

**Entre l'Arabie et la Somalie,  
une mer s'ouvre depuis  
30 millions d'années.**

**Sa brève histoire géologique  
révèle les phénomènes  
marquants du début  
d'une expansion océanique.**

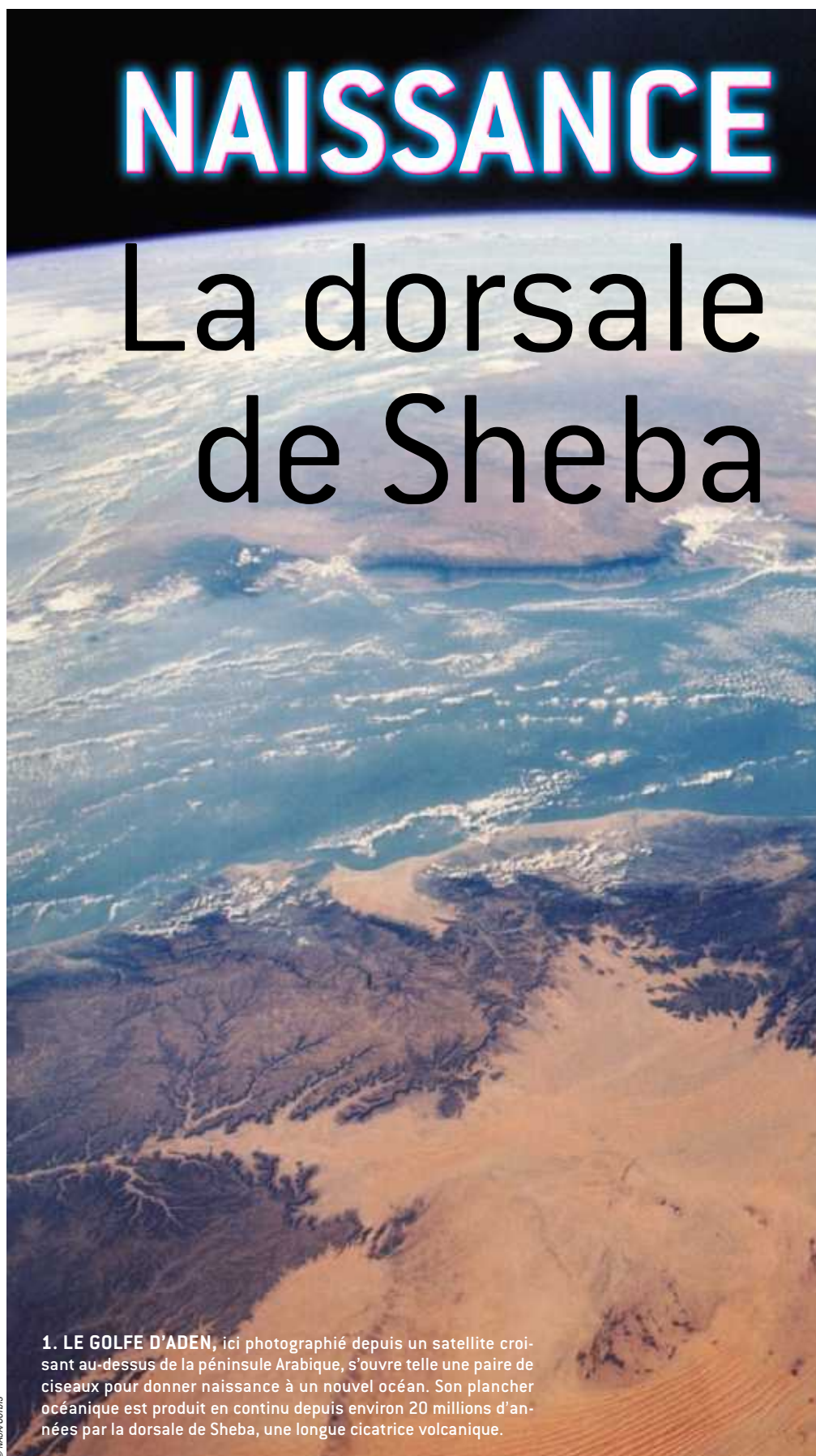
**Marc Fournier  
et Nicolas Chamot-Rooke**

**T**out au Sud de la péninsule Arabique, il est une dorsale océanique qui, chez les géologues, a rang de reine : la dorsale de Saba ou plutôt, en arabe, de Sheba. Cette cicatrice montagneuse au fond du golfe d'Aden est un trésor géologique, car elle témoigne de façon unique des premiers stades de l'ouverture d'un océan. Nous verrons que cette chaîne volcanique sous-marine est née parce que l'Afrique se déchirait. Puis, qu'une fois apparue, elle s'est très vite propagée vers le point chaud des Afars, au Nord de l'Éthiopie, qui l'a attirée.

