que des cations (Ca^{++} , Mg^{++} entre autres). Dans le bassin océanique de Madagascar, ces substances ont pu alimenter la croissance cristalline de minéraux magnésiens et de silice libre.

-2) A partir de l'Oligocène, les sols latéritiques ont commencé d'être livrés à l'érosion, par suite de l'évolution du couvert forestier : d'où le début de la décharge détritique à partir de Madagascar, ainsi que celui de la formation de silicates ferrifères sur les fonds océaniques, de même que l'arrêt des silicifications, suite à la diminution des surfaces soumises à l'hydrolyse des roches silicatées (FRÖHLICH, 1981). C'est également à partir du Miocène que l'on constate la formation des premiers nodules Fe/Mn dans le bassin de Madagascar. Cette évolution chimique tient à l'évolution de la pédogenèse, exportant alors essentiellement du fer, et retenant la silice.

Si ces phénomènes sont particulièrement bien marqués dans le bassin de Madagascar, il faut préciser qu'ils ont un caractère général, notamment en ce qui concerne l'arrêt des silicifications au Néogène (LECLAIRE, 1974; FRÖHLICH, 1981). On sait que les climats chauds et humides prévalaient au Crétacé supérieur et au Paléogène sur l'ensemble du Globe (voir Fig. 3), et jusqu'aux hautes latitudes (LECLAIRE, 1979). Le changement climatique constaté à partir de l'Oligocène, et la réponse sédimentaire associée sont directement corrélés avec les événements géodynamiques de l'océan Indien décrits plus haut (FRÖHLICH, 1981) : l'isolement de l'Antarctique en position polaire a entraîné le démarrage du courant circum-Antarctique avec comme conséquence le confinement de ce système hydrologique, son refroidissement et l'englacement de l'ensemble du continent antarctique puis, au cours du Miocène, le début de la formation de glace de mer. Le fort gradient thermique entre pôle sud et équateur aurait alors entraîné une réorganisation de l'ensemble de la circulation atmosphérique, et donc une évolution climatique générale (LECLAIRE, 1979), avec en particulier la régression des climats tropicaux humides vers l'équateur, et l'évolution subordonnée du couvert végétal. Cette évolution de l'environnement durant l'Eocène supérieur-Oligocène est particulièrement bien marquée dans la productivité planctonique de cette époque dans l'océan Indien, comme on peut le constater dans la sédimentation, avec l'interruption des dépôts d'origine planctonique (à coccolithes et foraminifères), et la généralisation des dépôts azoïques rouges (FRÖHLICH, 1982).

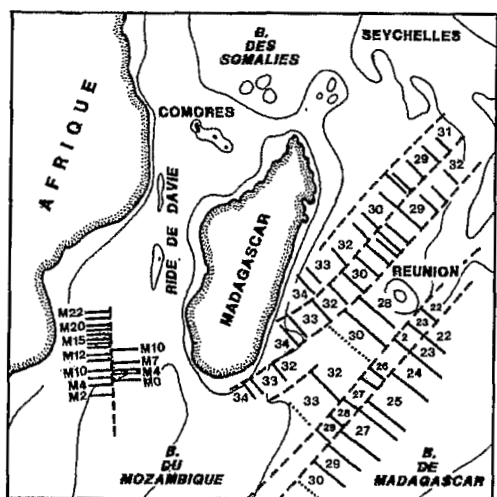


Figure 1 : Carte des linéations magnétiques dans la région de Madagascar. Reconstituée d'après SEGOUPIN (1978), SEGOUPIN et RBCQ (1980), SCHLICH (1982). Les anomalies magnétiques mésozoïques sont notées M0 (environ 110 M.a.) à M22 (environ 150 M.a.), les anomalies du Crétacé supérieur et de Cénozoïques sont notées par des numéros simples, depuis la plus ancienne (34, -83 M.a.). Les fractures décalant les linéations sont indiquées en pointillé.

