

Le 29 Mars 1968, notre ancien, Xavier LE PICHON, de passage à Strasbourg, nous a présenté, sous forme d'une causerie très libre, les résultats de ses travaux les plus récents sur les rides médio-océaniques. Nous avons enregistré cette conférence très convaincante, et nous vous en faisons part ici sans en avoir changé la forme.

Brochure issue de la revue Impetus, du 8 avril 1969. Il s'agit du bulletin de liaison de Geophysse, association des amis et anciens élèves de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (actuellement École et Observatoire des Sciences de la Terre), école d'ingénieurs dont Xavier Le Pichon est un ancien élève. Il dresse dans ce texte un résumé à chaud des débuts de la théorie qui n'est pas encore appelée la tectonique des plaques.
Scan F. Chambat, mars 2025.

Je vais essayer simplement de vous donner une idée de la recherche en Géophysique Marine aux Etats Unis pendant les deux années passées et plus particulièrement ce que j'ai fait personnellement. Une bonne partie de ce que je vais dire est en cours d'impression en ce moment dans plusieurs articles du J.G.R. (1) (voir aussi (2)).

Depuis deux ans vous savez que le vent a tourné et que la dérive des continents est redevenue l'hypothèse sur laquelle tout le monde travaille et ceci est dû en grande partie aux résultats de la Géophysique Marine, en particulier à l'introduction de l'hypothèse du "spreading floor" qu'on peut peut-être appeler le renouvellement des fonds océaniques et qui a été avancée par un géologue américain HESS (3) et immédiatement après par un autre DIETZ (4).

Comment se fait-il qu'en si peu de temps il y ait eu un véritable retournement des esprits qui, aux Etats-Unis, est complet ? La quasi totalité des chercheurs travaillant sur les problèmes de Géophysique et de Géologie marines croient que l'hypothèse du "spreading floor" peut expliquer l'ensemble de la géologie, non seulement océanique mais continentale.

Je vais donc rapidement passer sur les étapes de cette hypothèse et j'en viendrai ensuite au travail personnel un peu plus spéculatif en cours d'impression au J.G.R.

Quand je suis arrivé au Lamont il y a 9 ans, il y avait un dogme bien établi qui était la permanence des Océans et des Continents. Pourquoi ? Je crois d'abord que l'on était encore sous l'effet d'un véritable choc qui avait été la découverte d'une différence fondamentale des structure de la croûte océanique* ; on ne voyait pas de preuve de continent effondré. A vrai dire on ne savait pas trop ce qu'il fallait entendre par "continent effondré" et personne n'en avait trouvé de trace.

L'hypothèse qui avait eu le plus de retentissement, celle des courants de convection avec les "tectogènes" de VENING MEINESZ, avait été mise sérieusement en question puisqu'on s'attendait à trouver des tectogènes très épais * et de la croûte continentale

sous les fosses océaniques et que les mesures de sismique réfraction et de gravimétrie avaient montré qu'en fait il n'y avait pas de tectogène et qu'il y avait simplement un épaissement progressif de la croûte vers le continent, épaissement que l'on trouvait aussi bien sous une fosse que sous une marge continentale normale.

Le troisième point qui a fait douter de ces mouvements était que les marges continentales là où elles avaient été bien étudiées, c'est-à-dire dans l'Atlantique, étaient couvertes par des épaisseurs allant jusqu'à 2 km de sédiments meubles, stratifiés et qui ne montraient aucune trace de déformation. On disait "s'il y a un mouvement différentiel entre le continent et l'océan, si le continent dérive sur l'océan ou s'il y a quelque chose qui monte près des dorsales et qui descend près des continents pourquoi ne voit-on rien près de la bordure continentale ?"

Toutefois très vite on s'est posé un premier problème : pourquoi y a-t-il si peu de sédiments dans les océans ? KUENEN avait fait les calculs des pertes par érosion qui indiquaient qu'il devait y avoir au moins 2 km de sédiments dans les océans.

Une carte récente représente en gros la distribution des sédiments dans les océans telle qu'on la connaît maintenant par sismique réflexion. Les zones hachurées sont celles où on a plus d'une seconde de pénétration en double temps ce qui correspond à peu près à 1 km de sédiments. Les zones où vous avez des épaisseurs notables de sédiments sont uniquement le long des bordures continentales et les régions des grands cônes à la base du Gange et de l'Indus ; dans le Pacifique elles sont limitées à la région Sud de l'Alaska ; ces zones comprennent également les golfes comme le golfe du Mexique. Donc très peu de sédiments, la couverture sur le Pacifique est de l'ordre de 50 à 100 m ; dans l'océan Indien elle est parfois de moins de 10 m. Dans l'Atlantique la moyenne est entre 300 et 500 m. Il y a un important déficit de sédiments difficile à expliquer.

