

LA DORSALE MEDIO-ATLANTIQUE ET LE RENOUVELLEMENT DES FONDS OCÉANIQUES

par G. PAUTOT *

RESUME. — Un clivage important existe entre les travaux océanographiques à base géophysique et les travaux géologiques de terrain à base essentiellement naturaliste. Si l'on veut accéder à une compréhension générale de l'histoire de la terre, il nous faut tenir compte de toutes les données des domaines terrestre et océanique. L'objet de ce court travail est d'attirer l'attention des géologues sur les connaissances acquises dans le domaine océanique.

A partir de l'exemple de la dorsale médio-atlantique (étudiée par des méthodes géophysiques et géologiques), sont présentées les théories du renouvellement des fonds océaniques et de la tectonique des plaques. A la lumière de ces théories nous proposons un modèle pour la formation de l'Atlantique. La formation de l'Atlantique est évidemment en relation avec des phénomènes de compression, de distension, de cisaillement qui ont grandement affecté le domaine continental. Le rôle du géologue est de tester et d'éprouver dans le domaine de ses recherches les implications des mouvements océaniques à partir des modèles que les géophysiciens proposent; le géologue marin et le géologue terrestre ne peuvent plus aujourd'hui s'ignorer, et la seule ambition de ce texte est de montrer au géologue l'intérêt des recherches océanographiques pour établir un dialogue et une étroite collaboration. —

ABSTRACT. — There is an important gap between marine studies based upon geophysics and field geology, which fundamentally remains at a descriptive level. If we want to reach a general understanding of the earth history, we must consider all the informations from land and oceanic areas. This short paper is an attempt to draw the attention of geologists upon the data acquired in oceanic areas.

From the example of the mid-ocean atlantic ridge (studied through geophysical and geological methods), the theories of sea floor spreading and plate tectonics are exposed. Considering these theories, a model for the origin of the Atlantic ocean can be established. Obviously, the atlantic origin depends on compression, distension and shear strength phenomena, that have had an important effect on continental area. The geologist task consists of testing and trying the oceanic movement implications from the models of geophysics, in the field of this researches. Today marine and land geologists cannot work separately, and the only purpose of the present paper is to point out the interest of oceanographic researches, as a basis of exchange and close collaboration, to the geologist. —

INTRODUCTION

La révolution qui affecte actuellement le domaine de la connaissance des océans est l'événement le plus important des sciences de la terre depuis un siècle. Durant les dernières décennies les géologues terrestres ont amassé des données locales détaillées et les géologues marins se sont préoccupés presque exclusivement de la couverture sédimentaire. D'un autre côté de nouvelles méthodes géophysiques ont vu le jour, mais il est peu de géophysiciens qui se soient préoccupés sérieusement des « faits » géologiques.

Entre la géologie et la géophysique d'une part et la géologie marine et la géologie terrestre d'autre

part, les rapports faisaient défaut. En fait il n'y avait pas *d'idée unificatrice* et ces sujets, restés séparés furent étudiés par des chercheurs différents.

Le dialogue entre géologues et géophysiciens sur ces problèmes fondamentaux était impossible car en géologie l'accent a été mis surtout sur l'observation, et en géophysique la construction des modèles restait tout à fait théorique. La technique, avec la simplification et l'amélioration des instruments géophysiques, a permis un regain d'intérêt, de compréhension et donc le rattachement des deux disciplines.

Il y a de nombreuses années pourtant que les chercheurs spécialisés dans ces sciences de la terre se sont interrogés sur la permanence des bassins

* Centre Océanologique de Bretagne, B. P. 337, 29 N - Brest.

océaniques et sur la dérive des continents mais sans en ressentir toute l'idée force et sans en voir les conséquences sur la géologie générale et régionale.

Cette absence d'une science de la terre efficace a été démontrée par la découverte récente et inattendue des dorsales médio-océaniques. Il y a à peine plus de dix ans personne encore n'avait prévu l'existence de la structure active la plus importante de la surface de la terre. Mais lorsqu'on eut établi sa continuité sur plus de 60 000 km la doctrine classique des continents fixes se révéla incapable d'en expliquer la nature et la genèse.

I. — PRÉSENTATION DE LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

L'observation des cartes physiographiques des océans (fig. 1) permet de distinguer trois zones morphologiques principales :

- 1) La marge continentale qui comprend le plateau continental, la pente continentale et le glacis ;
- 2) Le bassin océanique qui comprend les plaines et les collines abyssales ;
- 3) La dorsale médio-océanique.

A) LA DORSALE ET LES BASSINS.

Depuis le début du siècle (J. Murray et R.E. Peake, 1904 ; A. Agassiz, 1906) on connaissait l'existence d'une surélévation au milieu de l'Atlantique. Cependant il a fallu attendre la belle carte de l'Atlantique de B.C. Heezen *et al.* (1959) (fig. 1) pour prendre conscience de l'ampleur, de la continuité et de la morphologie détaillée de la dorsale médio-atlantique. Elle divise l'océan Atlantique dans son ensemble en deux parties sensiblement égales et se prolonge vers le N après avoir traversé l'Islande, par Jan Mayen et les abords du Spitzberg. Au S, elle se suit jusque vers l'île Bouvet.

Un grand nombre de zones de fractures la découpent. Les décalages les plus importants ont lieu à 53° N (400 km) et dans la zone équatoriale : îles Saint-Paul et fosse de la Romanche. Une zone de fracture très importante et actuellement active est la ligne Açores-Gibraltar. Elle représente le contact des deux blocs Afrique-Eurasie qui montre des phénomènes de compression actuelle (X. Le Pichon, 1968).

Des bassins sédimentaires s'étendent entre la marge continentale et la dorsale. Du N au S et de l'E à l'W on peut distinguer les bassins :

- norvégien, ouest-européen, ibérique, canarien,

de la Sierra Leone, guinéen, d'Angola, du Cap ;
— du Labrador, nord-américain, brésilien, argentin.

B) BATHYMÉTRIE.

L'étude bathymétrique détaillée montre que la dorsale médio-atlantique est une large surélévation abondamment fracturée qui occupe à peu près le tiers médian de l'océan Atlantique. On peut y distinguer deux provinces : la province de crête et les flancs. La province de crête consiste en un rift bordé de deux blocs de topographie accidentée. Ce rift ou vallée médiane a en moyenne deux kilomètres de profondeur et une trentaine de kilomètres de largeur. Les flancs de la dorsale forment une série de gradins parallèles séparés par des escarpements. X. Le Pichon, dans sa thèse (1967), a montré qu'il existait deux types morphologiques bien distincts sur la dorsale atlantique. L'un situé au N de 30° S correspond au type de dorsale « Atlantique » décrit par B.C. Heezen (1959) ; l'autre situé au S de 30° S est plus proche du type de dorsale « Pacifique » décrit par H.W. Ménéard (1964) pour celle du Pacifique Est. Dans le type atlantique (N de 30° S), la topographie est localement très accidentée et elle se superpose à une pente régionale de 2 à 3 pour mille vers les collines abyssales où se trouvent les plus grandes profondeurs (près de 6 km). Au S de la limite indiquée, le relief local est beaucoup moins fort et les flancs forment un plateau de plus de 2 000 km de large qui se raccorde aux grandes profondeurs des collines abyssales.

La bathymétrie seule a permis de mettre en évidence ce trait fondamental du domaine océanique mais non pas d'en donner une explication solide.

C) APPORT DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES.

La sismique continue (explosifs), la magnétométrie et la séismologie (étude des séismes naturels) ont permis d'établir une série de faits qui, ordonnés, ont mené à la formulation d'une théorie globale.

Tout d'abord on s'est aperçu que les montagnes sous-marines étaient fort différentes des chaînes montagneuses terrestres. Le système de dorsales sous-marines qui entoure la terre est formé entièrement de roches ignées, principalement de basaltes. La couverture sédimentaire est peu épaisse ou inexistante et ne présente pas de phénomènes de plissement, de compression en général.

La vallée centrale des dorsales médio-océaniques est le siège de tremblements de terre (fig. 2). L'étu-

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE



FIGURE 1

Carte physiographique de l'océan Atlantique d'après les travaux de B. C. Heezen et éditée dans le "National Geographic Magazine".

Cette carte est cependant très interprétative et la direction des failles de transformation (comme celle de 53° N) peut être inexacte.

Physiographic diagram of the Atlantic Ocean after B. C. Heezen, "National Geographic Magazine".

This map is interpretative and the directions of the transform faults (as the 53° N) could be unaccurate.

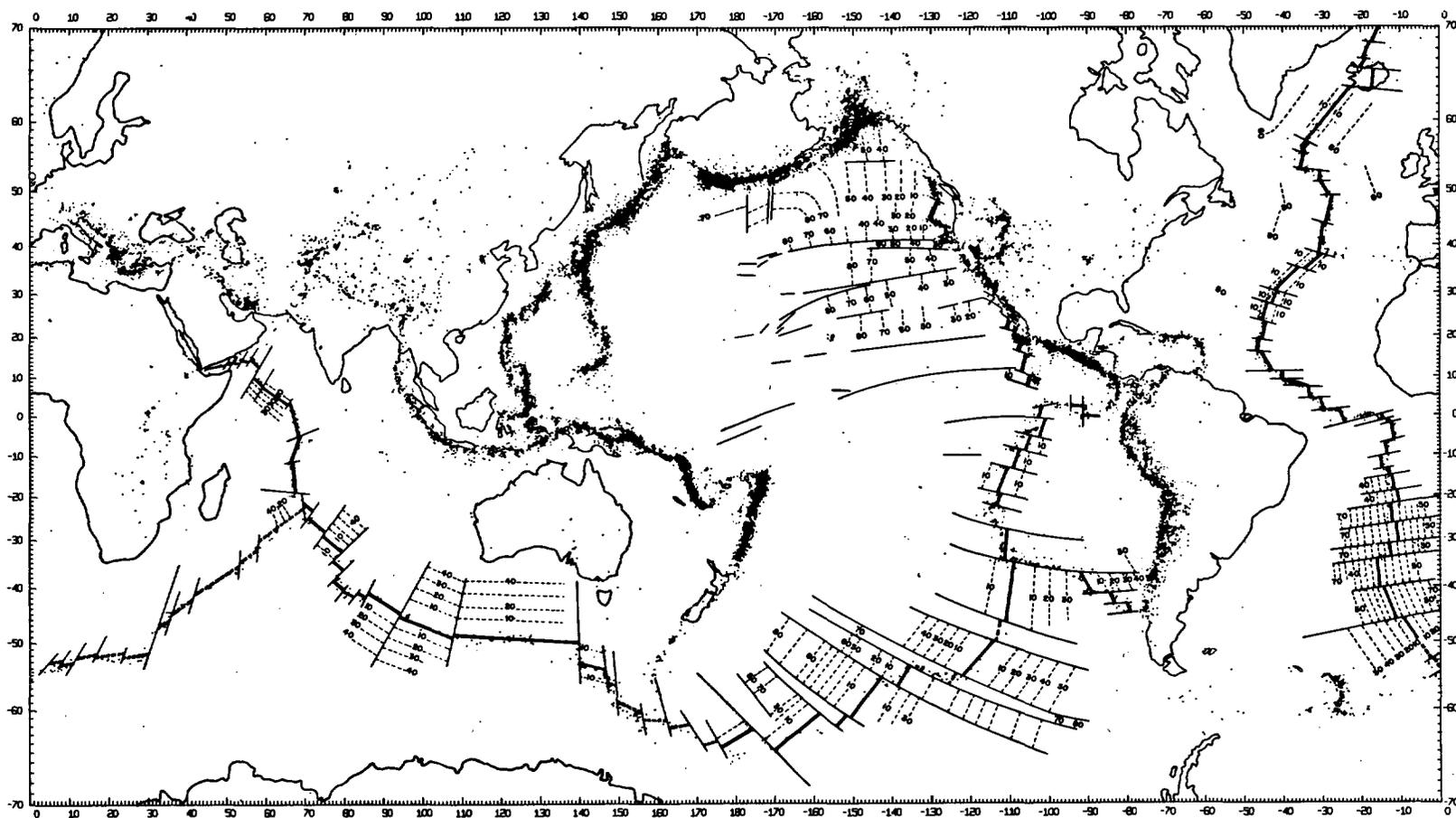


FIGURE 2

Carte mondiale des grandes zones de fracture d'après E. Bullard (1969).