Figure 2 : Reconstitution de l'expansion océanique dans la zone malgache à l'époque de l'anomalie M2 (environ -115 M.a.). La dorsale active à cette époque est figurée en traits gras, segmentés et décalés par des failles figurées en traits plus fins. La portion de croûte océanique créée entre les époques des anomalies M22 (environ -150 M.a.) et M2 est figurée en gris. La grande faille transformante de la ride de Davie est figurée par un trait épais.

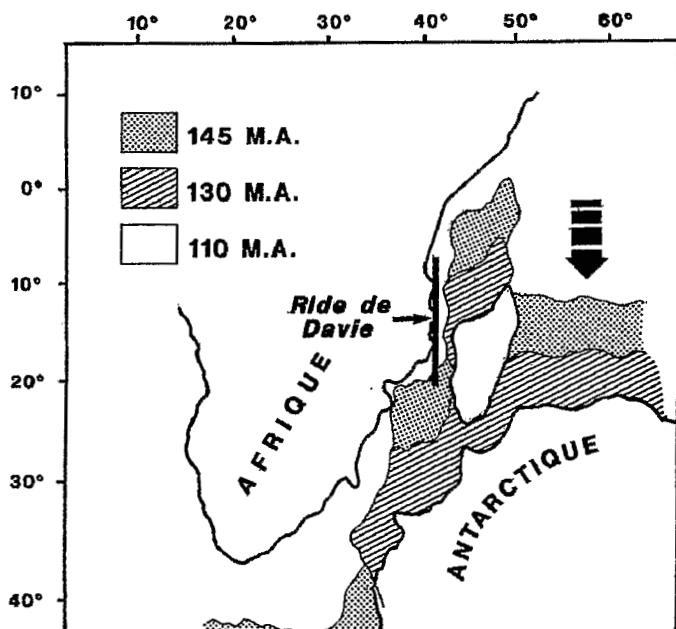
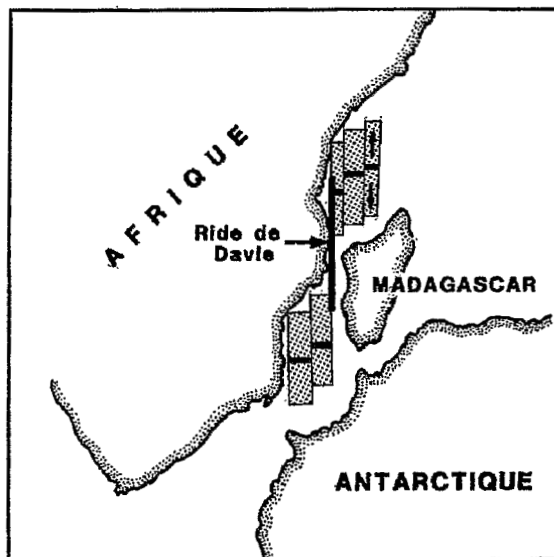


Figure 3 : Reconstitution des déplacements du bloc Antarctique/Madagascar/Inde par rapport à l'Afrique, schématiquement représentée immobile. L'Inde n'a pas été figurée en raison de l'incertitude sur sa position exacte (vraisemblablement entre Madagascar et Antarctique).