La première explication a été que les sédiments se trouvent dans la couche sous-jacente qui a une vitesse de transmission par compression de l'ordre de 5 km/s et qui pourrait donc être du sédiment consolidé. Or la sismique réflexion en continu révèle que cette couche inférieure a une très grande rugosité ;

aux endroits où elle sort des sédiments et où l'on a pu draguer, on a obtenu des basaltes ; il semble donc qu'il s'agisse plutôt d'une couche ignée que d'une couche sédimentaire.

En partie à la suite de ces constatations, HESS en 1959 et DIETZ en 1961 proposèrent une hypothèse de renouvellement des fonds dans laquelle la croûte est couplée au manteau sous-jacent. Je pense que vous connaissez tous cette hypothèse. Le schéma extrêmement simple qu'il a publié paraît cependant rigoureusement exact : montée de nouvelle matière à l'axe des dorsales, séparation des mouvements que HESS explique par couplage de la croûte et du manteau sous-jacent. Vous avez deux cas possibles le long des continents : 1) ou bien le mouvement est couplé avec le continent, c'est-à-dire que le continent bouge en même temps et à la même vitesse : il n'y a aucun mouvement différentiel à la bordure continentale, c'est le cas de l'Atlantique, il n'y a aucune raison de s'attendre à une structure particulière dans les sédiments ; 2) ou bien le continent est bordé par une fosse ou par une zone de compression et vous avez un découplage de la croûte océanique et du continent avec descente.

Ce schéma jugé trop simpliste n'a pas été suivi par beaucoup de personnes et je n'étais pas du nombre de celles qui ont suivi. Le premier problème était celui de la répartition des crêtes des dorsales par rapport aux zones de descente (fosses océaniques) : il y a des crêtes de dorsales dans l'Atlantique, dans l'Océan Indien, dans le Pacifique mais les fosses sont pratiquement limitées au Pacifique et aux Caraïbes. Il y a une dissymétrie évidente entre les dorsales et les fosses ; par quel système est-il possible de maintenir la conservation de la masse si la terre n'est pas en expansion ? Deux ou trois auteurs, dont CAREY, estimèrent qu'il y avait expansion mais le taux d'expansion était tel que la plupart des physiciens rejetèrent l'hypothèse.

L'étape suivante qui est peut-être la plus importante est due à deux Anglais, VINE et MATTHEWS (5). En 1963, ceux-ci publièrent un article dans Nature. Ils y soutenaient que s'il y a mécanisme de "spreading floor", il y a un corollaire inévitable qui est la formation d'anomalies magnétiques linéaires parallèles à l'axe des crêtes. En effet le champ magnétique de la terre change de sens périodiquement. En supposant que le champ s'inverse tous les millions d'années, si le rythme d'expansion est de 1 cm/an, on a 10 km. de croûte magnétique aimantés normalement puis 10 km. aimantés en sens inverse etc..

Ils appliquèrent ceci à la région du Pacifique N.E. où une étude détaillée avait révélé des anomalies magnétiques extraordinaires^{ment} linéaires et qui pouvaient être mises en corrélation de chaque côté des grandes zones de fracturations avec des déplacements horizontaux allant jusqu'à 1500-1800 km. Seulement on ne voyait pas de relation bien claire entre ces zones magnétiques et la crête de la dorsale. Les régions où l'on reconnaissait bien la crête de la dorsale comme dans l'Océan Indien (crête de Carlsberg) ou comme dans l'Atlantique Nord sont celles où la linéarité des anomalies n'est pas facile à démontrer excepté pour l'anomalie axiale.

L'intérêt de l'hypothèse était évident puisqu'elle introduisait une véritable horloge qui permettait de dater la croûte océanique dans la mesure où on savait dater les inversions du champ magnétique terrestre et qu'elle permettait de faire presque la cinématique de la tectonique puisqu'on pouvait établir une vitesse de formation de roche à l'axe des dorsales. A l'époque de l'article de VINE et MATTHEWS, cette échelle des inversions était encore mal connue mais elle semble maintenant bien établie jusqu'à 3,5 M d'années, et comme les inversions ne sont pas régulières on doit s'attendre à une forme caractéristique pour les anomalies qu'on peut reconnaître. On peut donc par conséquent les dater et mesurer la vitesse de dérive.

Cette hypothèse a connu une confirmation rapide depuis trois ans sur tous les plans.