La Terre est couverte de cicatrices qui délimitent les plaques tectoniques dont est formée l'écorce terrestre. Lorsqu'elles convergent, ces plaques s'affrontent en formant des chaînes de montagnes ou se chevauchent dans les grandes fosses sous-marines. Lorsqu'elles s'écartent l'une de l'autre, naissent les dorsales qui, comme leur nom l'indique, forment la « colonne vertébrale » des océans.

La dorsale de Sheba ne fait pas exception : elle est la colonne vertébrale du jeune océan qui s'ouvre dans le golfe d'Aden. Comme chaque fois qu'un océan naît, l'ouverture de ce golfe s'est produite en deux étapes géologiques fondamentales : l'étiement du continent (ici l'Afrique), nommé rifting par les géologues, puis l'apparition de la dorsale.

Le développement de la dorsale de Sheba est lié à la séparation de la plaque arabe ; une séparation qui s'est déroulée



**1. LE GOLFE D'ADEN**, ici photographié depuis un satellite croisant au-dessus de la péninsule Arabique, s'ouvre telle une paire de ciseaux pour donner naissance à un nouvel océan. Son plancher océanique est produit en continu depuis environ 20 millions d'années par la dorsale de Sheba, une longue cicatrice volcanique.

© NASA/Cornis

# D'UN OCÉAN



## L'ESSENTIEL

- ✓ La dorsale de Sheba produit le plancher d'un tout jeune océan qui s'ouvre dans le golfe d'Aden, au Sud de la péninsule Arabique.
- ✓ Elle résulte d'une rotation de la plaque arabe, la croûte africaine ayant été affaiblie puis fracturée par la remontée d'un panache de matière chaude, sous les Afars.
- ✓ Vieille de quelque 20 millions d'années, cette dorsale s'est propagée sur 1 400 kilomètres en quatre millions d'années seulement, en direction du point chaud des Afars.

dans le cadre de la fermeture d'un océan aujourd'hui disparu, la Téthys. Durant quelque 200 millions d'années, le plancher de cet océan qui séparait l'Afrique de l'Eurasie a plongé sous l'Eurasie, le dernier témoin actuel de cette subduction se trouvant au Makran (voir la figure 2).

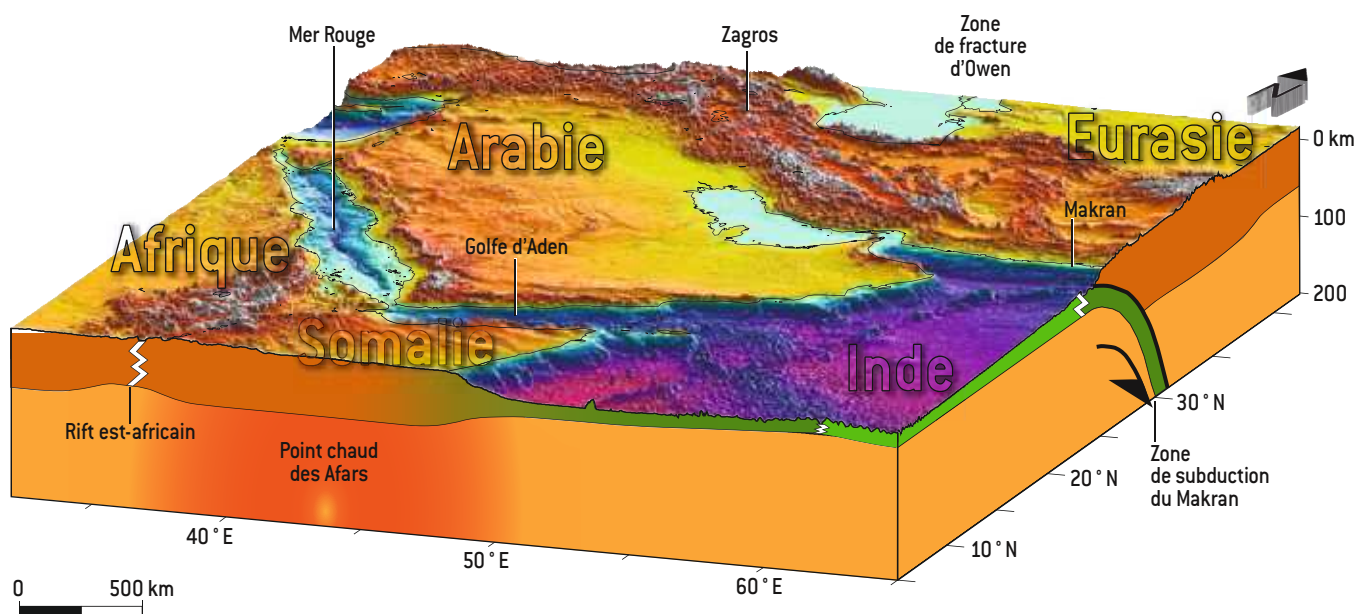
Le poids du panneau plongeant en subduction exerçait une traction sur la plaque africaine. L'Afrique était donc sous tension quand un puissant panache de matière chaude est remonté depuis les profondeurs du manteau (l'enveloppe terrestre sous-jacente à la croûte) pour s'établir sous l'écorce terrestre dans la région des Afars (voir la figure 3). Ce point chaud a affaibli la plaque africaine et a favorisé sa fragmentation.