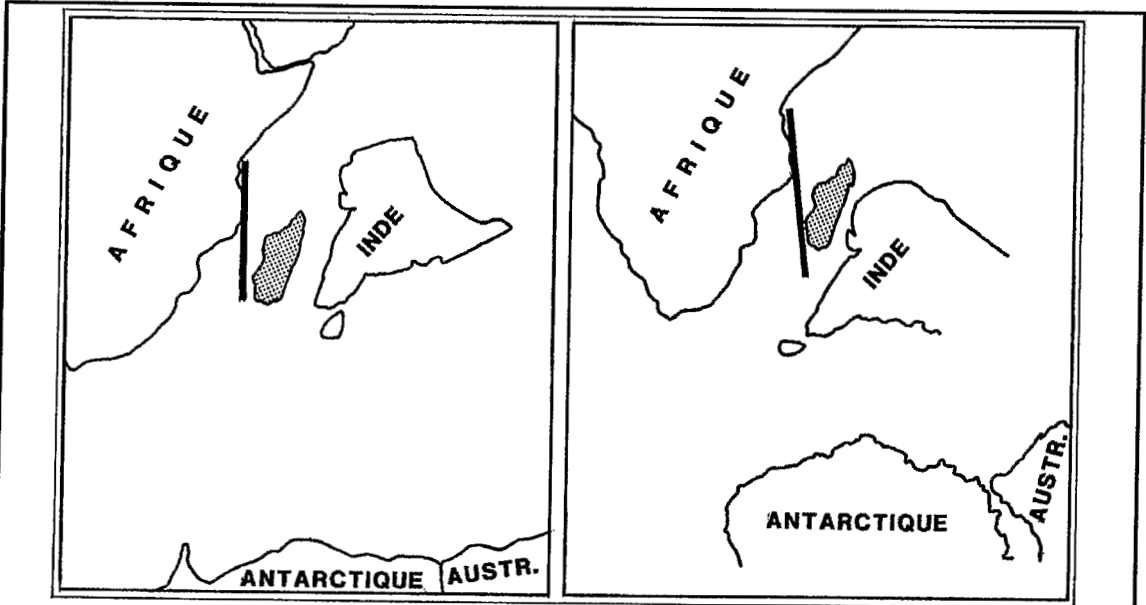


Figure 4 : Deux solutions pour la reconstruction des paléopositions respectives de Madagascar, de l'Inde et du bloc australo-antarctique vers - 85 M.a., avant l'époque de l'anomalie 34. A droite, d'après SCOTÈSE *et al.* (1980), Madagascar aurait été initialement située vers le nord de l'Inde. A gauche, d'après SEGOUFIN et PATRIAT (1981) Madagascar aurait été solidaire de la partie sud de l'Inde. C'est cette dernière solution qui paraît la plus probable.