Les points représentent les positions des tremblements de terre qui sont disposés le long des dorsales, sur la partie interne des failles de transformation et dans les fossés océaniques. La ligne noire épaisse correspond à l'axe des dorsales. Ces dorsales sont découpées par des failles de transformation. Les lignes en tireté, de part et d'autre des dorsales, représentent le renouvellement pour chaque 10 millions d'années (10 MA) d'après les études magnétiques.

Map of the fracture zones after E. Bullard (1969).

Earthquakes (black dots) occur along the crests of ridges, on parts of the fracture zone and along deep trenches. The thick black lines are the crest of a worldwide system of ridges. The ridge system is offset by fracture zones. The present position of material extruded at intervals of 10 million years, as determined by magnetic studies, appears as broken lines parallel to the ridge system.

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE



1



3



2

FIGURE 3
Photographies de basaltes dans le rift
médio-atlantique.
(D'après R. Hekinian, 1968).

1. Cliché montrant des « pillow-lavas » en place.
2. Résultats du dragage sur le pont.
3. Lame mince montrant un basalte à sphé-
rules avec une surface vitreuse et l'inté-
rieur plus cristallisé.

*Photographs of basalts in the rift of the
Mid-Atlantic Ridge.*

1. "In situ" pillow-lavas.
2. Dredge's contents on the deck.
3. Microphotograph of basalt with spherules,
glassy surface and crystalline core.

de du mécanisme de ces séismes montre qu'il se produit un phénomène d'extension et que les deux bords de cette vallée centrale s'écartent. Les photographies et les prélèvements réalisés dans le « rift » ont révélé la présence de roches basaltiques extrêmement fraîches. La datation de celles-ci a prouvé que les épanchements étaient récents (fig. 3).

L'apport de la *magnétométrie marine* a été déterminant pour l'élaboration des nouvelles hypothèses. La mesure « en continu » du champ magnétique a permis de montrer l'existence d'une série d'anomalies (formant des alignements) parallèles à l'axe du rift et symétriques par rapport à la zone axiale (fig. 4). Cette observation a été reliée à l'étude du paléomagnétisme des roches volcaniques terrestres et des sédiments marins. L'analyse paléomagnétique des roches ignées avait prouvé des inversions nombreuses du champ magnétique terrestre et, par leur datation, mis en évidence le synchronisme du phénomène. Il semble que dans les derniers 700 000 ans, le Nord magnétique n'a pas varié.

F.J. Vine et D.H. Matthews en 1963 ont émis l'hypothèse que la succession d'anomalies positives et négatives de chaque côté des dorsales était due à l'acquisition d'une aimantation normale ou inverse des basaltes au moment de leur épanchement et de leur refroidissement. Il apparaît maintenant

que le fond des océans se renouvelle continuellement à partir des dorsales et que l'histoire du mouvement des continents est imprimée dans les propriétés magnétiques de la croûte neuve ainsi formée.

Ainsi, lorsque les deux bords du rift s'écartent il y a épanchement de basalte qui au moment de la solidification enregistre la direction du champ magnétique à cet instant précis.

II. — LE RENOUVELLEMENT DES FONDS OCÉANIQUES

Le concept de renouvellement ou d'expansion des fonds océaniques a été formulé en détail par H.H. Hess en 1960 et R.S. Dietz en 1961. Pour comprendre comment on parvint à cette découverte et pourquoi elle a été accueillie aussi favorablement, il est nécessaire de considérer en détail ce progrès fondamental dans les sciences de la terre. Il s'est accompli en quatre étapes : la collecte des données, la déduction des lois, la prévision des conclusions et la vérification de ces prévisions. Après une première collecte de données, H.H. Hess et R.S. Dietz ont formulé l'hypothèse du « spreading floor ». Les conclusions qu'on a pu en tirer ont entraîné la formulation de la théorie de la tectonique des plaques à partir du concept de faille transformante (J.T. Wilson, 1965). Actuellement les études océanographiques s'efforcent de vérifier ces prévisions.

Depuis A. Wegener (1937) les spécialistes des sciences de la terre se sont demandés si les continents dériveraient et dans l'affirmative quelle pouvait en être la cause ? Avec la théorie du renouvellement des fonds océaniques par remontée de matériau dans l'axe des dorsales on peut comprendre la succession des zonations magnétiques. De la même manière en partant de cette théorie on conçoit mieux la création des volcans, des guyots, des récifs de coraux rencontrés assez loin de la dorsale et par grande profondeur. Ils ont été formés dans le domaine de la dorsale, ont parfois émergé (ce qui expliquerait la troncature des guyots), ensuite ont été entraînés vers les bordures comme sur un tapis roulant. Ce qui faisait intervenir il y a encore quelques années des mouvements verticaux de plusieurs milliers de mètres, toujours rattachés à l'isostasie, s'explique mieux par le renouvellement des fonds océaniques. L'augmentation d'épaisseur des sédiments à partir de la dorsale vers les marges est compréhensible avec ce concept. Le fait enfin que dans les océans on n'a jamais trouvé de sédiments plus anciens que 150 millions d'années et très peu de sédiments antérieurs à 80 millions d'années se conçoit aisément

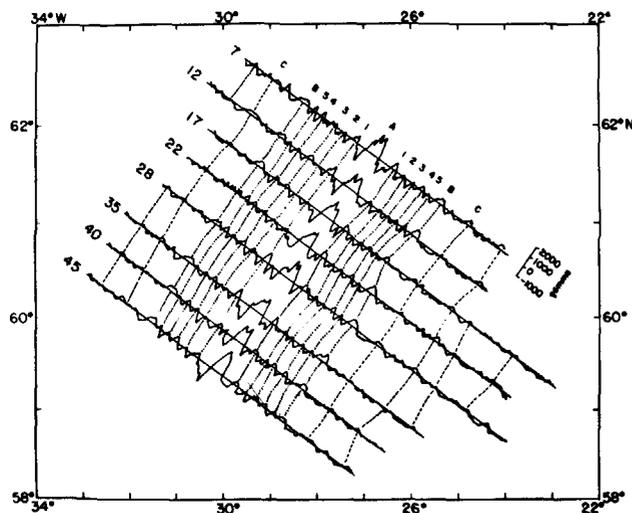


FIGURE 4

Profils de l'anomalie magnétique au-dessus de la dorsale de Reikjanes projetés sur des perpendiculaires à la structure.

Les nombres à gauche sont les numéros des profils. Les lettres et chiffres en haut identifient les anomalies. (D'après J. R. HEIRTZLER et al., 1966).

Eight anomaly profiles projected on lines perpendicular to the structural trends.

Profile numbers are at the west end of the lines. Letters and numbers over the anomalies identify particular magnetic features.

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

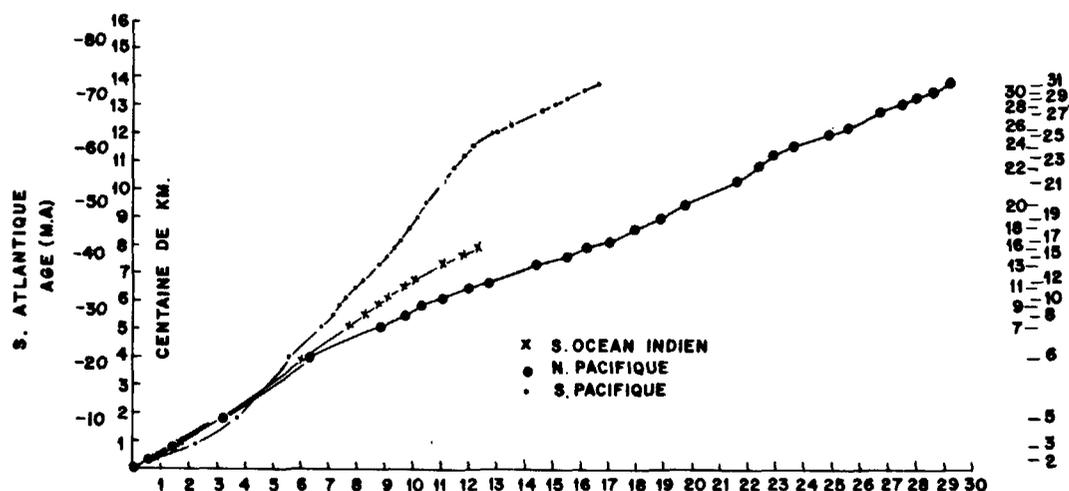


FIGURE 5

Distances à des anomalies données dans l'Atlantique Sud en fonction des distances aux mêmes anomalies dans l'Océan Indien Sud, le Pacifique Nord et le Pacifique Sud.

Les nombres à droite concernent les numéros des anomalies. (D'après J. R. Heirtzler *et al.*, 1968).

The distance to a given anomaly in the South Atlantic versus distance to the same anomaly in the South Indian, North Pacific, and South Pacific oceans. Numbers on right refer to anomaly numbers.

dans l'hypothèse d'un renouvellement. On objecte parfois que l'on connaît encore peu les profondeurs océaniques, et que cette absence de sédiment ancien est un peu une preuve par la négative. Pour vérifier cette hypothèse les Américains ont préparé et réalisent actuellement le projet JOIDES de forages profonds.

Si nous revenons aux alignements magnétiques et en comparant la séquence d'inversions avec les données magnétiques sur les laves terrestres datées, on peut en déduire une échelle de temps. J.R. Heirtzler *et al.* (1968) ont défini un certain nombre d'anomalies types et en ont extrapolé une échelle de temps, d'où une vitesse d'expansion pour les principaux océans (fig. 5). Cette échelle de temps géomagnétique (fig. 6) a été confirmée de façon tout à fait remarquable par les forages JOIDES en cours.

Dans l'Atlantique Sud (fig. 7) durant le troisième parcours du programme JOIDES, 9 forages ont été réalisés sur une transversale à la dorsale. D'une part la datation des sédiments les plus anciens en contact avec le basalte et celle de ce dernier concordent ; d'autre part l'échelle de temps géomagnétique de J.R. Heirtzler *et al.* (1968) et les datations de ces forages sont pratiquement superposables. Un accord d'une telle précision entre la théorie et les faits est assez rare en géologie pour mériter d'être cité comme référence.

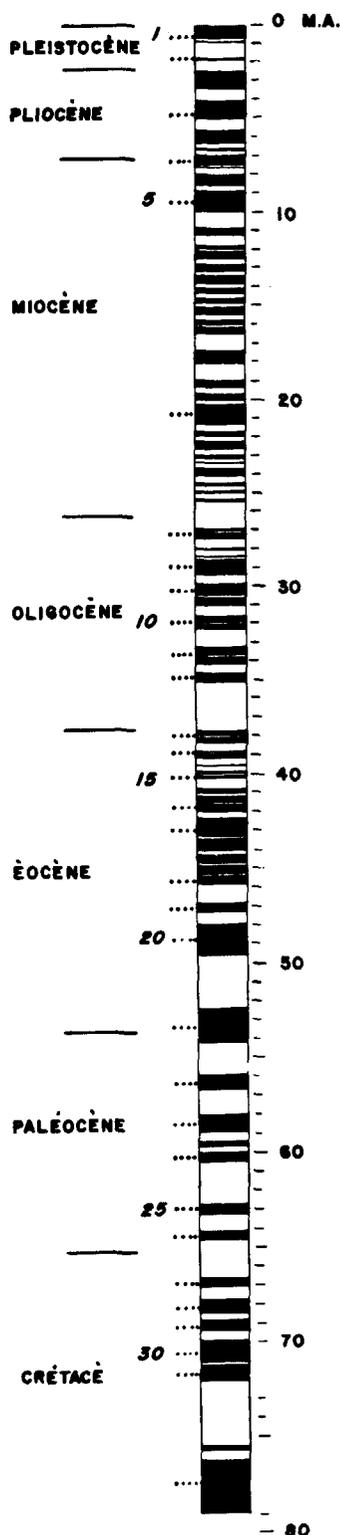
La vitesse de renouvellement de part et d'autre de la dorsale varie de moins d'un centimètre à plus

de 8 cm par an. Les taux d'expansion les plus élevés se trouvent sur la dorsale du Pacifique et les plus faibles dans le domaine de celle de l'Atlantique. En général le renouvellement est également réparti de chaque côté, ce qui donne un déplacement total de 16 cm par an dans le cas d'un renouvellement rapide. A ce taux, le fond du Pacifique, large de 15 000 km, peut être entièrement renouvelé en 100 millions d'années.