## L'Afrique déchirée

Il y a 30 millions d'années, un morceau d'Afrique a ainsi été déchiré et entraîné vers le Nord-Est : la plaque arabe. Dans son sillage, la mer Rouge (entre Égypte et Arabie) et le golfe d'Aden (entre Arabie et Somalie) se sont ouverts. La déchirure s'est effectuée en une dizaine de millions d'années, le temps pour le continent africain de s'étirer et de s'amincir dans les rifts du golfe d'Aden et de la mer Rouge (aujourd'hui, un processus du même type est à l'origine du rift est-africain, qui sépare sur plus de 6000 kilomètres l'Afrique de l'Est du reste du continent, et devrait conduire à terme à la séparation de la plaque somalienne, c'est-à-dire de la corne de l'Afrique). À la fin du rifting, le continent africain s'est totalement déchiré et une dorsale s'est mise en place dans le golfe d'Aden, puis dans la mer Rouge.

Ainsi, depuis 20 millions d'années, un nouvel océan s'ouvre entre l'Afrique et l'Arabie. La mesure par géolocalisation GPS des mouvements des plaques montre que l'Afrique est presque immobile par rapport à l'Eurasie, tandis que l'Arabie s'écarte de l'Afrique de deux centimètres par an, et se rapproche de l'Eurasie à la même vitesse. Le nouvel océan s'élargit donc de 20 kilomètres par million d'années.

Pour décrire ces mouvements, le tectonicien utilise une version du théorème du point fixe énoncé par le mathématicien suisse Leonhard Euler (1707-1783) : tout déplacement d'une sphère rigide autour de son centre laisse un point fixe. Il s'agit en réalité d'un diamètre fixe, qui représente l'axe autour duquel la sphère a tourné sur elle-même. Transposé à la tectonique



## 2. LA PLAQUE TECTONIQUE ARABE

se déplace vers la plaque eurasiennne. Ce mouvement produit à la fois une collision et une subduction : la plaque arabe s'écrase contre la plaque eurasiennne au niveau du massif du Zagros, et plonge sous elle au niveau du Makran. L'écartement progressif entre la plaque arabe et l'Afrique a provoqué l'ouverture du golfe d'Aden et de la mer Rouge, qui se rejoignent à l'aplomb du point chaud des Afars. La plaque indienne coulisse le long de la plaque arabe au niveau de la zone de fracture d'Owen. Dans le même temps, se produit un phénomène comparable à la séparation de la plaque arabe de l'Afrique, il y a 30 millions d'années : le rift est-africain, qui amorce actuellement la séparation de la plaque somalienne.

des plaques, ce théorème implique que l'on peut décrire le mouvement d'une plaque à la surface de la sphère terrestre, si l'on assimile cette plaque à une portion de sphère, par une rotation autour d'un axe passant par le centre de la Terre. L'axe de rotation coupe la surface terrestre en deux points, nommés pôles de rotation, qui servent à décrire le mouvement des plaques les unes par rapport aux autres.

## Déterminer les pôles de rotation

Pour déterminer les pôles de rotation, on ajuste au mieux des structures qui étaient autrefois confondues, par exemple les lignes côtières des continents de part et d'autre d'un océan. C'est ce que fit l'Allemand Alfred Wegener (1880-1931) avec les lignes de côtes de l'océan Atlantique pour étayer sa théorie de la dérive des continents.

La méthode la plus efficace consiste cependant à superposer des isochrones, c'est-à-dire des lignes de même âge situées de part et d'autre d'une dorsale. Nous avons dressé la carte des isochrones du golfe d'Aden en suivant la méthode mise au point en 1963 par Frederick Vine et Drummond Matthews sur la dorsale de Carlsberg, au Nord-Ouest de l'océan Indien. Les mesures ayant montré que l'aimantation des roches du fond océanique varie quand on s'éloigne perpendiculairement de la dorsale, ces géophysiciens britanniques ont émis l'hypothèse que le plancher océanique se forme par remontée de magma le long de l'axe de la dorsale.

