

ACADEMIE ROYALE DES SCIENCES D'OUTRE-MER

Classe des Sciences naturelles et médicales, VIII-1, Bruxelles, 1968

Le problème de la dérive des continents

PAR

P. FOURMARIER

*Professeur émérite de l'Université de Liège,
Membre de l'Académie royale de Belgique,
Membre de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer,*

avec

le concours d'une Commission interacadémique.

Ouvrage publié conjointement
par l'Académie royale de Belgique et l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer.

F. 500

KONINKLIJKE ACADEMIE VOOR OVERZEESE WETENSCHAPPEN

Klasse voor Natuur- en Geneeskundige Wetenschappen, VIII-1, Brussel, 1968

**LE PROBLÈME
DE LA DÉRIVE DES CONTINENTS**

**Académie royale
des Sciences d'Outre-Mer
80A, rue de Livourne
BRUXELLES 5 (Belgique)**

**Koninklijke Academie
voor Overzeese Wetenschappen
Livornostraat 80A
BRUSSEL 5 (België)**

Le problème de la dérive des continents

PAR

P. FOURMARIER

*Professeur émérite de l'Université de Liège,
Membre de l'Académie royale de Belgique,
Membre de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer,*

avec

le concours d'une Commission interacadémique.

Impression décidée le 15 avril 1967.

Ouvrage publié conjointement
par l'Académie royale de Belgique et l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer.

AVANT-PROPOS

Depuis plus d'un demi-siècle les géologues, les géophysiciens, les géographes se sont inquiétés de savoir si les continents actuels sont restés, au cours des temps, dans une même position immuable les uns par rapport aux autres, ou bien s'ils se sont écartés ou rapprochés en glissant sur leur substratum, par exemple à la façon de radeaux sur l'océan, suivant le principe dit de la *Dérive continentale*. Cette conception soutenue par plusieurs savants tels que TAYLOR, WEGENER, DU TOIT, eut à l'origine un vif succès.

Par la suite des doutes sur sa validité furent émis. Dans son ouvrage « *Marine Geology* » publié en 1950, Ph. KUENEN écrivait (page 129) :

“ If the conclusions of adherents to drift in some form or other, such as DU TOIT, WEGMANN, GUTENBERG and KIRSCH are confronted with the opinion of opponents for instance BUCHER, UMBGROVE, STILLE and CLOOS, it becomes obvious that neither of the two can claim a decisive victory. But the evidence favorable to drift often proves illusive or at least open to serious doubt, on closer inspection. For the time being most geologists appear to have lost faith in continental drift as a sound working hypothesis ” (1).

Dans ces dernières années les résultats obtenus par l'étude du Paléomagnétisme et le déplacement des pôles magnétiques à la surface de la Terre, donnèrent à l'hypothèse un sérieux regain de faveur.

L'Académie royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique et l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer ont estimé que la question mérite d'être étudiée avec le plus grand soin à la lumière des arguments énoncés par les astronomes, les géophysiciens, les géologues, les géographes, les climatologistes, et les biologistes. Ces deux académies ont constitué à cet effet un groupe de travail, auquel se joignit par la suite un membre de la Koninklijke Vlaamse Akademie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België.

(1) Ph. H. KUENEN, *Marine Geology*, John Wiley and Sons, Inc. New York, Chapman and Hall, Limited. London, 1950.

Le groupe comprenait les personnes suivantes :

- MM. P. BRIEN, professeur honoraire à l'Université libre de Bruxelles
 J. COX, professeur honoraire à l'Université libre de Bruxelles
 P. FOURMARIER, professeur émérite à l'Université de Liège
 E. LAHAYE, professeur à l'Université libre de Bruxelles
 J. LEBRUN, professeur à l'Université catholique de Louvain
 M. LECOMTE, professeur à l'Université catholique de Louvain
 P. LEDOUX, professeur à l'Université de Liège
 P. MICHOT, professeur à l'Université de Liège
 F. STOCKMANS, professeur à l'Université libre de Bruxelles
- membres de l'Académie royale de Belgique.
- MM. E. BERNARD, professeur à l'Université catholique de Louvain
 L. CAHEN, professeur à l'Université libre de Bruxelles, et directeur du Musée royal de l'Afrique Centrale
 I. DE MAGNÉE, professeur à l'Université libre de Bruxelles
 M. WALRAET, chef du Centre de documentation africaine de la Bibliothèque Royale de Belgique

membres de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer.