III. — LA TECTONIQUE DES PLAQUES

Le fait que l'activité séismique est strictement localisée dans le domaine des dorsales et dans le système des chaînes jeunes et des fosses océaniques conduit à l'hypothèse de plaques rigides indéformables, sauf sur leur bordure.

En étudiant attentivement la localisation des foyers de tremblements de terre on s'aperçoit qu'il y a une grande différence entre les côtes occidentales de l'Amérique et de l'Eurafric par exemple. Si l'une est le siège de très nombreux tremblements de terre, l'autre en est dépourvue. Le passage océan-continent doit donc être très différent selon les régions. S'il n'y a pas de mouvements séismiques entre un domaine océanique et un domaine continental par exemple, il faut admettre soit que le système est immobile dans l'absolu, soit qu'ils font partie du même ensemble rigide mais qui peut



être mobile. On a donc divisé la terre en énormes plaques rigides aséismiques limitées par des zones sismiquement actives. L'épaisseur de telles plaques n'est pas encore connue mais 100 km semble être un ordre de grandeur probable. Cette partie superficielle est appelée *lithosphère*, les plaques reposant sur *l'asthénosphère*. Ainsi la majeure partie de la plaque doit être composée du même matériel que la partie supérieure du manteau, probablement de péridotite qui est une roche composée en grande partie d'olivine, de silicates de magnésium et de fer. La partie supérieure de la plaque est constituée de quelques kilomètres de roches basaltiques recouvertes de sédiments ou de croûte continentale.

Après la détermination et la description de ces plaques il faut essayer de comprendre leur cinématique. Le mouvement, à partir d'une dorsale, de deux plaques rigides sur une sphère est une *rotation* autour d'un axe appelé axe de renouvellement des fonds océaniques. Ce dernier, autour duquel s'effectue la rotation, passe par le centre de la terre et détermine le pôle de renouvellement.

Les dorsales sont hachées de fractures transverses qui décalent les tronçons de dorsale. Une étude détaillée de ces zones de fracture appelées également *failles transformantes* a montré que les tremblements de terre sont engendrés uniquement entre les deux portions de crête de la dorsale ; il n'y a pas de mouvement relatif ni de tremblements de terre sur les parties extérieures aux crêtes de la dorsale (fig. 8). Si le mouvement unique de ces failles transformantes est le glissement ou le coulissage de deux plaques l'une par rapport à l'autre dans un sens normal à la dorsale, les failles transformantes doivent être sur des petits cercles (parallèles) par rapport au pôle d'expansion (fig. 9) et la vitesse de renouvellement en chaque point de la dorsale doit être proportionnelle à la distance entre ce point et l'axe de renouvellement (d'après la théorie d'Euler). Les pôles de renouvellement des fonds peuvent donc être déterminés à partir de la direction des failles transformantes et confirmés par l'étude des mouvements au foyer des tremblements de terre (W.J. Morgan, 1968).

FIGURE 6
Echelle de temps géomagnétique
d'après J. R. Heirtzler et al. (1968).

De gauche à droite : échelle des systèmes géologiques, disposition des anomalies magnétiques et temps absolu. La polarité normale du champ géomagnétique est colorée en noir.

The geomagnetic time scale.

From left to right : Phanerozoic time scale for geologic eras, numbers assigned to bodies and magnetic anomalies, geomagnetic field polarity with normal polarity periods colored black.

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

En s'appuyant sur la théorie de W.J. Morgan, X. Le Pichon (1968) a calculé les mouvements relatifs entre six grands blocs : Eurasie, Afrique, Amérique, Antarctique, Pacifique et Inde (fig. 10). Il a déterminé les centres de rotation des divers contacts entre plaques pour en déduire la géométrie globale des masses continentales à l'heure actuelle.

En partant ensuite de l'échelle géomagnétique (datation des anomalies) et par rotation inverse des blocs pour superposer les deux anomalies correspondant à un même événement magnétique, il est alors possible d'obtenir les positions relatives des continents et des bassins océaniques lors de la création de cette anomalie.

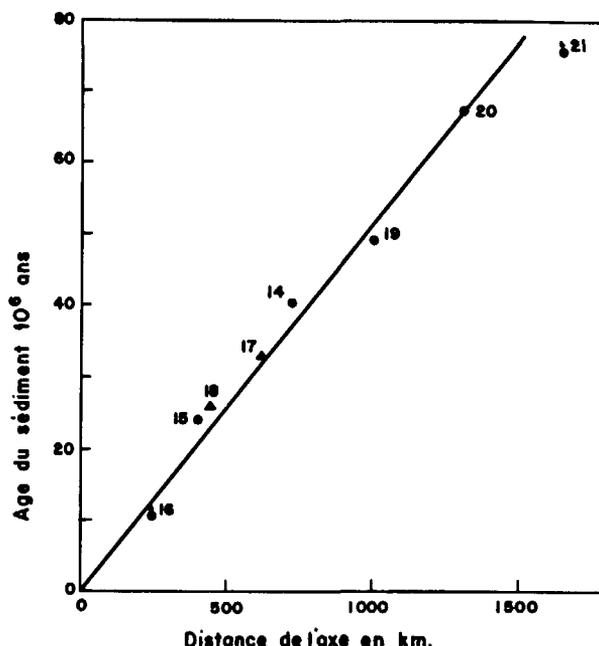
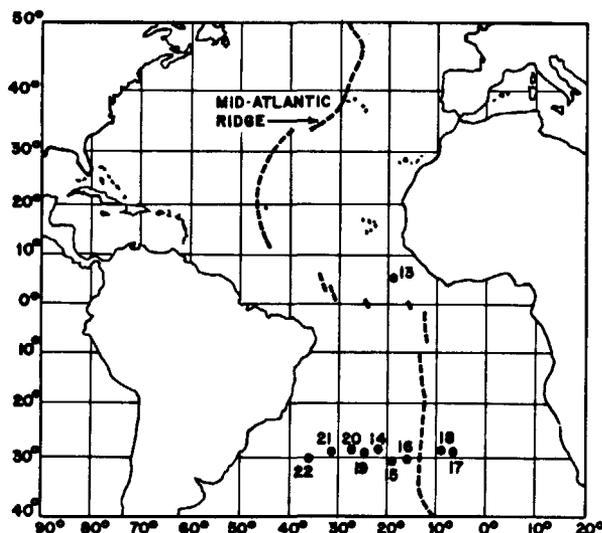


FIGURE 7

Rapport préliminaire du 3^e trajet de l'opération JOIDES. (D'après M. N. A. Peterson, 1969).

L'évidence du « sea floor spreading » apparaît parfaitement ici. Les sites 17 et 18 sont sur le flanc Est, tous les autres sont sur le flanc Ouest. Les flèches des sites 16 et 21 indiquent la possibilité de sédiments plus anciens reposant sur le basalte qui n'ont pas été prélevés.

3^e leg of the JOIDES operation.

Sites 17 and 18 are sites on the eastern flank, whereas all the others are west of the ridge axis. Upward arrows at sites 16 and 21 indicate possibility of older sediments directly above basalt, which were not recovered.

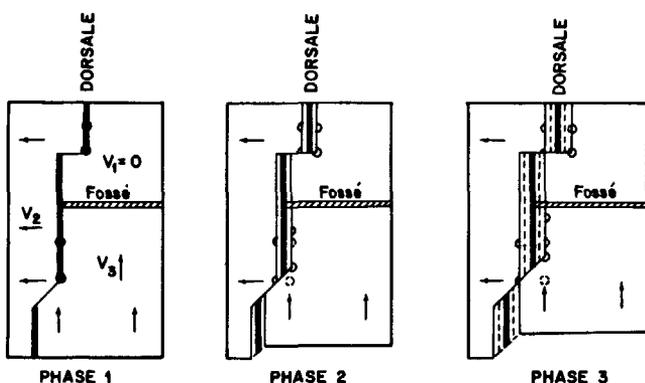


FIGURE 8

Failles de transformation.

Trois blocs sont séparés par une dorsale active, un fossé et des failles. On montre leur évolution.

A la première phase on a placé quatre cercles marqueurs sur la dorsale. Les cercles en trait plein montrent le mouvement résultant et les cercles en hachures montrent les coordonnées initiales. La direction de la faille transformante est parallèle à la différence des vitesses entre les deux côtés. La crête de la dorsale dérive avec une vitesse qui est la moyenne des vitesses des deux bords.

(D'après W. J. Morgan, 1968).

Transform-faults.

Three crustal blocks bounded by a rise, trench and faults are shown at three successive time intervals. Note the motion of the four circular markers placed on the ridge crest at time 1 : the solid segments show the motion of these circles; the dotted segments show the original coordinates of these markers. The strike of a transform fault is parallel to the difference of the velocities of the two sides; the crest of the ridge drifts with a velocity that is the average of the velocities of the two sides.

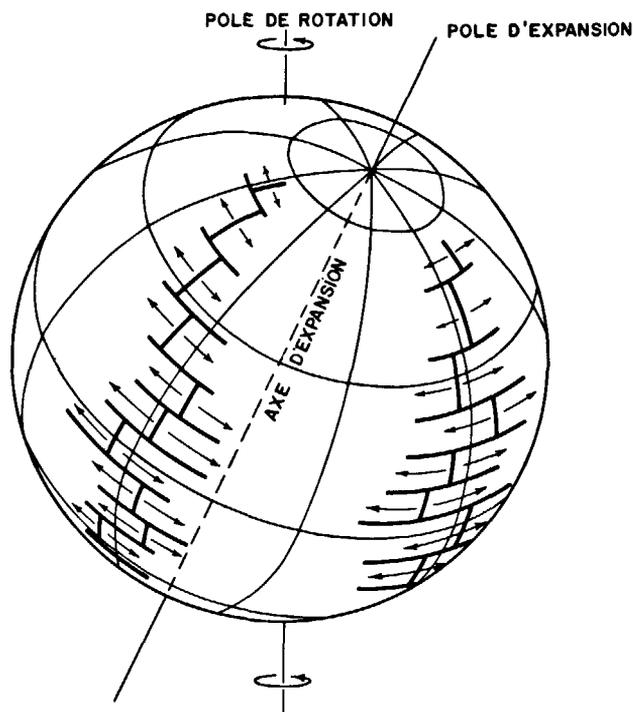


FIGURE 9
Mouvement de plaques rigides.
(D'après E. Bullard, 1969).

Le mouvement de plaques rigides sur une sphère exige que les plaques tournent autour d'un pôle d'expansion par lequel passe un axe d'expansion. Les plaques se déplacent toujours parallèlement aux failles de transformation et le long des cercles de latitude perpendiculaire à l'axe d'expansion. Le taux d'expansion est faible près du pôle d'expansion et le plus élevé à 90 degrés de celui-ci. Le pôle d'expansion peut être très éloigné du pôle de rotation de la sphère.

Motion of rigid plates.

Motion of rigid plates on a sphere requires that the plates rotate around a "pole of spreading" through which passes an "axis of spreading". Plates always move parallel to the fracture zones and along circles of latitude perpendicular to the axis of spreading. The rate of spreading is slowest near the pole of spreading and fastest 90 degrees away from it. The spreading pole can be quite remote from the sphere's pole of rotation.