Le processus proposé est plus précisément le suivant. Du magma émerge de la dorsale, refroidit, se solidifie et enregistre alors, *via* son aimantation, la polarité du champ magnétique terrestre. Ce magma est ensuite poussé de part et d'autre de la dorsale quand du nouveau magma arrive. Or la polarité du champ magnétique terrestre bascule de façon irrégulière, le pôle Nord magnétique devenant le pôle Sud, et inversement (en moyenne tous les 250 000 ans). Ainsi, un peu comme sur une bande magnétique, les inversions successives du champ terrestre s'enregistrent sous la forme d'« anomalies magnétiques » sur les deux « tapis roulants » qui déplacent la matière en l'écartant de la dorsale.

Les géologues ayant pu établir une chronologie des inversions magnétiques, la mesure de l'aimantation des roches, à l'aide d'un magnétomètre tracté derrière un navire océanographique, permet de dater avec précision le plancher océanique et ses transformations. Cette méthode est devenue la pierre angulaire de la tectonique des plaques.

Afin de dresser la carte complète des anomalies magnétiques du golfe d'Aden, nous avons compilé tous les profils magnétiques existants et effectué des campagnes océanographiques dans les zones inexplorées. Réalisée en 2006 dans la partie orientale du golfe d'Aden, notre dernière campagne sur le navire *Beautemps-Beaupré* du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) a révélé les tout premiers stades de l'ouverture du golfe

## LES AUTEURS



Marc FOURNIER est maître de conférences à l'Institut des sciences de la Terre de Paris (iSTeP) à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris). Nicolas CHAMOT-ROOKE est chercheur CNRS au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure (Paris).

d'Aden. Les anomalies magnétiques identifiées sur chaque profil ont été reportées sur une carte qui synthétise l'histoire de la dorsale de Sheba (voir la figure 4).

Première constatation : le plancher océanique se forme en continu dans la totalité du golfe d'Aden depuis 16 millions d'années. Ensuite, la carte des isochrones (chacune correspondant à une anomalie magnétique) révèle la pénétration progressive de la dorsale de Sheba dans le continent africain.

Cette propagation s'est effectuée en trois étapes. Tout d'abord, la dorsale est née à l'extrémité orientale du golfe d'Aden sur une portion de 200 kilomètres de long, il y a 20 millions d'années, peu de temps avant que ne soit enregistrée l'anomalie 6, la plus ancienne identifiée.

## Une propagation rapide

Ce premier tronçon s'est prolongé par une deuxième portion de dorsale un peu avant 17,5 millions d'années. Longue de 500 kilomètres, elle s'étend jusqu'à la faille transformante d'Alula-Fartak. Les failles transformantes sont fréquentes le long de l'axe des dorsales que, comme leur nom l'indique, elles segmentent et décalent. Ainsi, le mouvement des plaques tectoniques le long de ces failles est purement coulissant.

La faille transformante d'Alula-Fartak coupe le golfe d'Aden en deux parties.

La propagation de la dorsale semble s'être arrêtée environ un million d'années à son niveau, avant de reprendre par la mise en place d'une troisième portion de dorsale de 700 kilomètres de long dans le golfe d'Aden occidental, il y a environ 16 millions d'années.

Ainsi, l'essentiel de la propagation de la dorsale, soit sur 1 400 kilomètres, s'est déroulé en moins de quatre millions d'années seulement ! Cela implique une vitesse moyenne de propagation de 35 centimètres par an, et cette vitesse a même dépassé 45 centimètres par an dans la partie occidentale du golfe. Cette propagation plus de dix fois plus rapide que la vitesse d'expansion océanique de la dorsale (deux centimètres par an) apparaît extrême à l'échelle géologique : la naissance de la dorsale de Sheba fut très brève.

Les isochrones nous fournissent le moyen de déterminer les pôles de rotation, c'est-à-dire les mouvements relatifs successifs des plaques arabe et somalienne. Pour ce faire, il faut rechercher le pôle de rotation à partir duquel il est possible de faire coïncider au mieux les isochrones de même âge situées de part et d'autre de la dorsale.