- Distribution des sédiments. : On des gros travaux du Lamont était de reconnaître les réflecteurs caractéristiques dans la couche sédimentaire (croquis). Lorsqu'on avait repéré un réflecteur bien tracé, on essayait de le suivre jusqu'au moment où pour des raisons d'érosion ou de tectonique le réflecteur apparaissait à la surface, et alors de le carotter et le dater ; de cette manière on a pu mettre en évidence un réflecteur caractéristique dans les bassins atlantiques en particulier les bassins W, dans la mer des Caraïbes et dans tout le Pacifique ouest.

Ce réflecteur a été daté dans trois endroits différents comme appartenant au crétacé supérieur. Si on prend le bassin Atlantique Ouest, il y a 1 km de sédiments puis le réflecteur marqué par une zone de turbidites puis une seconde couche de sédiments de 1 à 2 km d'épaisseur.

Dans le Pacifique il y a beaucoup moins de sédiments qui sont essentiellement pélagiques : 300 m de sédiments "transparents" puis 300 à 500 m de sédiments opaques dont la partie haute est du crétacé supérieur. Ce réflecteur s'arrête chaque fois qu'on arrive au bord de la dorsale dans l'Atlantique, et dans le Pacifique chaque fois qu'on arrive près de la dorsale du Pacifique Est. Ceci est le premier point troublant.

D'autre part sur la dorsale il y a peu ou pas de sédiments (0m à 50 m à 1000 km de l'axe).

De plus on a trouvé des endroits où la base des sédiments (ou ce qui semble l'être) affleure : à chaque fois on a eu du crétacé inf. : Albien, Cénomaniens.

On peut expliquer ce fait en disant que dans l'Atlantique et dans le Pacifique la base des sédiments se trouve au Jurassique supérieur ou au Crétacé Inférieur, qu'on passe à des sédiments profonds pendant l'Albien (120 M d'années) jusqu'à ce réflecteur appelé réflecteur "β" ; puis il y a des turbidites qui correspondent au passage Crétacé-Tertiaire (réflecteur A) et enfin des sédiments qui peuvent être pélagiques ou des turbidites.

Donc sur la base des observations faites sur les sédiments il faudrait que le fond des océans se soit renouvelé.

La deuxième confirmation s'est faite sur le plan magnétique. Voici un exemple de Pitman et Heirtzler du Lamont : l'anomalie magnétique est enregistrée au dessus de la dorsale du Pacifique Est par 40° de latitude sud, distance 1000 km, amplitude 1500 γ. Le profil est identique au-dessous mais pris dans l'autre sens : il y a correspondance pic pour pic avec le précédent sur 3000 à 4000 km de distance et c'est un cas remarquable où la géologie présente une symétrie parfaite. En dessous on peut voir le modèle simulé (Vine et Matthews classique) avec les diverses inversions connues ; les modèles donnés par les paléomagnéticiens donnent une simulation presque parfaite des anomalies là où on connaissait la distribution dans le temps des inversions. D'autre part on pouvait prédire quelles avaient été les inversions en supposant que le rythme d'expansion ait été le même dans la partie antérieure à 3,5 M. A. C'est ce qu'on a fait ici, ce qui a conduit à 10 M.A. au bout du profil. Le taux était de 4,5 cm par an de chaque côté de la crête de la dorsale ce qui fait une expansion totale de 9 cm/an, qui nous parut à tous extraordinairement grande.

Ceci est l'exemple le plus frappant, mais le seul fait qu'il existe nous a forcé à devenir des disciples du spreading floor.

On a reconnu ces distributions caractéristiques d'anomalies jusqu'au bord des fosses et on a pu corrélérer ces distributions d'océan en océan et donc arriver à une distribution relative des âges géologiques sur toute la surface des océans : on établit sur un certain profil une distribution normale, inverse ..., on le contracte pour un profil donné par le taux d'expansion correspondant (3 cm, 5 cm), on calcule les anomalies et puis on les compare à celles qui ont été observées. Il y a une part d'arbitraire, mais cette distribution n'est pas régulière du tout et même en comprimant ce serait un hasard extraordinaire que l'on arrive à simuler une distribution d'anomalies sur 1000 ou 2000 km. Or on l'a fait systématiquement dans tous les océans.