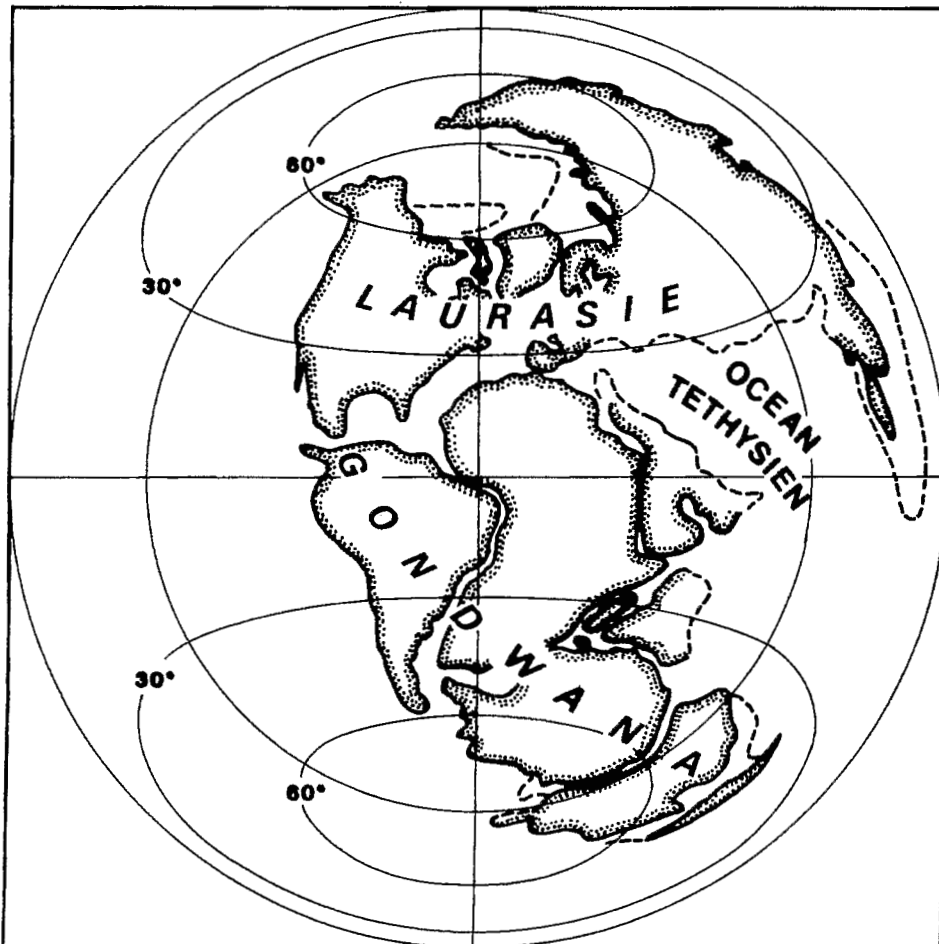
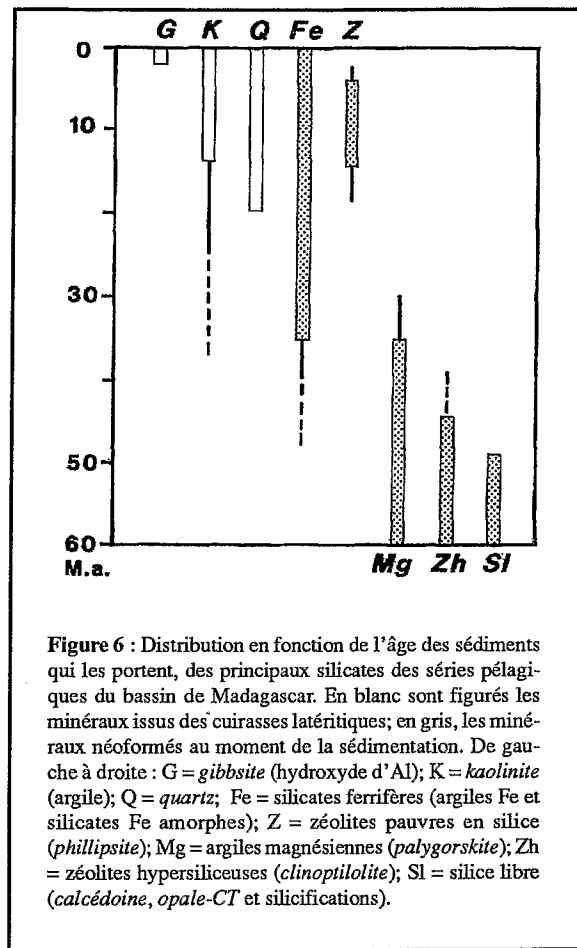


Figure 5 : Reconstitution de la répartition de la croûte continentale au Jurassique moyen, vers -160 M.a.. Le bloc continental quasi-unique barrait le Globe du pôle sud au pôle nord. Cette disposition, dirigeant les circulations océaniques de l'équateur vers les hautes latitudes, rend compte de la prévalence mondiale des climats tropicaux au Mésozoïque. D'après LECLAIRE, 1979.



CONCLUSION

Au problème posé par la position originelle de Madagascar et ses déplacements, les données géophysiques apportent des réponses globalement satisfaisantes. La mise en évidence d'un plancher océanique d'âge jurassique dans les bassins des Somalies et du Mozambique ne peut laisser planer aucun doute : la Grande Ile s'est détachée de la côte est du Kenya à la fin du Jurassique, solidairement avec l'Inde et l'Antarctique, dans les premiers temps de l'ouverture de l'océan Indien. Son individualisation remonte au Crétacé supérieur, vers -83 millions d'années, par sa séparation d'avec l'Inde. Le trait caractéristique du mouvement de Madagascar vers le sud, entre la fin du Jurassique et le Crétacé basal, est son coulisement le long d'une grande fracture transformante qui est à l'heure actuelle matérialisée par une série de hauts fonds figurant la ride de Davie.