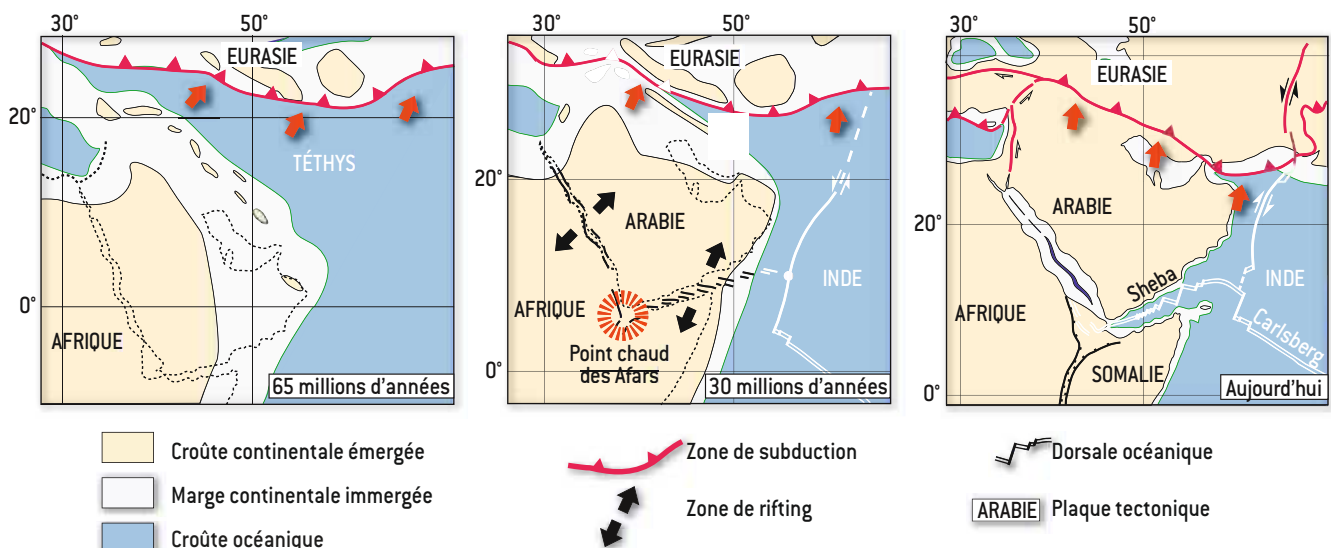
La carte des isochrones conduit à deux constatations. Premièrement, l'écartement des isochrones de même âge de part et d'autre de la dorsale augmente progressivement d'Ouest en Est, ce qui implique

que les pôles de rotation des couples successifs d'isochrones sont situés à l'Ouest du golfe d'Aden. Deuxièmement, l'orientation des failles transformantes est oblique par rapport au golfe d'Aden. Comme leur mouvement est purement coulissant, elles doivent être situées sur des cercles centrés sur le pôle de rotation, ce qui implique que les pôles soient situés au Nord-Ouest du golfe d'Aden.

Les sept pôles de rotation calculés, correspondant aux sept paires d'isochrones identifiées, sont effectivement regroupés au Nord-Ouest du golfe d'Aden (voir la figure 5). Les résultats montrent que la position du pôle d'ouverture n'a quasiment pas varié durant la propagation de la dorsale de Sheba. La formation de cette dorsale serait donc due pour l'essentiel à la rotation des plaques arabe et somalienne autour d'un pôle quasi stationnaire situé à proximité.

Outre sa fonction de datation, le principal intérêt de la cartographie des anomalies magnétiques océaniques est qu'elle permet de reconstituer la géométrie du bassin océanique au cours de l'ouverture. Le golfe d'Aden peut ainsi être reconstruit à l'époque de chaque anomalie magnétique, et l'on peut préciser la mise en place de chaque portion de la dorsale.