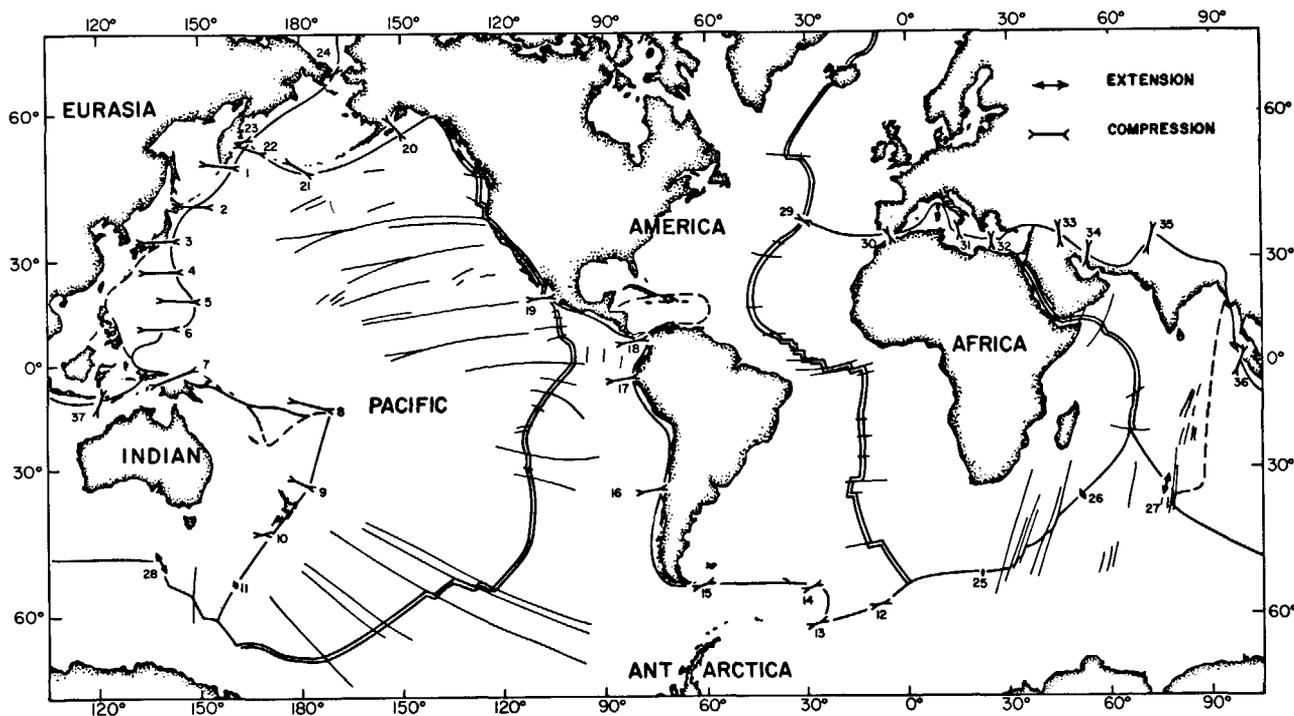


FIGURE 10
Distribution des six blocs utilisés par X. Le Pichon (1968) pour sa reconstitution.
The locations of the boundaries of the six blocks used for X. Le Pichon in the computations.

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

On peut ainsi, en admettant un renouvellement continu ou épisodique, trouver la position relative des blocs à des époques comprises entre l'Actuel et le Paléocène-Crétacé supérieur. En effet l'anomalie 32, la plus ancienne qui ait pu être déterminée sur des distances suffisantes correspond à cet âge (75 MA).

Que se passe-t-il au contact de deux plaques ? Pour le comprendre il convient de tenir compte de la vitesse relative qui semble avoir une importance primordiale et de la nature des bords de la plaque : primordial ou océan.

D'après H.W. Ménard, si la vitesse relative des deux blocs est supérieure à 6 cm/an, une plaque plonge sous l'autre selon un angle de 45° (fig. 11). En fait la vitesse limite semble se situer entre 5 cm (Kermadec) et 2,5 cm (Méditerranée orientale). La plaque de lithosphère, rigide, s'enfonce dans l'asthénosphère dans la profondeur de laquelle elle sera assimilée. L'enfouissement de cette plaque rigide et froide explique la présence, au-dessus de

la zone d'enfoncement, de volcans, d'îles et de fossés. Les nombreux séismes dans ces zones sont dus au contact entre les deux plaques de lithosphère. Les laves des volcans situés en arrière de la zone de contact, au-dessus des séismes situés entre 100 et 200 km de profondeur, sont fréquemment composées d'andésite. Elles sont différentes de celles des dorsales par leur richesse en silice et peuvent provenir de la fusion différentielle au cours de l'enfoncement d'un mélange basalte-péridotite contaminé par les sédiments océaniques. Lorsque la vitesse relative est inférieure à 6 cm, les deux plaques se froissent sur la zone de contact et donnent naissance à une chaîne de montagnes (fig. 12).

Il faut faire en fait une distinction nette entre les plaques comprenant un continent, qui sont plus légères et qui ne peuvent plonger, et celles qui comprennent un océan.

Trois types de mouvements sont donc possibles :
1) une plaque océanique plonge sous une autre plaque de même type. Le résultat est la for-

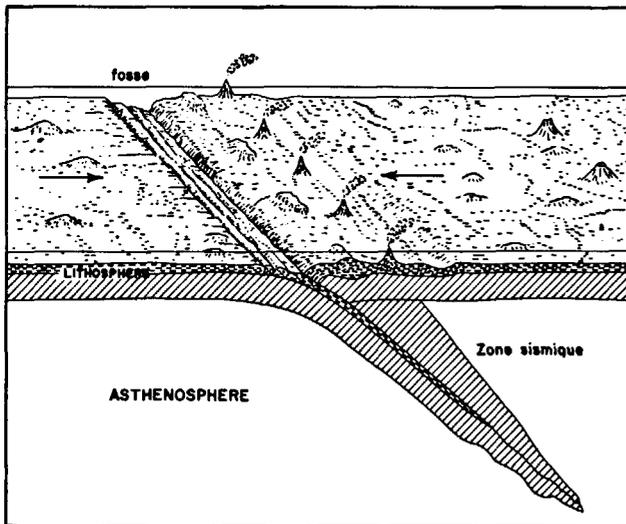


FIGURE 11

Un fossé est créé par la plongée d'une plaque sous une autre.

Ce phénomène se produit lorsque la vitesse est importante (plus de 6 cm/an). Ce contact produit des volcans, des îles et un fossé comme celui de Tonga. Des fractures apparaissent dans le domaine de ces fossés et elles sont le résultat de la courbure de la croûte.

(D'après H. W. Menard, 1969).

Trench is created where the leading edge of a plate that emerges from a fast spreading center collides with another plate.

Because the combined speed of the two is more than six centimeters per year neither can absorb the impact by buckling. Instead one crustal plate (in lithosphere) plunges under the other to be destroyed in the asthenosphere, a hot, weak layer below. The impact produces volcanoes, islands and a deep, such as the Tonga Trench. Beside a trench are cracks which are produced by bending of the crust.

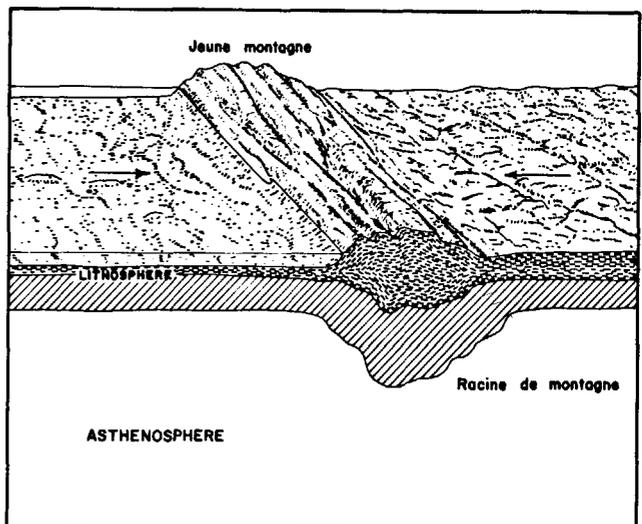


FIGURE 12

Une chaîne de montagne est formée lorsque les deux plaques viennent en contact avec une vitesse faible (moins de 6 cm par an).

Au lieu de plonger les deux plaques se froissent et forment des plis. Ces chaînes sont formées de matériel crustal, et on peut les identifier par la présence de cherts ou autre matériel typique des fonds océaniques.

(D'après H. W. Menard, 1969).

Mountain range is formed when the leading edges of two plates come together at less than six centimeters per year.

Instead of colliding catastrophically, so that one plate slides under the other, both plates buckle, raising a young mountain range between them. The range consists of crustal material that folds upward under the compression exerted by the two plates (and also downward, forming the root of the mountain). Such ranges can be identified because they contain cherts and other material typical of the ocean bottom.

mation d'une fosse et d'une guirlande d'îles (TONGA) ;

- 2) une plaque océanique plonge sous une plaque portant un continent : il y a formation de fosse et de chaînes de montagnes (ANDES) ;
- 3) deux plaques portant un continent sont en contact : les blocs continentaux se superposent donnant lieu à la formation d'une zone où l'épaisseur de la croûte est anormalement élevée (HIMALAYA).

Ces hypothèses géométriques simples, bien utilisées et contrôlées grâce aux mesures géophysiques, peuvent expliquer la majorité des problèmes posés en géologie terrestre et en océanographie. Cette théorie ne rend pas encore compte de tous les faits observés et certains traits importants demeurent encore inexpliqués. Cependant la théorie de la tectonique des plaques, dans son développement actuel, est très séduisante.

IV. — STRUCTURE DE LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

Avant d'appliquer la méthode de la tectonique des plaques pour interpréter l'ouverture de l'Atlantique, il est bon de donner un résumé des connaissances géologiques et géophysiques concernant ce bassin.

A) LES ANOMALIES MAGNÉTIQUES.

Entre 70° N et 40° S une anomalie magnétique de grande amplitude suit la vallée médiane et elle semble produite par une masse magnétique ayant les mêmes caractéristiques volumétriques et magnétiques tout au long des 10 000 km étudiés. Dans une zone axiale, qui a au moins 500 km de large, les anomalies magnétiques apparaissent rectilignes et symétriques par rapport à l'axe de la dorsale. Leur « longueur d'onde » est constante et relativement courte (30 km). Leur amplitude augmente progressivement vers l'axe topographique pour y atteindre un maximum. Sur la partie inférieure des flancs, la configuration des anomalies est plus complexe : elles sont caractérisées par une amplitude croissante en s'éloignant de l'axe de la dorsale et une « longueur d'onde » nettement plus élevée qui peut correspondre à un espacement plus grand des sources magnétiques.

Les différentes anomalies ont été repérées par les chercheurs du Lamont-Doherty Geological Observatory (M. Talwani *et al.*, sous presse) (fig. 13). Sur cette figure ont été reportées les zones sismiques, les anomalies déterminées par leur numéro

donc leur âge probable, les prélèvements avec l'âge des sédiments les plus anciens, et les forages JOIDES. La grande faille transformante de 53° N a été prolongée jusqu'à la marge canadienne d'après les résultats de la mission Noratlante (été 1969) effectuée par l'équipe du Centre Océanologique de Bretagne (fig. 14).

Les forages JOIDES des parcours 1 et 2 dont les positions sont reportées sur la figure 13 ont pour la première fois apporté une preuve concrète à la théorie du renouvellement des fonds océaniques. Les sédiments les plus jeunes en contact avec le substratum ont été trouvés dans le domaine de la dorsale, et les plus anciens sur les bordures (fig. 15). Sur le premier forage on a récupéré un substratum de basalte vacuolaire altéré. Dans les autres forages on a recueilli du bed-rock avec un interface substratum-sédiment composé de sédiment durci et marmorisé contenant des fragments de verre volcanique. Dans le domaine sédimentaire on s'est aperçu qu'il y avait eu des changements importants à l'Éocène (65 MA) dans la circulation et la chimie des eaux, car à cette époque, des conditions favorables à la formation de sédiments riches en silice et de bancs de cherts prévalaient.