- M. L. VAN MIEGHEM, professeur à l'Université libre de Bruxelles
 membre de la Koninklijke Vlaamse Akademie van België.

La présidence du groupe fut confiée au professeur P. FOURMARIER ; M.M. WALRAET fut désigné pour remplir les fonctions de Secrétaire.

Le groupe de travail s'est trouvé en présence d'un problème difficile et délicat. Il n'a nullement la prétention d'y apporter une solution définitive. Il s'est efforcé de confronter les opinions en présence, de mettre en évidence les résultats acquis à ce jour, de signaler les points qui restent obscurs.

L'exposé des conclusions des échanges de vues entre les membres de la Commission interacadémique, la rédaction d'un essai de mise au point de l'état de la question ne pouvaient être pratiquement réalisés que par un seul des membres du groupe de travail, formé de spécialistes de disciplines très diverses. Le président en prit la charge en s'inspirant de l'avis de ses confrères et de leurs critiques ; il consacra un temps considérable à la lecture d'un nombre important de travaux publiés. Il s'est efforcé d'être aussi impartial que possible. Il se peut néanmoins que ses tendances personnelles se marquent par endroits plus qu'il ne conviendrait. Le lecteur voudra bien l'en excuser.

Aussi les opinions émises dans ce rapport ne peuvent pas être considérées comme comportant nécessairement l'accord unanime des membres de la Commission.

Il s'agit de toute manière d'un travail provisoire qui sera à revoir et à perfectionner au fur et à mesure de l'avancement des études. On voudra bien lui accorder le mérite d'attirer l'attention sur quelques directives à ne pas perdre de vue à l'occasion de nouvelles recherches.

P. FOURMARIER.

INTRODUCTION

L'expression « dérive des continents » est entrée dans le langage courant des naturalistes qui s'intéressent à l'évolution de la surface de la terre au cours des périodes géologiques. Nous croyons bien faire, cependant, en précisant quelque peu la signification qu'il convient de lui donner.

La notion de *dérive* dans le sens qu'on lui donne généralement à la suite des travaux de TAYLOR, WEGENER et d'autres savants, admet le déplacement de massifs continentaux les uns par rapport aux autres, à la façon de radeaux s'en allant à la dérive à la surface de l'océan. Elle implique une grande mobilité de ces masses ; elle est l'image d'un mobilisme intégral. Elle s'oppose ainsi à la conception du fixisme suivant laquelle les continents seraient restés dans une position immuable les uns par rapport aux autres pendant toute la durée des temps géologiques.

En réalité, les géologues ne peuvent pas accepter l'existence d'un fixisme intégral. Ils savent, en effet, que la croûte terrestre s'est déformée sans arrêt au cours des temps, soit par l'érection de zones plissées (tectogènes ou orogènes) ou par la production de grandes fractures radiales suivant lesquelles les blocs en contact ont pu être animés d'un déplacement vertical, mais aussi d'un mouvement horizontal.

Du fait de ces modifications de structures, il s'est produit des déplacements ou glissements de massifs les uns par rapport aux autres, qu'il s'agisse de continents tout entiers ou de fragments de masses continentales. La composante horizontale de tels déplacements peut conduire à des effets comparables à ceux de la véritable dérive du mobilisme intégral. Ces déplacements relatifs de blocs de la croûte terrestre peuvent donner ainsi l'apparence d'une dérive ; dans son ensemble l'arrangement des unités structurales de la croûte terrestre serait relativement peu modifié ; ce serait en quelque sorte un fixisme atténué. Le terme de dérive, dans son sens classique ne semble pas pouvoir être attribué à semblables déplacements. Aussi chercherons-nous à l'éviter lorsque nous aurons la conviction que les actions géologiques sont seules à mettre en cause. Nous emploierons plutôt le terme de déplacement relatif de masses de la croûte terrestre.