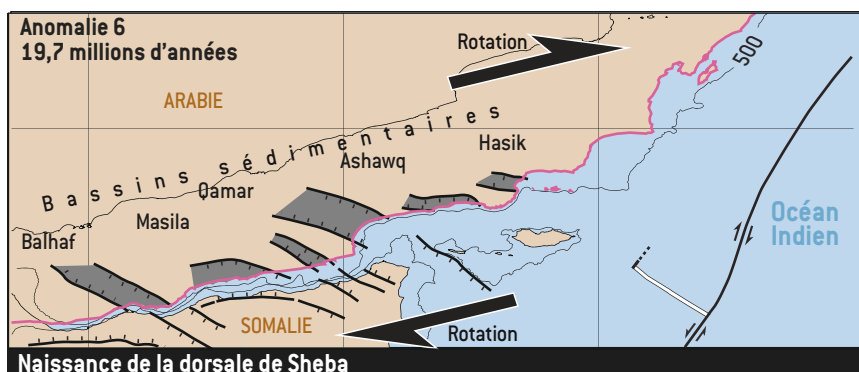
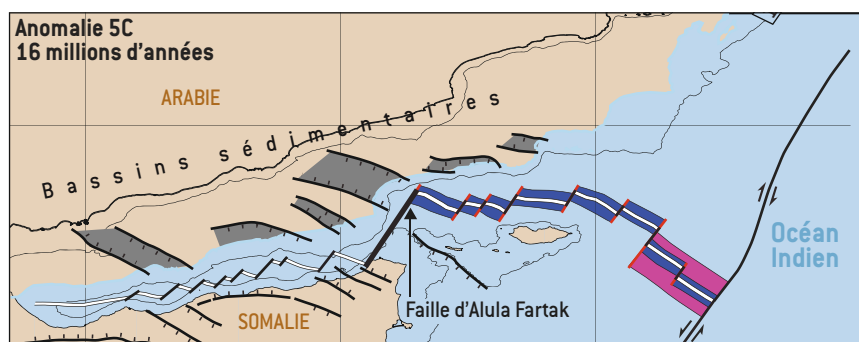
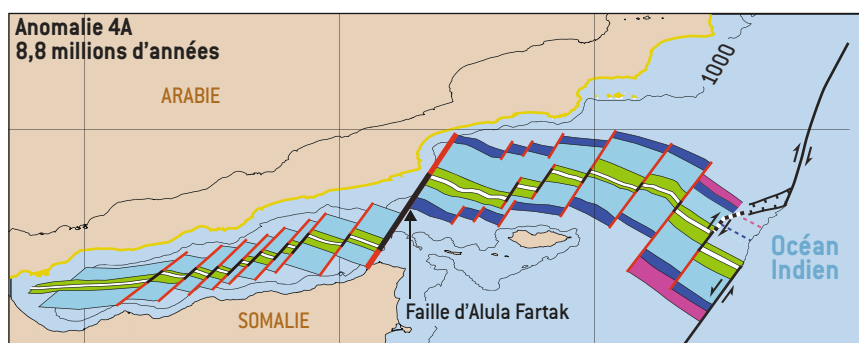
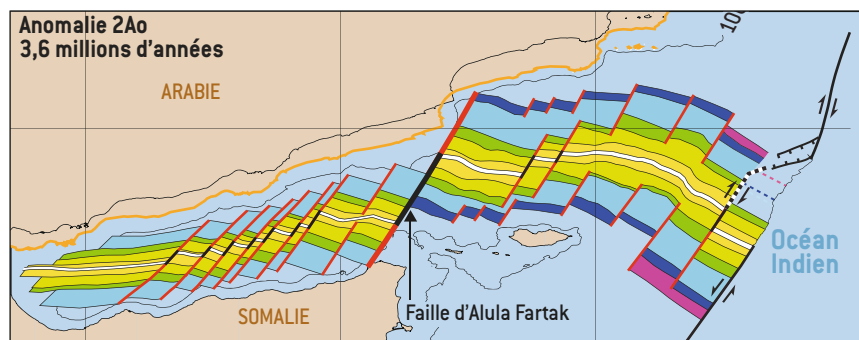
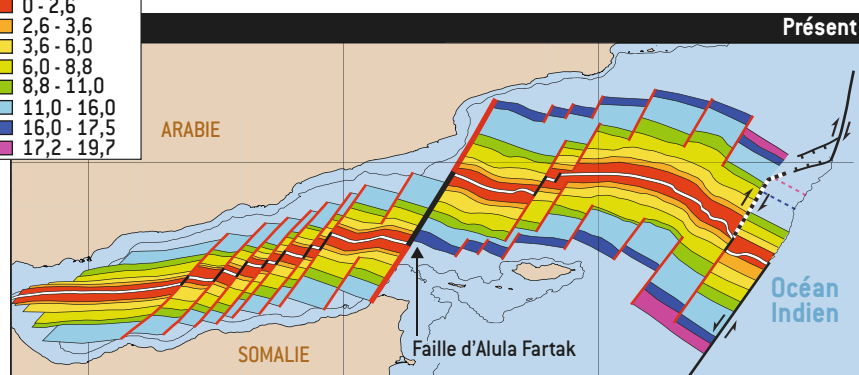
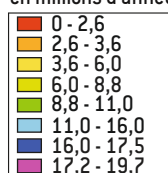
L'expansion océanique a débuté il y a 20 millions d'années dans le golfe d'Aden après la formation d'un rift entre 30 et



**3. LA SÉPARATION DE LA PLAQUE ARABE** s'est faite en trois étapes dans le cadre de la fermeture de l'océan Téthys. Il y a 65 millions d'années, le plancher de la Téthys commence à plonger, sur sa bordure Nord, sous l'Eurasie. Il y a 30 millions d'années, l'émergence du point chaud des Afars, associée à d'importants épanchements volcaniques en Éthiopie et au Yémen, marque le début de la fragmentation de la plaque africaine par

la formation des rifts de la mer Rouge et du golfe d'Aden. L'Arabie est tirée vers le Nord-Est par le panneau qui plonge sous l'Eurasie. Dans la dernière étape, en cours, un nouvel océan s'ouvre entre la plaque arabe et l'Afrique dans le golfe d'Aden et la mer Rouge, ce qui a fait naître la dorsale de Sheba. Cette dorsale a commencé à se propager vers l'Ouest dans le golfe d'Aden, en direction du point chaud des Afars, il y a 20 millions d'années.