Ces forages et les études de datation qui ont suivi ont permis de se faire une idée sur le processus d'ouverture de l'Atlantique.

B) NATURE DE LA DORSALE.

Pour son étude, la sismique réfraction et les dragages sont des méthodes de choix.

1°) La géophysique.

L'équipe du Lamont a fourni des renseignements fondamentaux sur la structure de l'écorce et du manteau dans le domaine de la dorsale médio-atlantique grâce aux profils de sismique réfraction, de gravimétrie, de magnétométrie et de mesures de flux de chaleur. L'interprétation de nombreuses mesures conduit à un profil type (fig. 16). Sous une fine couverture de sédiments meubles dont l'épaisseur augmente de chaque côté du rift, on trouve des coulées de lave à faible vitesse de 2 à 3 km d'épaisseur, qui reposent sur des roches volcaniques compactes (6 km/s). Sous la zone axiale une faible épaisseur de roches volcaniques recouvre un manteau altéré (7,3 km/s). Ce manteau anormal à faible vitesse forme un bombement sous la partie centrale de la dorsale, avec soulèvement d'une écorce typiquement océanique. Cette vitesse compressive de 7,3 à 7,6 km/s semble caractéristique des régions du globe ayant une certaine instabilité potentielle. On la trouve par exemple dans des régions tectoniquement actives (Japon, partie ouest

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

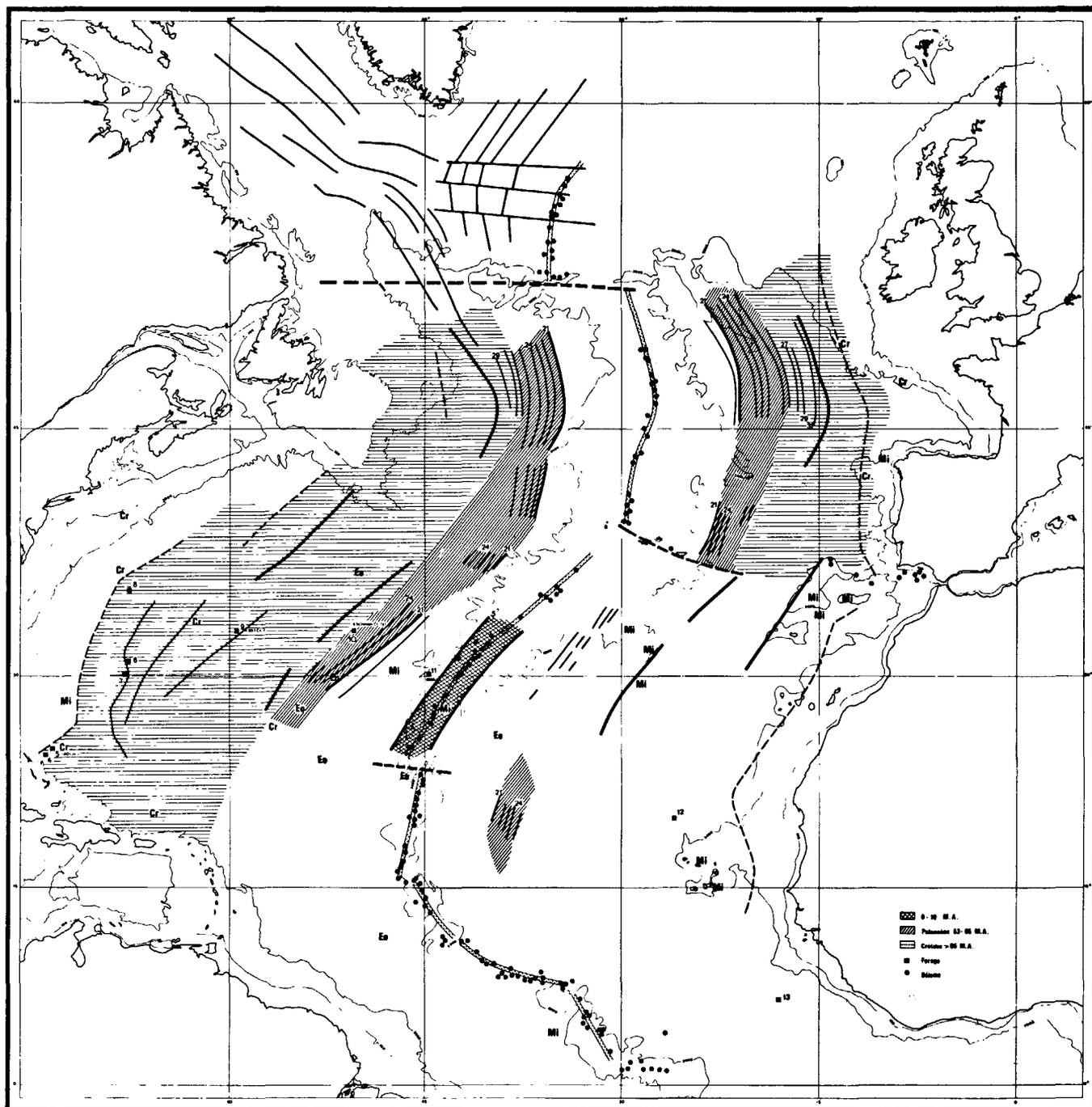


FIGURE 13

Carte synthétique de l'Atlantique Nord.

Les alignements magnétiques ont été tracés d'après les travaux du Lamont-Doherty Geological Observatory. Les forages JOIDES sont représentés et l'âge des sédiments est indiqué. Les autres indications : Cr = Crétacé, Eo = Eocène, Mi = Miocène, correspondent aux sédiments les plus anciens trouvés dans les carottages.

Synthetic map of the Nord-Atlantic Ocean.

Magnetic lineations after Lamont-Doherty Geological Observatory. The JOIDES drills are presented here with estimated ages. The remaining informations (Cr = Cretaceous, Eo = Eocene, Mi = Miocene) show the age of the oldest sediments found in cores.

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

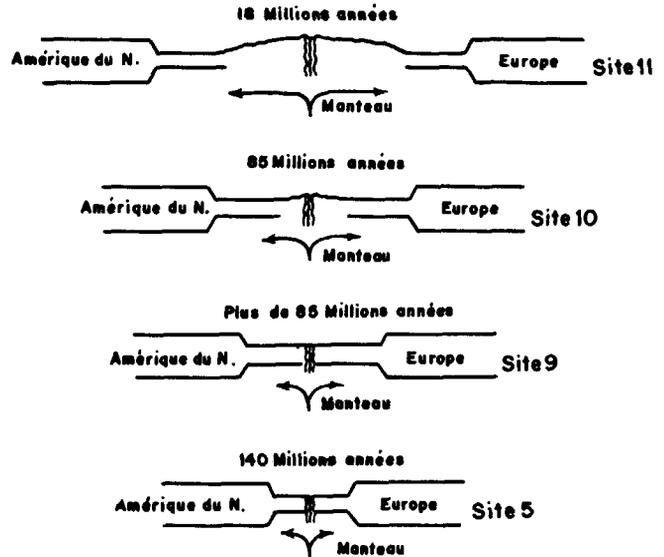
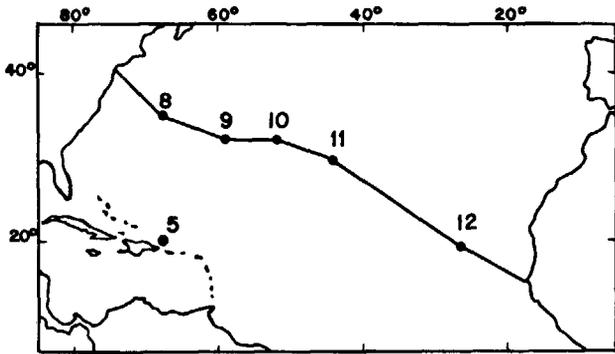


FIGURE 15

Position des forages JOIDES dans l'Atlantique Nord et âge.

Ces forages ont apporté la première preuve du renouvellement des fonds océaniques à partir des zones de distension. Les sédiments les plus jeunes sont trouvés vers l'axe de la dorsale et les plus anciens dans les régions éloignées de la dorsale. (D'après M. N. A. Peterson, 1969).

Locations of JOIDES drilling sites in North Atlantic Ocean and age determinations.

The cores have brought the first "proof" of the sea-floor spreading process. The youngest sediments are near the rift of the mid-atlantic ridge and the oldest far away from the ridge.

des Etats-Unis), et dans des bassins dont la croûte a une profondeur intermédiaire entre celle des bassins océaniques et celle des continents (Méditerranée occidentale).

La dorsale est donc liée à un bombement du manteau qui soulève la croûte océanique et ensuite la fracture par distension. Le paroxysme de l'évolution correspond à d'énormes épanchements de laves qui épaississent le socle d'un à deux kilomètres sur les flancs et modifient ou créent une zone axiale dans laquelle des roches volcaniques reposent directement sur un manteau altéré.

Il est à noter ici que l'équipe soviétique de Udintsev¹ interprète différemment cette dorsale médio-océanique. Au lieu de reconnaître un mouvement passif de remontée de lave dans la vallée

médiane dû à l'écartement de deux plaques, il pense que le phénomène actif est la remontée de ce matériel dans une zone plus large (100 à 200 km) dans la partie médiane de la dorsale. Les remontées de roches basiques dans une large zone tectoniquement très active, les phénomènes hydrothermaux importants accompagnés de serpentinisation active seraient le moteur de l'expansion des fonds océaniques. Les alignements magnétiques sont expliqués par une succession de blocs plus ou moins magnétiques en relation avec une serpentinisation différentielle.

2°) Les dragages dans les zones de dorsales commencent à être assez nombreux pour que les résultats puissent s'ordonner selon un schéma qui reste approché.

Dans le manteau supérieur, océanique ou continental, on peut envisager la présence de péridotites,

1. Communication orale.

FIGURE 14

Routes suivies durant la campagne « Noratlante » réalisée par le Centre Océanologique de Bretagne.

Sur tout le trajet nous avons utilisé le flexotir et le canon à air.

Les points représentent les stations.

Durant nos traversées nous avons étudié en détail les deux failles de transformation de 53° N et de Terre-Neuve-Gibraltar.

Tracks of the "Noratlante" cruise of the Centre Océanologique de Bretagne.

Flexotir system and air-gun have been used. Dots show the stations.

The two transform-faults : (53° N and Newfoundland-Gibraltar) have been surveyed in details.

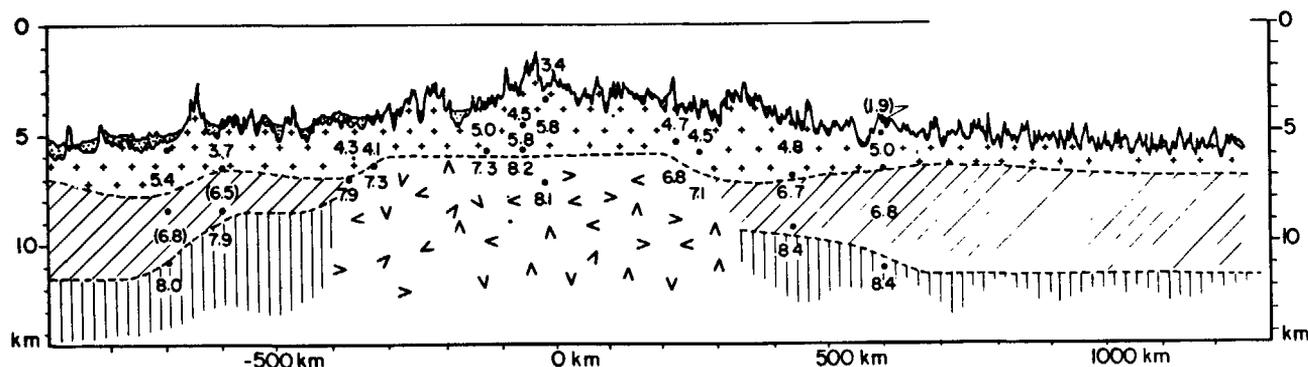


FIGURE 16

Interprétation de la structure profonde de la dorsale médio-atlantique d'après des profils de sismique réfraction (Profils NW-SE entre 35° N et 25° N).