Le mobilisme intégral implique la notion du déplacement des continents ou parties de continents, s'écartant ou se rapprochant les uns des autres, occupant de ce fait une disposition variable par rapport aux pôles. En d'autres termes les blocs que sont les masses continentales ont changé de place les uns vis-à-vis des autres au cours des périodes géologiques en glissant sur leur soubassement.

Le mobilisme peut cependant être envisagé sous un autre aspect : La croûte terrestre tout entière glisse sur son substratum. Un tel mouvement se traduit forcément par un déplacement relatif des pôles par rapport à l'ensemble des continents. Ceci revient à dire que la longitude et la latitude de chaque point de la surface du globe varient au cours des temps. Il va sans dire qu'un tel déplacement ne peut pas se concevoir sans que se produisent des dislocations, de grandes fractures notamment, pouvant provoquer un *déplacement relatif* de deux continents voisins, voire de deux parties d'un même continent ; cela revient à admettre la possibilité d'une sorte de dérive mitigée.

Certes la théorie de la Dérive des Continents dans sa forme originale, est des plus attrayante. Elle permet semble-t-il à première vue, d'expliquer bien des particularités de la structure et de l'évolution de la Terre. Elle eut cependant, et surtout dans le monde des géologues, bien des adversaires. Les faits nouveaux acquis dans certains domaines tels celui de la Géophysique et du Paléomagnétisme portent bon nombre de savants à modifier leur attitude. Nous n'en voulons pour preuve que la phrase suivante tirée d'un article du professeur L. U. DE SITTER, DE LEIDEN ⁽¹⁾ :

“ Undoubtedly the results of the paleomagnetic surveys strongly suggest a shift of the poles from the equator to their present position and of some consistent difference in the development of the Eurasian-African and American continents, suggesting that they have drifted apart since the Cretaceous period. However the old argument against continental drift, that the post-Cretaceous separation of these continents could have little connection with the older successive orogenic periods on both continents still holds good. The timing is often wrong, and the trends of the orogenes are often not in agreement with the postulated movement. Many more data of this kind, preferably in direct connection with existing orogenes are wanted ”.

A.E. SCHEIDEGGER ⁽²⁾, dans un bref article rappelle que plusieurs explications ont été proposées de la Dérive des Continents ; il écrit :

“ Because of this, noted scientists have taken the view that if there is no valid *explanation* for drift, the facts pointing towards its reality must be wrong. However this type of argument would not appear as entirely commendable ”.

⁽¹⁾ L. U. DE SITTER, *The relations between geology and geophysics*. I.C.S.U. Review of World Science, Vol. 5, n° 1, 1963. Si l'on en juge d'après son ouvrage « *Structural Geology* » publié en 1956, le professeur L. U. DE SITTER n'était pas, à cette époque partisan de la théorie de la Dérive des Continents.

⁽²⁾ A. E. SCHEIDEGGER, *On the possible causes of Continental Drift*, in *Symposium on polar Wandering and Continental Drift* Alberta Soc. of Petroleum Geologists, 1958, reprinted 1960. Calgary, Alberta, Canada.

Nous nous rallions volontiers à cette opinion. C'est pourquoi nous nous sommes efforcés de tenir compte aussi bien des arguments favorables que des arguments défavorables.

Signalons encore que dans la nouvelle édition de son ouvrage *Principles of Physical Geology* (1965) Arthur HOLMES se montre favorable à la thèse de la dérive.