Âge du plancher océanique  
en millions d'années



20 millions d'années. Quand on referme le golfe d'Aden et que l'on reconstitue sa géométrie à la fin du rifting, on déduit de la géologie des terrains entourant le golfe que l'extension continentale a provoqué la formation de bassins sédimentaires (nommés aussi graben en géologie) disposés en escalier le long du golfe d'Aden. Cette disposition dite en échelon des bassins est l'indice d'une ouverture oblique du golfe d'Aden durant le rifting, l'Arabie couissant vers l'Est par rapport à la Somalie (voir la figure 3).

Les reconstitutions des premiers stades de l'ouverture montrent aussi que chaque portion de dorsale s'est mise en place dans un contexte différent. La première portion de dorsale, la plus orientale, s'est installée dans le plancher océanique de l'océan Indien, à la bordure orientale du continent africain. La limite Ouest de cette portion de dorsale correspond à peu près à l'ancienne transition continent-océan est-africaine.

La seconde portion de dorsale (la portion centrale) s'est mise en place jusqu'à la faille transformante d'Alula-Fartak en suivant l'axe des bassins formés pendant la déchirure continentale, c'est-à-dire là où les tensions dues à la rotation relative des plaques avaient le plus aminci l'écorce terrestre. Au-delà de la transformante d'Alula-Fartak, la dorsale s'est dirigée vers le point chaud des Afars en recoupant à l'emporte-pièce les bassins préexistants. Ainsi, le point chaud a exercé une sorte d'attraction sur la dorsale, qui s'est propagée directement vers lui en empruntant le plus court chemin.

Si nous pouvions observer en accéléré depuis l'espace l'histoire de la dorsale de Sheba, comment la résumerions-nous ? Nous dirions que, née dans une mer qui est aujourd'hui le golfe d'Aden oriental, la dorsale de Sheba s'est propagée à la vitesse d'une fracture d'échelle continentale en direction du point chaud des

**4. L'OUVERTURE DU GOLFE D'ADEN** est ici retracée à l'époque de plusieurs anomalies magnétiques, choisies pour illustrer la propagation vers l'Ouest de la dorsale de Sheba. Le premier stade correspond à la mise en place de la dorsale de Sheba dans le golfe d'Aden dans un ancien plancher océanique (anomalie 6), et le dernier à la dorsale actuelle (présent). La géométrie de l'axe de la dorsale a beaucoup évolué, le principal changement ayant eu lieu dans la partie orientale du golfe d'Aden entre 8,8 et 3,6 millions d'années.

Afars. Vu en accéléré, le mouvement de la plaque arabe ressemblerait à une rotation autour d'un pôle stationnaire. Ce n'est pas la propagation de la dorsale qui déclenche la rotation, mais l'inverse : l'ouverture en ciseaux du golfe d'Aden provoque la progression de la dorsale. La propagation de la dorsale de Sheba a donc été passive ; loin d'être un phénomène moteur, elle apparaît plutôt comme une compensation de la rotation des plaques.

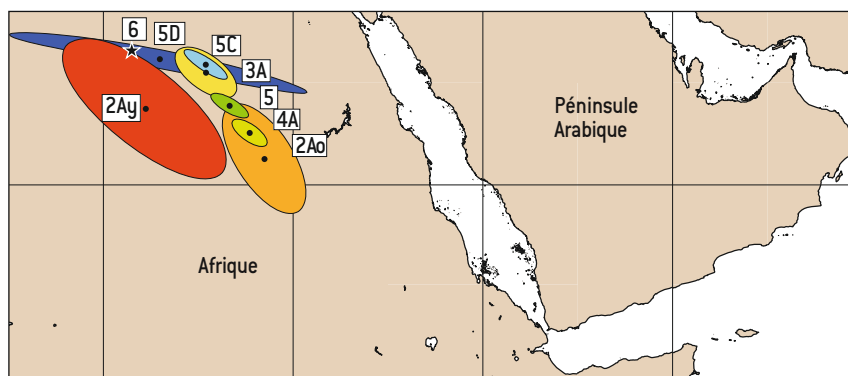
Notons qu'à ce modèle de propagation passive s'oppose en géologie un modèle de propagation active, qui ferait de la dorsale l'équivalent d'un brise-glace ouvrant son chemin dans le continent. La cinématique d'une telle propagation serait décrite par une rotation autour d'un pôle qui migrerait face à la pointe de la dorsale, et non pas autour d'un pôle stationnaire éloigné. Ces deux modèles ont été proposés au début des années 1980, mais ils n'ont pu être testés sur des dorsales faute de données précises sur la cinématique de la propagation. Notre étude de la dorsale de Sheba montre clairement que c'est la fragmentation continentale qui entraîne la naissance et la propagation des dorsales, et non l'inverse.