Les chiffres sur le profil représentent la valeur des vitesses compressives en km/s. Les couches de sédiments (déterminés par sismique réflexion continue) sont en pointillés. (D'après M. Talwani *et al.*, 1965).

Interpretative section of the deep structure of the Mid-Atlantic ridge from refraction profiles (NW-SE profil between 35° N and 25° N).

Figures on the profile are the compressive velocities in km/sec. Dotted zones show the sediments from seismic reflection profiles.

avec ou sans pyroxènes. La couche océanique de vitesse 6.0 à 6.9 km/s serait formée à la base de roches ultra-basiques (lherzolites) plus ou moins serpentinisées, surmontées d'une série métamorphisée allant des roches vertes aux amphibolites. La couche supérieure à faible vitesse serait formée de basaltes tholéitiques et plus rarement de basaltes alcalins (basalte à olivine), de dolérites et de gabbros.

Les dragages dans le rift ou sur les flancs ne ramènent habituellement que des basaltes. Les roches ultrabasiques n'ont pu être draguées que sur les fractures transversales.

La minéralogie et la chimie de ces roches océaniques permettent de distinguer plusieurs classes de roches suivant leur teneur en minéraux et leur degré de cristallinité (R. Hekinian, communication orale) :

a) les verres basaltiques à olivine : ils ont une couleur noire et sont le plus souvent altérés en paragonite. Ils sont formés de phénocristaux de plagioclases et d'olivine noyés dans une pâte vitreuse.

b) Les basaltes à sphérules : ce sont des roches hypocristallines recouvertes d'une mince couche de verre.

c) Les basaltes cristallins : ces roches holocristallines sont formées de minéraux de pyroxènes, d'andésine calcique ou de Labrador. Ces microlites forment une structure variolitique caractéristique.

d) Les cendres volcaniques et les pyroclastes sous-marins.

On peut ajouter aux basaltes les spilites, les gabbros et les serpentinites.

e) Les roches spilitiques : elles doivent être d'origine basaltique probablement tholéitique. Le Labrador a été transformé en albite. Dans l'Atlantique Nord, d'après W.G. Melson et T.H. Van Andel (1966), ces roches vertes auraient subi une altération après solidification du magma.

f) Les gabbros : ils ont été dragués principalement dans l'Atlantique Nord. Ils sont granuleux et formés d'hypersthène, d'augite, de fragments de pyroxène et d'une pâte composée de plagioclases. Il est probable que ces gabbros ont subi un certain métamorphisme dynamique. Ils semblent associés aux zones de fracture.

g) Les serpentinites : elles ont été découvertes en Atlantique Nord associées à des zones de fracture. Ce sont des roches de couleur verte avec des vésicules remplies de talc. L'antigorite est le minéral le plus abondant. Ces serpentinites doivent être le produit d'altération de roches riches en pyroxène et olivine.

En conclusion, ces roches du domaine océanique n'ont pas une composition uniforme. Leurs propriétés physiques et chimiques doivent être influencées par des facteurs directement associés au mouvement de l'écorce et peut-être même du manteau.

V. — FORMATION DE L'ATLANTIQUE

L'état des connaissances en Atlantique Nord en 1967 ont amené X. Le Pichon à proposer trois épisodes principaux de renouvellement des fonds

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

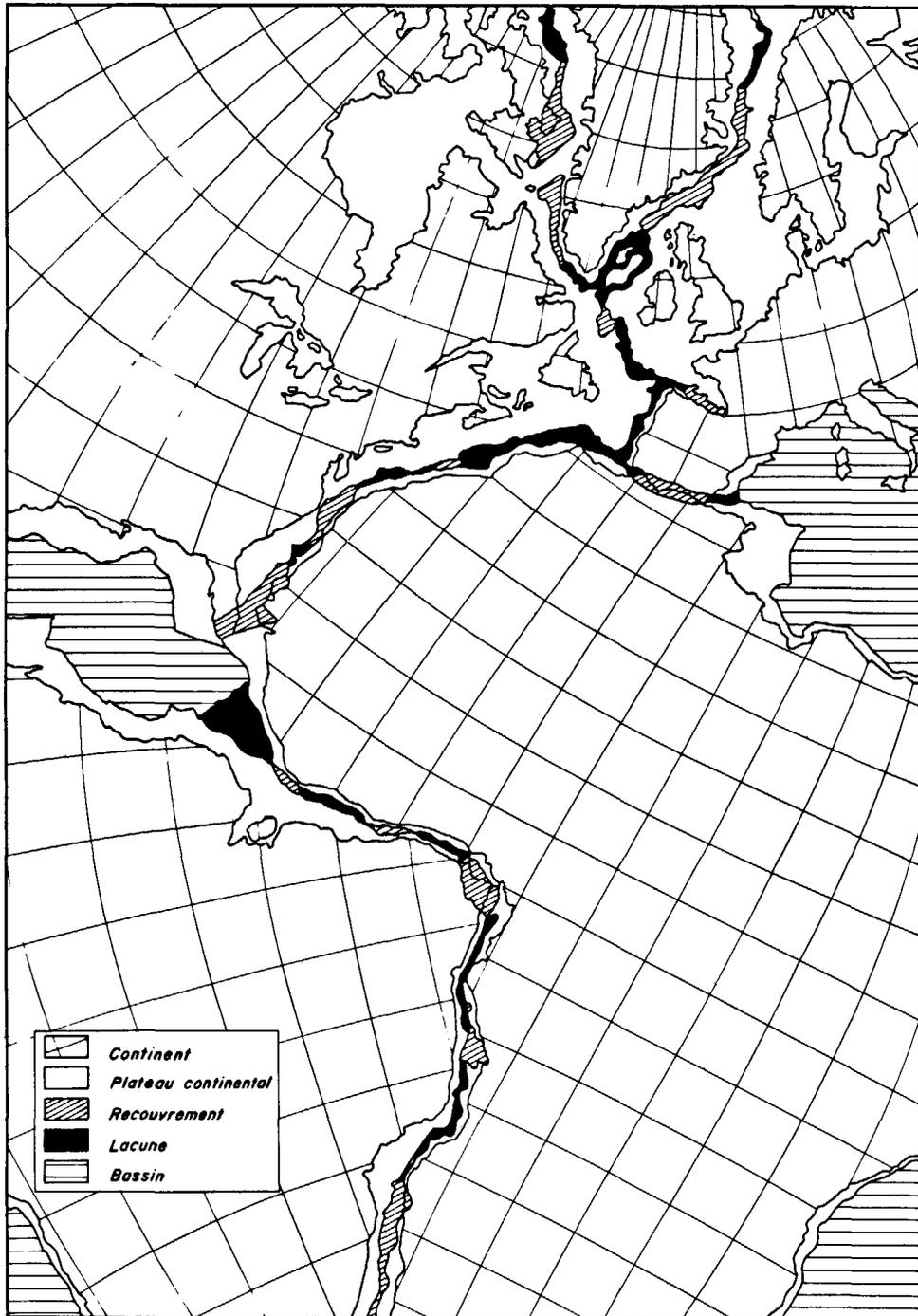


FIGURE 17

Disposition probable des continents avant la formation de l'Atlantique. (D'après E. Bullard, 1969).

Le raccord n'a pas été fait sur les lignes de côte actuelles mais sur le bord réel de chaque continent, c'est-à-dire à l'endroit où la pente continentale descend rapidement vers les fonds océaniques.

Probable arrangement of continents before the formation of the Atlantic Ocean.

The fit was made not at the present coastlines but at the true edge of each continent, the line where the continental shelf slopes down steeply to the sea floor.

qui débutent approximativement au Mésozoïque supérieur, au Cénozoïque inférieur et au Cénozoïque supérieur.

Le début de l'épisode mésozoïque est difficile à dater (fig. 17). Dans l'Atlantique du NW le niveau le plus profond des roches sédimentaires non consolidées a été daté du Néocomien à l'Albien (130 à 100 MA)². Dans l'Atlantique Sud, sur le seuil d'Agulhas ce niveau est Crétacé inférieur. Dans le Golfe de Gascogne, au bas de la marge on trouve du Crétacé également. Dans tous les cas on est donc amené à donner à la base de la couche sédimentaire meuble un âge correspondant à la limite Jurassique-Crétacé (140 MA).

Le début du second épisode marque la limite entre la dorsale médio-océanique et les bassins adjacents. C'est une limite structurale et sédimentaire. Le réseau d'anomalies magnétiques qui couvre la dorsale s'arrête toujours à cette limite (l'anomalie 32 de J. R. Heirtzler *et al.*, 1968). Cette limite se place vraisemblablement au début du Cénozoïque, il y a à peu près 70 MA.

Le début du troisième épisode d'expansion correspond à un contact qui est visible sur la dorsale médio-atlantique elle-même, entre la zone de crête et les flancs. Il est marqué par une variation très rapide de l'épaisseur des sédiments et par un changement de caractère des anomalies magnétiques. On le date à 10 MA. Avant ce nouveau cycle d'expansion on pense qu'il y a eu une interruption du mouvement d'expansion de 10 à 30 MA.

On pourrait peut-être schématiser, en s'appuyant sur les datations des forages JOIDES, l'histoire de la formation de l'Atlantique de la façon suivante :

A) PREMIER ÉPISODE : CRÉTACÉ (140 à 80 MA).

Les premières cassures entre l'Amérique du Nord et l'Afrique datent probablement du Trias : or d'après les résultats du JOIDES, à cette époque, l'Atlantique Nord était une mer fermée ayant 1 500 à 2 000 km de large. Mais les mouvements se seraient accentués au Crétacé inférieur et moyen

2. Note en cours d'impression : les derniers forages JOIDES ont trouvé du Callovo-Oxfordien à la limite de la marge américaine, ce qui daterait l'ouverture de l'Atlantique.

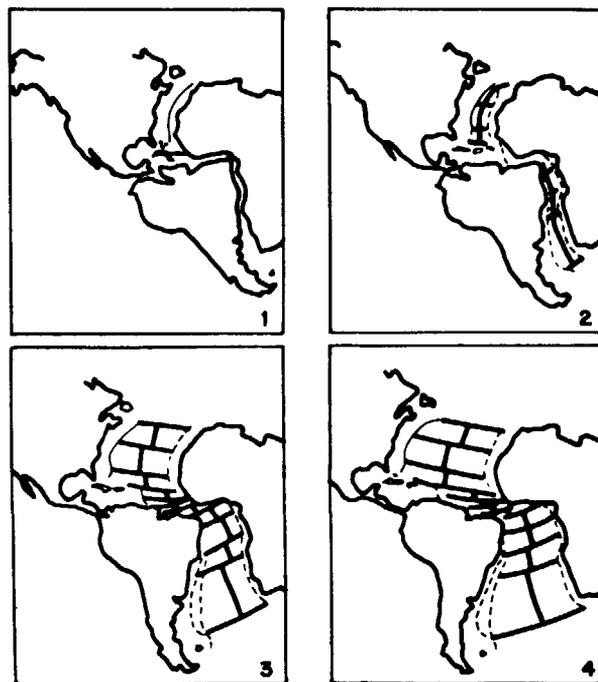


FIGURE 18

L'épisode d'expansion durant le Secondaire.
(D'après X. Le Pichon, 1968).

Ces reconstructions sont faites en admettant que l'Amérique du Nord et du Sud se sont séparées de l'Afrique simultanément il y a 120 MA, et ont gagné la position de l'anomalie 32 après un simple mouvement de rotation.