Voilà l'exercice auquel nous nous sommes attaqués au Lamont sous la direction de Heirtzler ; cette carte montre toutes les régions des océans où à l'époque (depuis on a fait beaucoup plus) on avait reconnu cette distribution caractéristique des anomalies. En admettant (hypothèse que je crois fausse) que la vitesse d'expansion était la même que celle qu'on mesurait à l'heure actuelle près de l'axe des dorsales et en prolongeant aussi loin qu'on le pouvait on a construit des cartes d'isochrones d'âge du fond des océans ; chaque ligne est une ligne d'âge égal en millions d'années. On a par exemple O.M. sur la crête jusqu'à 70 M, endroit où on perd la corrélation et qui se trouve à base du seuil de Rio Grande. On a de même 50 M juste avant la fosse des îles Sandwich ; dans l'Océan Indien, juste à la base du plateau continental 40 M d'années ; dans l'Océan Pacifique, à la base du plateau de Nouvelle Zélande 80 M. ; et l'on a le même âge dans l'Océan Pacifique Nord juste à l'endroit où l'on trouvait le réflecteur A (crétacé), ce qui semble indiquer que cette extrapolation n'est pas complètement fausse (ce serait approximativement 70 M.A.).

D'autre part on reconnaît les zones de fracturation le long desquelles les anomalies sont déplacées horizontalement parallèlement aux zones ; par exemple on a l'isochrone 80 M.A. qui est déplacée de 1500 km de part et d'autre de Mendocino.

Un fait intéressant est que les anomalies que l'on sait reconnaître, car il y en a d'autres, couvrent complètement le système des dorsales médio-océaniques et s'arrêtent à chaque fois juste à la limite du bassin, ce qui explique la discontinuité de structure, particulièrement frappante dans l'Atlantique, entre la

dorsale et les bassins. Jusqu'ici aucune corrélation bonne n'a été faite dans les bassins. La limite est celle qui dans le Pacifique correspond à la limite des zones de fracturation; c'est celle qui dans l'Atlantique correspond à la limite du bassin argentin, des bassins du Sud de l'Afrique, des bassins Nord-Ouest et Nord Est. Pour l'anomalie de Reykjanes (la première confirmation, car c'est la première fois qu'en faisant une étude détaillée d'une région qu'on savait reconnaître comme une crête de dorsale médio-océanique, on reconnaissait une linéarité et une symétrie parfaite des anomalies par rapport à l'axe) en appliquant la méthode de Vine et Matthews, on trouve un taux d'expansion de 0,95cm par an ce qui fait en gros 2 cm de séparation par an.

Le problème auquel je me suis attaqué personnellement était de déduire à partir de ces mesures une image des mouvements tectoniques sur l'ensemble du globe et d'essayer d'expliquer la séismicité, les fosses et les dorsales dans leur ensemble. Plusieurs autres personnes ont essayé de voir dans quelle mesure la séismicité peut être expliquée par ce schéma. L'idée de base est due à la constatation qu'il n'y a pas de distorsions dans les sédiments et pas apparemment de grandes zones de compression ni de grandes zones de déformation dans les bassins. Donc s'il y a déplacement, ces mouvements doivent être ceux de blocs rigides dans leur ensemble. De tels mouvements de blocs rigides dans leur ensemble flottant sur une sphère ne peuvent être que des rotations autour d'axes. D'autre part en appliquant simplement l'hypothèse de Vine et Matthews, s'il y a déformation, elle doit être à l'axe des dorsales où de la nouvelle surface est produite par expansion ou bien le long des bords extérieurs des blocs où de la surface est détruite, soit par compression dans les zones tectoniques, soit dans les fosses par enfoncement. Si ceci est vrai, il existe ce que Wilson a appelé les "transform-fault" : lorsque l'axe des dorsales est déplacé, comme dans l'Atlantique Equatorial, la crête est progressivement décalée par une série de failles (JGR 1968 12 p. 3663).

Cette série de failles constitue les lieux privilégiés d'activité sismique. Au delà la faille est simplement une cicatrice qui se déplace avec le socle dans son ensemble. Les travaux de Sykes ont montré qu'effectivement la sismicité est concentrée entre ces deux parties de crêtes et que l'on trouve très peu ou pas d'épicentres au delà. D'autre part dans les résultats de mécanisme au foyer, on trouve le mouvement prédit. L'intérêt de l'idée de Wilson, et la raison pour laquelle je l'ai introduite, c'est que si cette

hypothèse est vraie ces zones de fracturation nous indiquent la direction de mouvement de la croûte. En effet ce sont des régions où il n'y a ni création ni absorption de surface. Donc ces régions doivent être des petits cercles centrés sur les pôles de rotation. Comme on a fait les cartes de ces zones de fracturation, il n'est pas difficile de voir à quel petit cercle elles correspondent et puis de vérifier si pour un océan toutes les zones de fracturation correspondent à des petits cercles centrés en un même point.