## Propagation guidée par point chaud

Il est exceptionnel de pouvoir mesurer avec précision la vitesse de propagation des dorsales. En effet, les données magnétiques en bordure des grands océans, comme les océans Atlantique ou Indien (l'océan Pacifique est bordé de fosses de subduction), ne sont généralement pas assez denses. Ce type d'étude a pu être mené sur des bassins marginaux du Pacifique Ouest, qui sont de jeunes bassins océaniques formés au-dessus d'une zone de subduction, c'est-à-dire dans un cadre géodynamique totalement différent du golfe d'Aden. Dans ces bassins – les bassins de Woodlark, de Lau et de Shikoku –, les vitesses de propagation des dorsales sont aussi très élevées (respectivement 14, 11 et 27 centimètres par an).

Ces cas et celui de la dorsale de Sheba suggèrent que la propagation rapide des dorsales est la règle. Leur formation résulte de « crises tectoniques » qui font qu'en quelques millions d'années, le visage de la Terre est profondément modifié.

Notre étude dégage trois caractéristiques majeures de la propagation des dor-



sales océaniques : elle résulte de la rotation rigide des plaques tectoniques qui s'écartent ; elle est très rapide ; elle est guidée par un point chaud. Ainsi, la propagation d'une dorsale est guidée en premier lieu par les points chauds et dans une moindre mesure par les zones de faiblesse de l'écorce terrestre, au niveau desquelles se localisent les failles transformantes. Les grandes failles transformantes, qui restent très stables dans le temps, conservent la géométrie initiale de la dorsale quand les plaques s'éloignent. C'est ainsi que la plus longue dorsale du monde, la dorsale médio-Atlantique, suit encore la forme de l'Afrique et de l'Amérique du Sud, et qu'elle est jalonnée par des points chauds qui ont guidé sa mise en place : les points chauds d'Islande, des Açores et de Tristan, du Nord au Sud.

L'histoire géologique de la Terre est rythmée par des cycles de fragmentation et d'accollage de continents, similaires au processus que nous venons d'analyser. Le moteur de la tectonique des plaques est la convection, qui évacue la chaleur interne de la Terre. Sa manifestation la plus spectaculaire, la remontée des panaches de points chauds, accélère et contrôle la fragmentation des continents. Ce fut le cas lorsque la Pangée, le supercontinent qui rassemblait la quasi-totalité des terres émergées il y a 250 millions d'années, s'est scindée. Tel un couvercle thermique, ce supercontinent empêchait la chaleur interne du globe de s'évacuer, jusqu'à ce qu'il se fragmente et qu'un nouveau système de dorsales se mette en place. Il est probable qu'au gré de leur dérive, les continents actuels finiront par s'accoler pour former un nouveau supercontinent. Une fois formé le successeur de la Pangée, un nouveau cycle commencera, marqué par de nombreux événements comparables en tout point à la naissance du golfe d'Aden...

## 5. LES PÔLES DE ROTATION

correspondant au mouvement Arabie-Somalie sont représentés ici avec leurs ellipses d'erreur (hormis le pôle de l'anomalie magnétique 6, qui est représenté par une étoile). Les positions successives des pôles de rotation ont été calculées à partir des anomalies magnétiques du plancher océanique du golfe d'Aden. Depuis l'anomalie 6 (19,7 millions d'années), les pôles de rotation ont migré vers le Sud-Ouest, en direction du golfe d'Aden, à l'exception du pôle de l'anomalie 2Ay (2,6 millions d'années) qui est à l'écart des autres pôles.

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Fournier *et al.*, Arabia-Somalia plate kinematics, evolution of the Aden-Owen-Carlsberg triple junction, and opening of the Gulf of Aden, *J. Geophys. Res.*, à paraître, 2010.

M. Fournier *et al.*, Do ridge-ridge fault triple junctions exist on Earth ? Evidence from the Aden-Owen-Carlsberg junction in the NW Indian Ocean, *Basin research*, vol. 20, pp. 575-590, 2008.

V. Courtillot *et al.*, On causal links between flood basalts and continental breakup, *Earth Planet Sci. Lett.*, vol. 166, pp. 291-294, 1999.

F. J. Vine et D. H. Matthews, Magnetic anomalies over ocean ridges, *Nature*, vol. 199, pp. 947-949, 1963.