The Mesozoic episode of spreading in the Atlantic.

These reconstructions were obtained by assuming that North and South America parted simultaneously from Africa 120 m. y. ago and reached the position corresponding to anomaly 32 after a single rotational movement.

dans l'Atlantique Nord alors que la cassure se formait dans l'Atlantique Sud (fig. 18). A la fin de cet épisode étaient créés les bassins Atlantique, Indien et le Pacifique du NW.

FIGURE 19

L'Atlantique au moment de l'anomalie 32. (D'après X. Le Pichon, 1968).

Le taux moyen de renouvellement en cm/an pour chaque bloc est obtenu en supposant un taux constant d'expansion entre 120 et 70 MA.

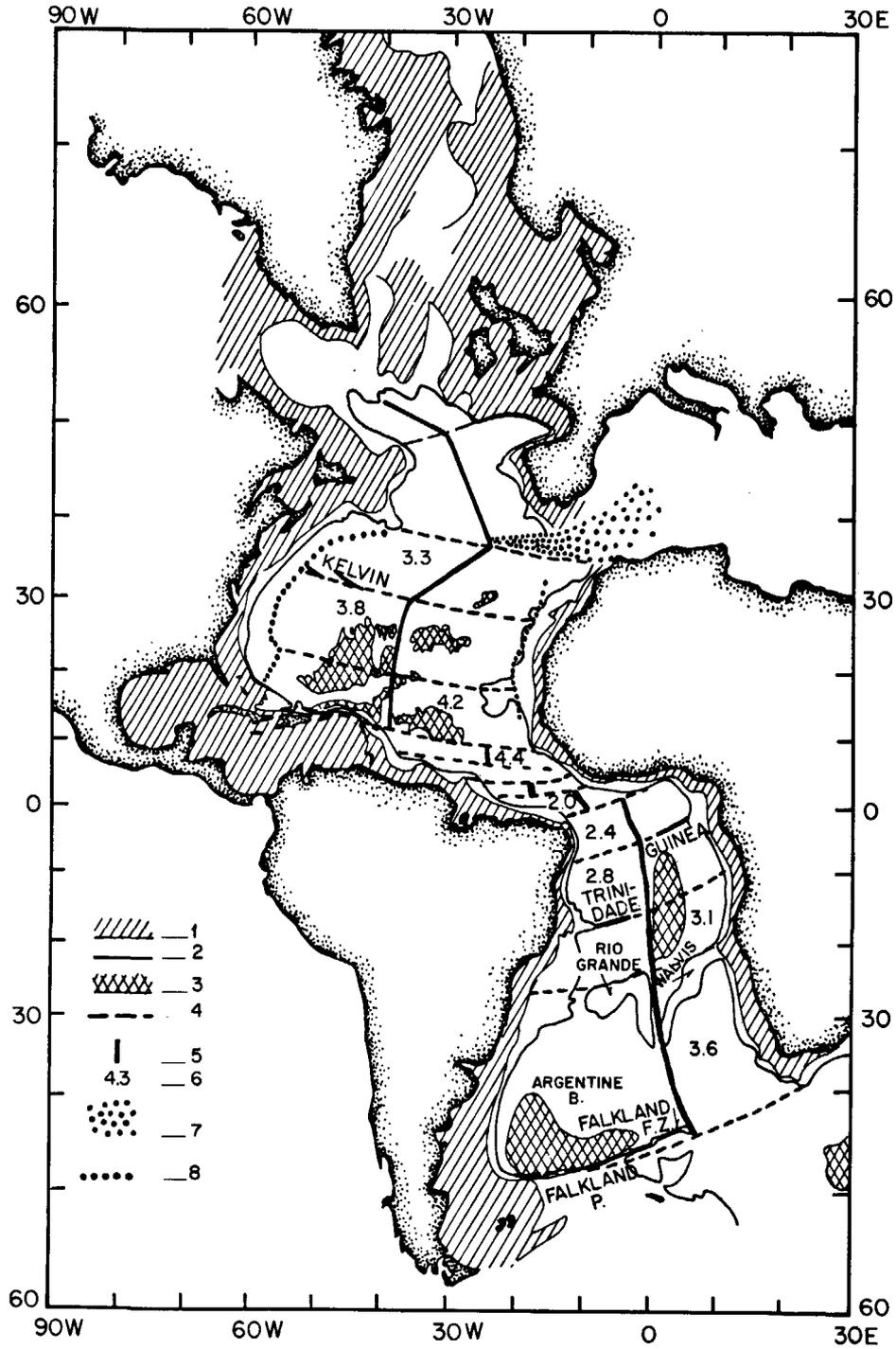
- | | |
|--|---|
| 1. limite des 1 000 brasses. | 5. axe de la dorsale. |
| 2. limite des 2 000 brasses. | 6. taux d'expansion. |
| 3. limite des 3 000 brasses. | 7. lacune entre blocs. |
| 4. petits cercles de rotation (failles de transformation). | 8. limite des zones magnétiques calmes. |

The Atlantic at the time of anomaly 32.

The average spreading rate in centimeters per year for each block is obtained by assuming a constant rate of spreading between 120 and 70 m. y. ago.

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1. 1 000 FM. | 5. Ridge axis. |
| 2. 2 000 FM. | 6. spreading rate. |
| 3. 3 000 FM. | 7. gap between blocks. |
| 4. small circles of rotation. | 8. quiet magnetic zone boundary. |

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE



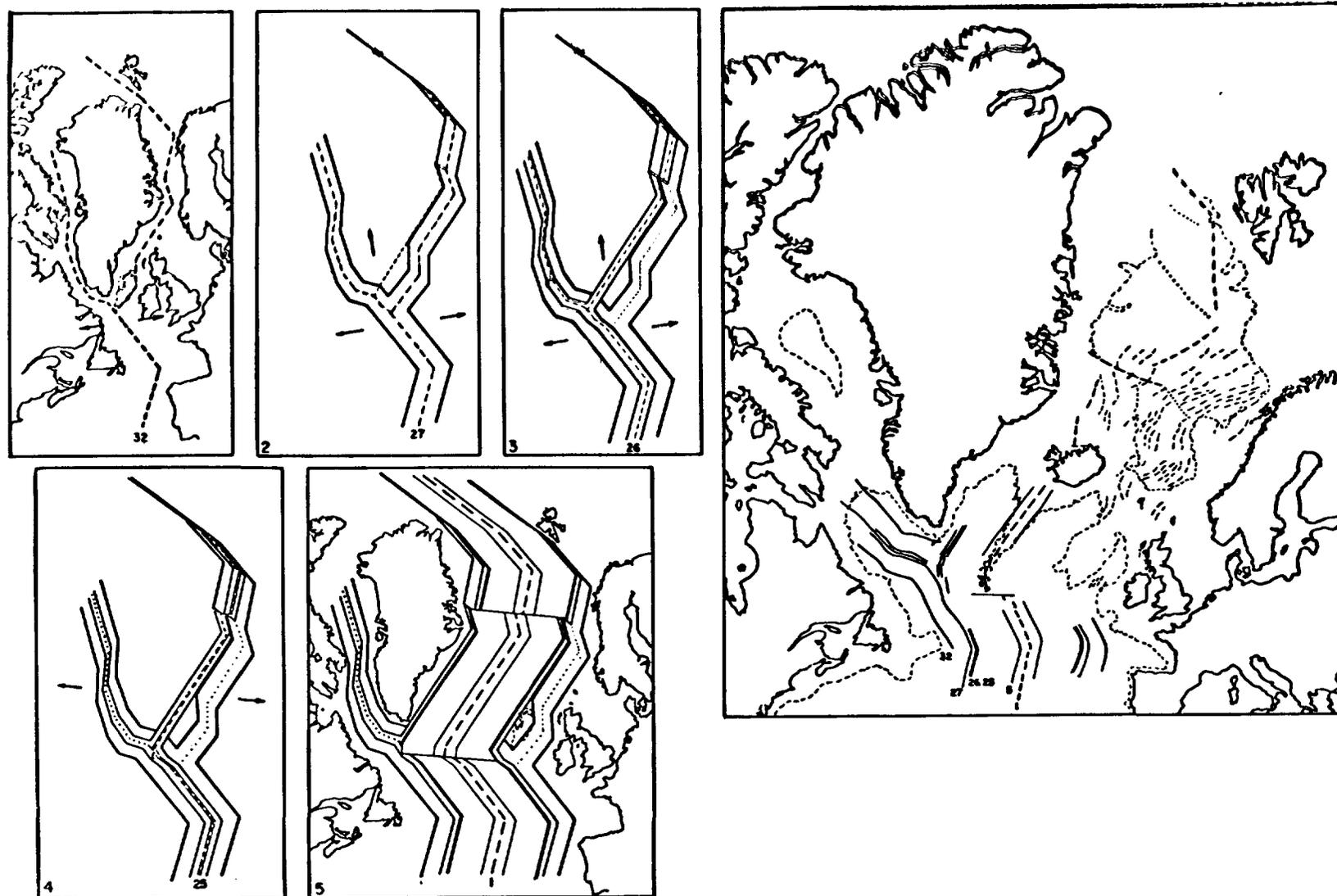


FIGURE 20

Schéma du renouvellement des fonds dans la partie septentrionale de l'Atlantique Nord montrant les alignements magnétiques. (D'après M. A. Mayhew, 1968).

Les numéros des anomalies se réfèrent au modèle de J. R. Heirtzler *et al.* (1968).

Schematic spreading history for northern North Atlantic showing magnetic lineations. (After M. A. Mayhew, 1968).

*Numbers refer to anomaly numbering system for model of J. R. Heirtzler *et al.* (1968).*

On ne peut entrer dans le détail de cet épisode car les « marques magnétiques fossiles » ne sont pas encore bien connues. On sait par contre qu'il se termine par le dépôt de « l'horizon A » qui est formé de sédiments riches en silice et transformés en cherts. Ce dépôt sédimentaire est probablement lié à la régression qui suivit la phase majeure transgressive du Crétacé. Durant cette phase la formation des bassins et la continuité Canada-Groënland-Europe entraîne un grand mouvement de cisaillement entre l'Afrique et l'Europe conduisant à des compressions W-E sur les structures N-S antérieures.

B) SECOND ÉPISODE : CÉNOZOÏQUE INFÉRIEUR (80-40 MA).

C'est de cette période que date le tracé des dorsales médio-océaniques tel que nous le connaissons (fig. 19). Les anomalies magnétiques produites durant cet épisode (anomalies 32 à 5 de J.R. Heirtzler *et al.*, 1968) sont suivies dans l'Océan Atlantique Sud et tout récemment en mer du Labrador et en mer de Norvège. Dans l'Atlantique Nord la succession des anomalies est moins bien définie. Dans tous les cas, ces anomalies débutent à la limite de la dorsale actuelle, là où s'arrête le réflecteur A. Les roches les plus anciennes récoltées sur tout le système des dorsales datent du Maestrichtien (70 - 60 MA). On est donc amené à placer le début de cet épisode au début du Cénozoïque. C'est de cet épisode que daterait l'ouverture de l'Atlantique Nord au N de la ligne Terre-Neuve - Gibraltar. JOIDES donne 75 MA pour l'anomalie 32.

M. A. Mayhew a proposé dans sa thèse (1969) le mode d'ouverture suivant pour l'Atlantique Nord (fig. 20). Au moment de l'anomalie 32 (75 MA) il y a écartement entre le Canada et le Groënland et, dans un deuxième temps, entre le Groënland et l'Europe. L'expansion se produit suivant ces directions jusqu'à l'anomalie 27. A ce moment l'axe d'expansion de la partie Groënland-Europe se décale légèrement vers l'W en isolant un bloc de la partie Groënland qui deviendra le banc de Rockall, et l'expansion s'arrête alors en mer du Labrador. Ultérieurement l'expansion se poursuivra sur l'axe Est (Reykjanes, Islande, Spitzberg).