Si ceci est vrai le taux d'expansion doit augmenter comme le sinus de la distance ($\sin \theta$) au pôle de rotation : à l'équateur il est maximum puis il diminue à nouveau. Donc pour un même pôle, on devrait trouver des taux d'expansion qui suivent cette loi sinusoïdale. Cette idée n'est pas de moi, elle a été exposée dans un travail en cours d'impression de Morgan (géologue travaillant à Princeton avec Hess). A ce stade les éléments d'information sont : les taux d'expansion à l'axe des dorsales partout où ils ont été mesurés et le tracé de zones de fracturation qui doivent être des petits cercles centrés sur un pôle de rotation.

Le travail consiste à prendre pour chaque dorsale l'azimut formé par la zone de fracturation avec le Nord à la crête et à déterminer ^{par} la méthode des moindres carrés quel est le pôle correspondant géométriquement pour chaque dorsale. On prend les taux d'expansion et on trouve de la même manière par la méthode des moindres carrés un pôle de rotation qui correspond à ces taux ; le taux d'expansion total est déterminé à l'équateur de rotation. Pour le Pacifique on a un centre de rotation déterminé par les zones de fracturation, et un centre déterminé par les taux d'expansion : ils tombent pratiquement au même point. Pour l'Océan Indien on a utilisé la région du Golfe d'Aden : on trouve un pôle en Lybie, c'est à dire que le mouvement de rotation est un mouvement de la partie Nord de l'Océan Indien par rapport à l'Afrique. Pour l'Atlantique au Sud de la région Açores-Gibraltar on a un pôle qui se trouve à l'Est du Groënland ; pour la partie au Nord de cette ligne, on a un pôle qui se trouve au S du Groënland. Enfin pour le Pacifique W, c'est-à-dire le mouvement qui intéresse la faille de San Andreas, on a un pôle qui se trouve également près du Groënland.

Pour montrer graphiquement comment ces déterminations correspondent en fait à la réalité j'ai employé un moyen très simple qui consiste à porter ces éléments sur une carte Mercator en mettant le pôle de la carte Mercator au

centre de rotation qu'on venait de déterminer ; dans ce cas là toutes les zones de fractures le long des petits cercles doivent être sur des parallèles et les crêtes, si elles sont perpendiculaires aux zones de fractures, doivent être sur des méridiens ; de plus la distance des crêtes aux anomalies magnétiques doit être constante. Voici ce qui se passe quand vous transferez le pôle de rotation au centre de projection Mercator pour le Pacifique Sud (id. p. 3667). Notez que toutes les zones de fractures sont le long des parallèles, que la crête est essentiellement Nord Sud jusqu'au Golfe de Californie et qu'en gros la distance à l'anomalie 5 (10 MA) est constante. Ce pôle n'est pas un mauvais pôle pour la région de l'Atlantique ; apparemment vous pouvez utiliser le même axe de rotation pour l'Atlantique et le Pacifique.

Le stade suivant est une tentative de détermination globale des mouvements tectoniques de tous les blocs l'un par rapport à l'autre. Pour résoudre le problème dans son ensemble il est nécessaire de faire de grandes simplifications ; étant donné que j'avais déterminé cinq mouvements de rotation je ne pouvais avoir à faire qu'à 6 blocs ; j'ai déterminé 6 blocs rigides sur la surface de la terre en leur donnant des frontières qui correspondent aux crêtes des dorsales et aux zones sismiques ou aux fosses et là je fus obligé de suivre mon intuition (id.p.3675). Vous voyez par exemple qu'il y a un bloc Pacifique, ce bloc est bordé d'un côté par une dorsale en expansion de l'autre côté par une zone sismique qui correspond à la Nouvelle Zélande et à la zone des fosses (Marianne, Japon etc.) ; vous avez une deuxième ligne de zone sismique que je suis obligé d'ignorer ; en fait il y a dédoublement de la ligne de compression.

Pour le bloc que j'ai appelé Amérique, je suppose qu'il n'y a pas de mouvement différentiel entre Amérique du Sud et Amérique du Nord ; en fait il y en a probablement un petit mais je suis obligé de simplifier pour résoudre le problème : on a une crête d'expansion, une zone de compression qui se trouve le long de la partie Ouest de l'Amérique du Sud et une zone de cisaillement dans l'Atlantique S.

Le bloc Afrique est pratiquement entouré entièrement de dorsales en expansion. Le bloc océan Indien est bordé par la zone de compression orogénique (Himalaya), la fosse de Java et par une zone de dorsales au Sud. Enfin le bloc Eurasie est bordé par la zone allant des Açores jusqu'à l'Himalaya à travers la Méditerranée et par la dorsale qui continue Reykjanes jusque dans l'Arctique.

Si l'on admet l'hypothèse de base et que l'on accepte l'idée des 6 blocs qui est une première approximation, on peut déterminer le mouvement d'un bloc par rapport à l'autre et c'est ce que j'ai fait, les vecteurs représentés à un certain nombre de points le long de la frontière peuvent être soit de compression, soit de dilatation.