La nouvelle répartition des masses continentales a conditionné l'évolution climatique du Globe. La lecture minéralogique des enregistrements sédimentaires dans le bassin de Madagascar fait ressortir l'évolution profonde de son environnement dès le Néogène, avec en particulier la consolidation des profils d'altération tropicaux

(latéritisation) et leur érosion, événement soulignant un changement des principaux paramètres conditionnant l'altération des roches du socle cristallin malgache : climat et couvert végétal. L'absence de dépôt biogènes à la fin du Paléogène, et donc la grande perturbation apportée à la productivité dans les océans n'est pas sans poser de questions : la répartition des masses continentales est-elle, dès la fin de l'Eocène, seule responsable de la crise biologique des océans? L'hypothèse d'un événement météoritique d'une ampleur comparable à celui envisagé pour la limite Crétacé-Tertiaire est à présent prise en considération, et constitue une nouvelle voie de recherche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FRÖHLICH, F., 1981. Les silicates dans l'environnement pélagique de l'océan Indien au Cénozoïque. *Mém. Mus. Nat. Hist. Nat.*, 46, Paris, 206p.
- FRÖHLICH, F., 1982. Evolution minéralogique dans les dépôts azoïques rouges de l'océan Indien. Relations avec la stratigraphie. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), 24: 563-571
- FRÖHLICH, F., J.-P. GELY, E. A. PERSEIL, E. WICQUART & O. VERDIER, 1994. Sédimentation, géodynamique et minéralisations sur le Plateau de Kerguelen-Heard. *In*: R. Schlich & A. Giret (éds.), *Géologie, Géochimie et Géophysique des Kerguelen*. pp 81-90. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, n.s., 166. Paris.
- LECLAIRE, L., 1974. Hypothèses sur l'origine des silicifications dans les grands bassins océaniques. Le rôle des climats hydrolisants. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), 16 : 214-224.
- LECLAIRE, L., 1979. L'océan Indien : une introduction à sa paléocéanographie. *Cah. de l'Indo-Pacifique*, 1, 3 : 249-296.
- LECLAIRE, L., Y. BASSIAS, M. CLOCCHIATTI & J. SEGOUFIN, 1989. La Ride de Davie dans le Canal de Mozambique : approche stratigraphique et géodynamique. *C.R. Acad. Sci.*, 308, II : 1077-1082.
- SCOTese, C.R., L.M. GAHAGAN & L.R. LARSON, 1988. Plate tectonic reconstruction of the Cretaceous and Cenozoic ocean basins. *Tectonophysics*, 155 : 27-48.
- SCHLICH, R., 1982. The Indian Ocean : aseismic ridges, spreading centers, and oceanic basins. *In* : A.E.M. Nairn & G. Stehli (eds.), *The ocean basins and margins*, 6, *The Indian Ocean*. pp 51-147. Plenum Press. New-York and London.
- SEGOUFIN, J., 1978. Anomalies magnétiques mésozoïques dans le bassin de Mozambique. *C.R. Acad. Sci.*, 287, (D) : 109-112.
- SEGOUFIN, J. & M. RECQ, 1980. La transition entre le canal de Mozambique et le bassin de Mozambique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), 22 : 469-479.
- SEGOUFIN, J. & P. PATRIAT, 1981. Reconstructions de l'océan Indien occidental pour les époques des anomalies M21, M2 et 34. Paléopositions de Madagascar. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), 23 : 603-607.
- TAQUET, Ph., 1982. Une connexion continentale entre Afrique et Madagascar au Crétacé supérieur: données géologiques et paléontologiques. *Geobios, mém. spécial* 6, pp 386-391. Lyon.
- VEEVERS, J.J., C. Mc A. POWELL & B.D. JOHNSON, 1980. Seafloor constraints on the reconstruction of Gondwanaland. *Earth Plan. Sc. Let.*, 51 : 435-444.