Le résultat de cette ouverture serait un vaste mouvement de cisaillement entre l'Europe et l'Afrique, opposé au mouvement du Crétacé. Ce glissement vers le SE de l'Eurasie par rapport à l'Afrique aurait donc entraîné des mouvements complexes de compression et de coulissage dans la Téthys. A partir de ce moment l'Europe et l'Afrique sont dans une position méridienne identique à celle occupée de nos jours (fig. 21).

Donc à l'Eocène (60 MA) la mer du Labrador aurait fini de s'ouvrir, et le mouvement d'expansion dans cette zone s'arrêterait.

A l'Oligocène (40 à 25 MA), dans la partie de l'Atlantique Nord située au N de la ligne Terre-Neuve - Gibraltar, le renouvellement semble se ralentir pour stopper complètement au Miocène (25 à 10 MA). Cet arrêt d'expansion par blocage des plaques en profondeur correspond à une phase

compressive maximale. Le bloc Amérique chevauche vers l'W le système de fosse adjacent. A cette époque également (Oligocène - Miocène) cette phase compressive culmine dans le domaine méditerranéen; l'Afrique du Nord et l'Europe viennent alors en contact (L. Glangeaud, 1968).

C) TROISIÈME ÉPISODE : CÉNOZOÏQUE SUPÉRIEUR (10 MA - ACTUEL).

Le dernier épisode semble associé à l'anomalie 5, soit il y a 10 MA (Miocène supérieur ou Pontien). Il est marqué, dans l'Atlantique Nord, par un réajustement des mouvements d'ouverture. Ce renouvellement s'effectue à vitesse moindre et donne naissance à la région de crête dépourvue de sédiments.

Ce système d'ouverture ne pourra être confirmé, durant cette période, que par une étude détaillée des systèmes de microfractures. La Méditerranée durant cette époque serait le siège de mouvements de compression pure³.

CONCLUSION

Il reste bien entendu bien des points obscurs et il ne faut pas attribuer aux reconstructions lointaines fondées sur l'hypothèse des plaques rigides une très grande précision. Le schéma ici présenté, par exemple, n'explique pas la différence entre les parties de l'Atlantique situées de part et d'autre du 30° S qui présentent des morphologies et des recouvrements sédimentaires différents. D'autre part la continuité du renouvellement ou son développement par épisodes semble varier suivant les domaines géographiques et les périodes géologiques. On pense actuellement que le renouvellement dans l'Atlantique Sud a été continu alors qu'au N des Açores il subit des interruptions suivant le schéma proposé.

Cependant, en dépit des interrogations et imprécisions qui subsistent, on doit reconnaître que cette théorie apporte un schéma plausible à la dérive des continents au cours de périodes géologiques ayant laissé des traces magnétiques.

L'effort national et international à produire actuellement doit porter sur l'étude de détail des zones de fractures qui permettront de déterminer les pôles de rotation, et l'analyse détaillée des roches du domaine océanique qui sont susceptibles de fournir des preuves concrètes de grande valeur.

3. Note en cours d'impression : les études actuellement menées par l'équipe du COB sur la ligne Açores-Gibraltar et en Méditerranée permettront de préciser la genèse du bassin méditerranéen.

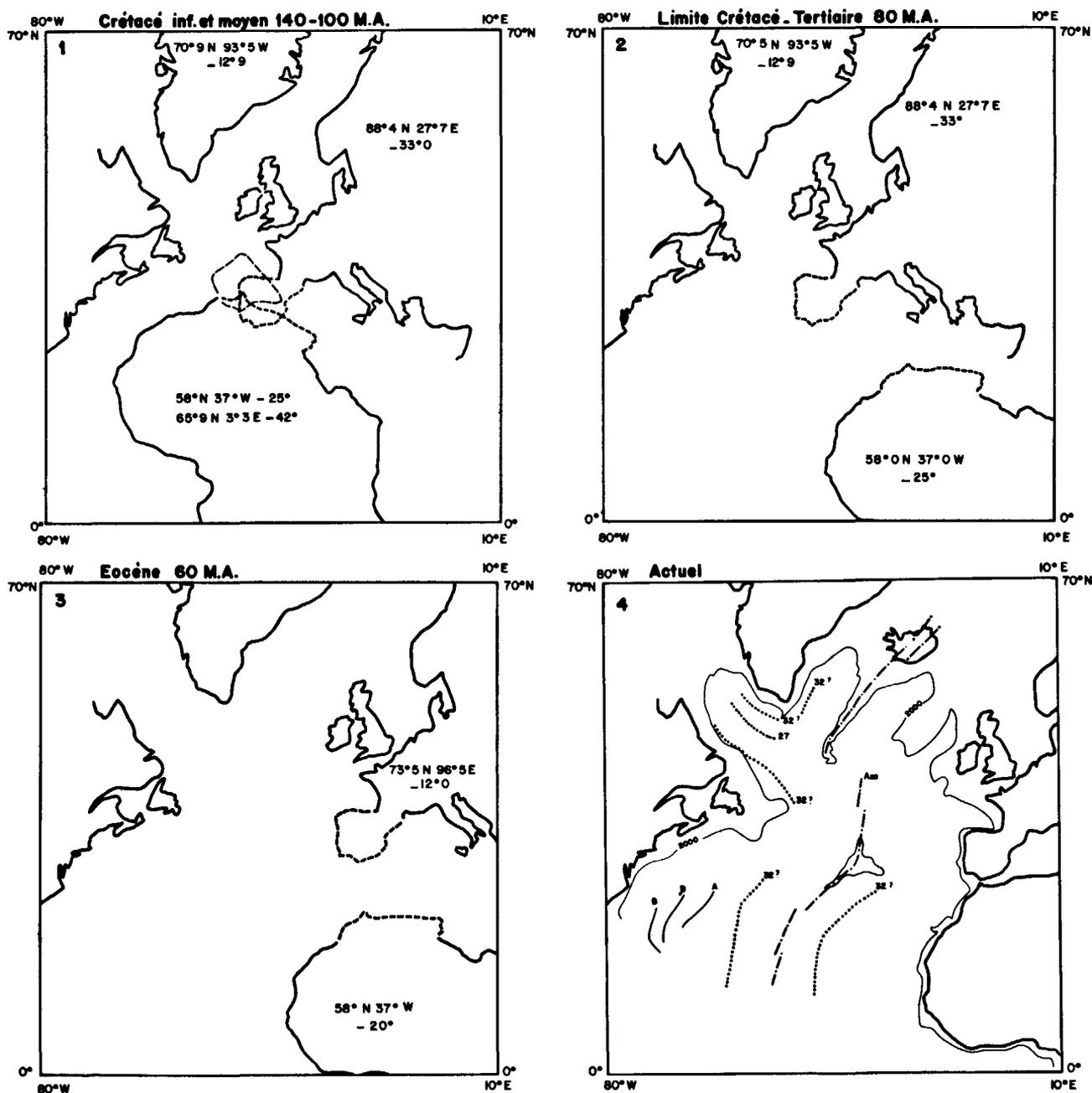


FIGURE 21

Récapitulation des mouvements des différents continents durant l'ouverture de l'Atlantique Nord.
(D'après X. Le Pichon, 1968).

Les centres et angles de rotation sont indiqués pour chaque continent. L'Amérique du Nord est dans sa position actuelle.

*Recapitulation of the movements of the continents during the opening of the North Atlantic.
Centers and angles of rotation are shown for each continent, North America is shown in its present position.*

LA DORSALE MÉDIO-ATLANTIQUE

REMERCIEMENTS

Je remercie Messieurs X. Le Pichon et J. Bonnin qui m'ont procuré la bibliographie nécessaire et ont critiqué et lu ce manuscrit au cours de fréquentes discussions.

BIBLIOGRAPHIE

- AGGASSIZ, A. (1906). — General report of the Albatross Expedition, 1904-1906. *Mem. Mus. Comp. Zoology*, Harvard, 33, p. 1-75.
- BULLARD, E. (1969). — The Origin of the Oceans. *Scientific American*, sept. 1969, p. 66-75.
- COULOMB, J. (1969). — *L'expansion des fonds océaniques et la dérive des continents*. P.U.F., Paris, 224 pp.
- DEWEY, J. (1969). — Continental Margins: a model for Conversion of Atlantic Type to Andean Type. *Earth and Planetary Science Letters*, 6, p. 189-197.
- DIETZ, R.S. (1961). — Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, vol. 190, p. 854-857.
- GLANCEAUD, L. (1968). — Les méthodes de la Géodynamique et leurs applications aux structures de la Méditerranée occidentale. *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.*, vol. X, fasc. 2, p. 83-136.
- HEEZEN, B.C., THARP, M. et EWING, M. (1959). — The floors of the oceans. I. The North Atlantic. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 65, 122 pp.
- HEIRTZLER, J.R., DICKSON, G.O., HERRON, E.M., PITMANN W.C. III et LE PICHON, X. (1968). — Marine Magnetic Anomalies, Geomagnetic Field Reversals, and Motions of the Ocean Floor and Continents. *J. Geophys. Res.*, vol. 73, n° 6, p. 2119-2136.
- HEKINIAN, R. (1968). — Rocks from the Mid-Oceanic Ridge in the Indian Ocean. *Deep Sea Res.*, vol. 15, p. 195-213.
- HESS, H.H. (1960). — Evolution of ocean basins. *Report to office of Naval Research on research supported by O.N.R. Contract Nr 1858*, (10), 38 pp.
- LE PICHON, X. (1967). — Etude géophysique de la dorsale médio-atlantique. *Cah. Océanogr.*, vol. 18, p. 551-620 et 669-713.
- LE PICHON, X. (1968). — Sea Floor Spreading and Continental Drift. *J. Geophys. Res.*, vol. 73, n° 12, p. 3661-3697.
- LE PICHON, X. (1968). — L'ouverture de l'océan nord-atlantique depuis le Mésozoïque d'après les données magnétiques des océans. *Colloque C.N.R.S., Villefranche-Monaco*, sept. 1968.
- MAYHEW, M.A. (1968). — Marine Geophysical Measurements in the Labrador sea: Relations to Precambrian Geology and Sea Floor Spreading. Thèse, Columbia University. 90 pp.
- MELSON, W.G., BOWEN, V.T., VAN ANDEL, T.H. et SIEVER, R. (1966). — Greenstones from the Central Valley of the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, vol. 209, n° 5023, p. 604-605.
- MÉNARD, H.W. (1964). — *Marine Geology of the Pacific*. Mc Graw-Hill, New York, 271 pp.
- MÉNARD, H.W. (1969). — The Deep-Ocean Floor. *Scientific American*, sept. 1969, p. 127-142.
- MORGAN, W.J. (1968). — Rises, Trenches, Great Faults and Crustal Blocks. *J. Geophys. Res.*, vol. 73, n° 6, p. 1959-1982.
- MURRAY, J. et PEAKE, R.E. (1904). — On recent contributions to our knowledge of the floor of the North Atlantic Ocean. *Sp. Publ. Roy. Geograph. Soc.*, London, 42 pp.
- PETERSON, M.N.A. (1969). — Rapport JOIDES.
- TALWANI, M., LE PICHON, X. et EDWING, M. (1965). — Crustal structure of the Mid Ocean Ridges, 2, Computed model from gravity and seismic refraction data. *J. Geophys. Res.*, vol. 70, n° 2.
- VINE, F.J. et MATTHEWS, D.H. (1963). — Magnetic Anomalies over Oceanic Ridges. *Nature*, vol. 199, n° 4897, p. 947-949.
- VINE, F.J. et HESS, H.H. (1968). — Sea-Floor Spreading. Manuscrit prepared for "the sea", vol. IV.
- WEGENER, A. (1937). — *La genèse des continents et des océans*. Edit. Librairie Nizet et Bastard, Paris, 236 pp.
- WILSON, J.T. (1965). — A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, vol. 207, n° 4995, p. 343-347.
- WILSON, J.T. (1968). — Révolution dans les sciences de la terre. *Vie et Milieu*, série B, t. XIX, fasc. 2, p. 395-424.

Manuscrit déposé le 9 mars 1970.