Dans l'ensemble on arrive à un schéma qui semble correspondre aux faits, en particulier en ce qui concerne les mécanismes au foyer dans les régions orogéniques principales. Il y a l'expansion là où on trouve de l'expansion et compression là où la plupart des gens aiment à voir de la compression.

Conclusion : Une fois admise l'hypothèse du Spreading floor, il est très difficile d'échapper à des schémas de ce genre qui semblent pourtant trop audacieux à nombre de géologues.

BIBLIOGRAPHIE

- (I) WC PITMAN III, EM. HERRON, JR HEIRTZLER, JGR, 1968, vol. 73 n° 6, pp. 2069-2086.
- (I) FO. DICKSON, WC PITMAN III, JR HEIRTZLER, *ibid.*, pp. 2087-2100
- (I) X LE PICHON, JR HEIRTZLER, *ibid.*, pp. 2101-2118
- (I) JR HEIRTZLER, GO DICKSON, EM HERRON, WC PITMAN ., X LE PICHON, *ibid.* pp. 2119-2136
- (I) X LE PICHON, JGR, vol. 73 n° 12, pp. 3661-3698 (abondante bibliographie, résumant ce qui a été fait à ce jour sur le sujet)
- (2) DH MATTHEWS, C.A. WILLIAMS, EPSL, 1968, vol. 5 n° 4, pp. 251-252
- (3) H.H. HESS in a volume in honor of A.F. BUDDINGTON, Geological Society of America, 1962, pp. 599-620.
- (4) R.S. DIETZ, Nature, 1961, n° 200, p. 1035
- (5) J F.J. VINE, D.W. MATTHEWS, Nature, 1963, n° 199, p. 947
- (6) B. ISACKS, J. OLIVER, LR SYKES, JGR, 1968, vol.73, n° 18, pp. 5855-5899.

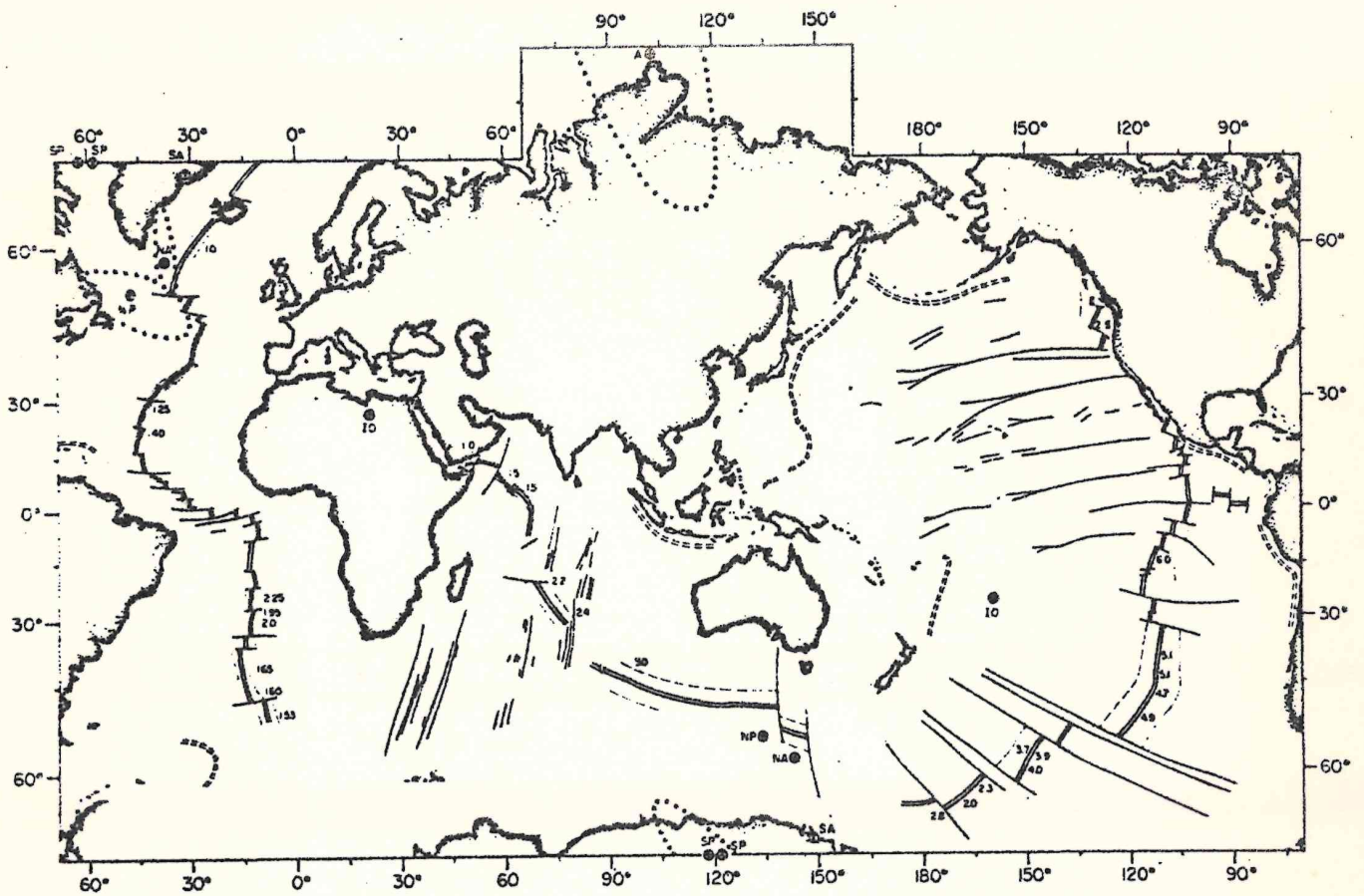


FIG. 1

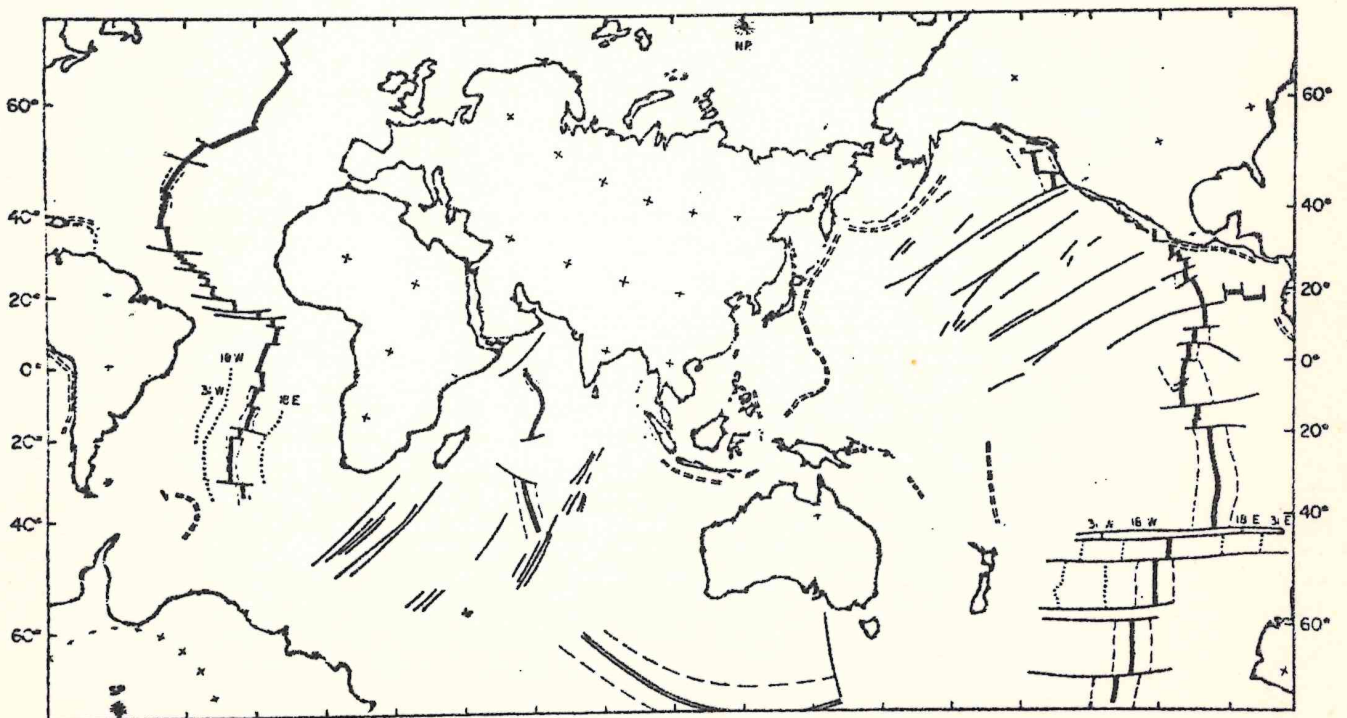


FIG. 2

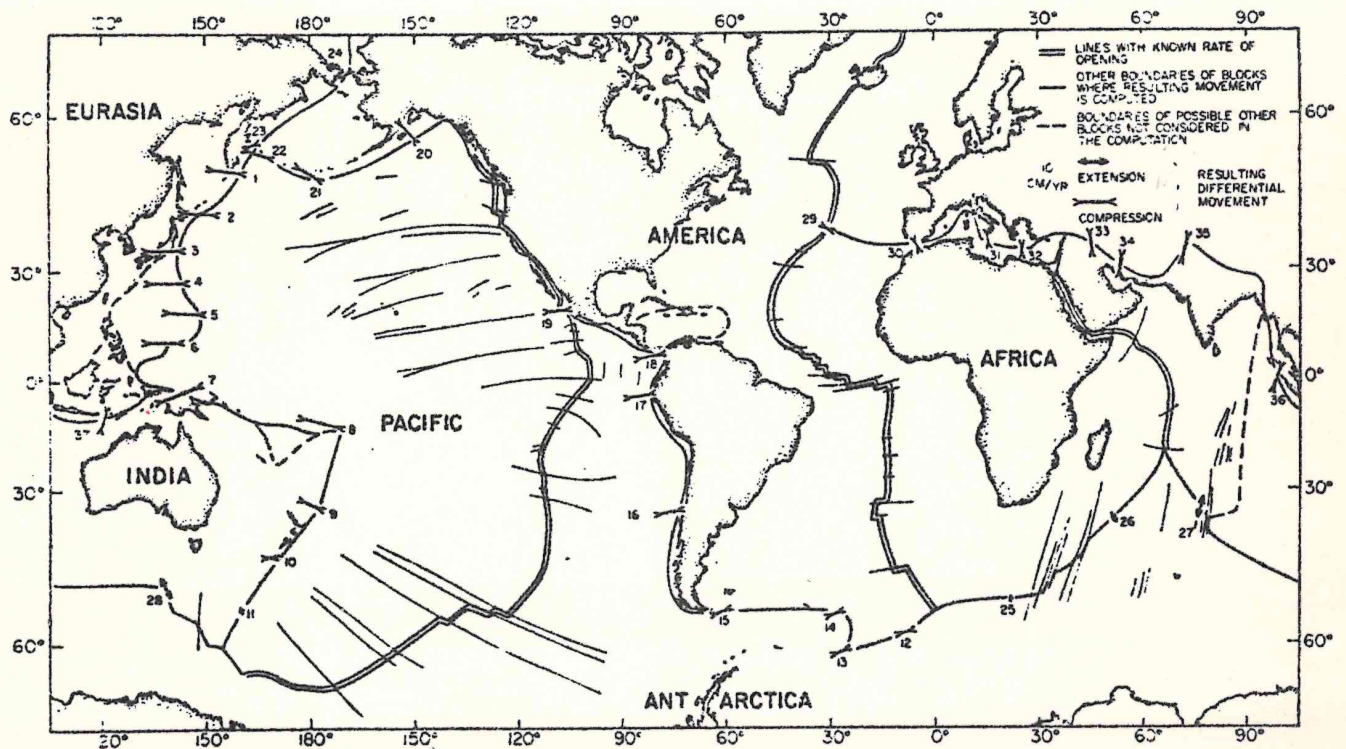


Fig. 6. The locations of the boundaries of the six blocks used in the computations. The numbers next to the vectors of differential movement refer to Table 5. Note that the boundaries where the rate of shortening or slippage exceeds about 2 cm/yr account for most of the world earthquake activity.

Fig. 1. Available data on sea-floor spreading. The axes of the actively spreading mid-ocean ridges are shown by a double line; the fracture zones by a single line; anomaly 5 (≈ 10 m.y. old) by a single dashed line; the active trenches by a double dashed line. The spreading rates are given in centimeters per year. The locations of the centers of rotation obtained from spreading rates are shown by \times ; those obtained from the azimuths of the fracture zones by $+$. NA stands for North Atlantic; SA for South Atlantic; NP for North Pacific; SP for South Pacific; IO for Indian Ocean; A for Arctic. The ellipses drawn around the NA, NP, SP, and A centers of rotation obtained from the fracture zones are the approximate loci of the points at which the standard deviation equals 1.25 times the minimum standard deviation. The ellipse around the IO center of rotation is too small to be shown. These ellipses indicate how fast the least-squares determination converges.

Fig. 2. The pole of projection has been shifted to the South Pacific center of rotation (69°N , 157°W). The continent outlines, ridge crests and fracture zone locations, and the location of anomalies 5, 18, and 31 were digitized from the original of Figure 1, which was traced on the World Map of the U. S. Navy Oceanographic Office (scale of $1/39,000,000$ at the equator). The outlines of the continents north of 80°N or south of 70°S are not as accurate, being traced by hand in each case from an atlas.