Bien que nous nous soyons efforcés d'être aussi objectifs que possible et d'avoir considéré avec soin beaucoup d'arguments apportés en défaveur comme à l'appui de la théorie, nous prions le lecteur de bien vouloir nous excuser si le rédacteur de l'une ou l'autre de ces pages s'est parfois laissé entraîner par ses convictions personnelles, au-delà des limites permises.

La présente étude s'inspire essentiellement de considérations basées sur la géologie, la géophysique, la climatologie, le paléomagnétisme, etc. Il s'inscrit cependant sur un fond dans lequel les travaux de H. POINCARRÉ, de H. JEFFREYS, de VICENTE ainsi que ceux de MOLODENTSKY relatifs à l'existence d'un noyau liquide sous le manteau, ne sont pas perdus de vue.

PREMIÈRE PARTIE

LES DONNÉES DU PROBLÈME

CHAPITRE I

LA CONSTITUTION PHYSIQUE DE LA TERRE

Avant d'aborder le fond du problème de la dérive des continents, il est utile de rappeler sommairement les idées en cours à propos de l'origine des masses continentales ⁽¹⁾.

Celles-ci couvrent moins de la moitié de la surface de la Terre, dont les océans occupent la plus grande part. En outre, du point de vue physique et lithologique, les continents sont faits d'un matériau relativement léger, proche du granite, tandis que les grands fonds océaniques sont constitués essentiellement, sous une très mince couverture sédimentaire, d'un matériau plus dense, voisin du basalte.

Cette différence fondamentale entre les masses continentales et les dépressions océaniques est forcément en étroite relation avec la genèse de la croûte terrestre qui dépend à son tour de l'évolution du globe tout entier. Aussi paraît-il indiqué, au début de ce travail de rappeler ce que l'on pense actuellement de l'état physique de la terre prise dans son ensemble ⁽²⁾.

Il ne serait évidemment pas de mise de remonter à l'origine des planètes. Il nous suffira de prendre comme point de départ l'état de la Terre aux premiers temps de son histoire avant que commence son évolution géologique. Il est généralement admis qu'à ses débuts, la Terre était à haute température, constituée, pour sa plus grande partie, d'éléments silicatés. Il n'est peut être pas inutile de rappeler ici une phrase écrite par Sir Harold JEFFREYS ⁽³⁾ :

⁽¹⁾ Les masses continentales correspondent aux continents géographiques agrandis de la plate-forme continentale et d'une partie du talus continental jusqu'à l'isobathe de 2.000 à 3.000 mètres.

⁽²⁾ Parmi les ouvrages récents traitant partiellement de ce problème, il y a lieu de citer :

F. A. VENIG MEINERZ, *The Earth's crust and Mantle*. Developments in Solid Earth's geophysics. I. Elsevier Publishing Co. Amsterdam, 1964.

J. T. WILSON, *The structure and origin of continents*. I.C.S.U. Review, vol. 4, n° 4, octobre 1962.

⁽³⁾ H. JEFFREYS, *How soft is the Earth*. Roy. Soc. of London. First Harold H. Jeffreys Lecture. Delivered at Burlington House on 1963, october 25.

“ Many cosmogonists now maintain that the Earth was originally cold and has been heating by radioactivity ever since. But I think, as I have said, that some important facts cannot be explained without a fluid stage. This need not have been the initial stage ; it is possible that radioactivity was originally uniformly distributed, led to melting, and that resorting of materials occurred later ”.

A. L'INTÉRIEUR DE LA TERRE (1).

On possède actuellement des notions assez nettes sur l'état physique et chimique probable de l'intérieur de la Terre, sur la base des résultats acquis par les méthodes modernes de la géophysique, notamment par la mesure de la vitesse de propagation des ondes sismiques.

Sans entrer dans le détail, rappelons que l'on distingue, du centre vers la surface :

a) Le *noyau* d'un rayon de 3.500 kilomètres est atteint là où les ondes transversales ne se propagent plus, c'est-à-dire vers 2.900 kilomètres de profondeur. Il en résulte que ce noyau peut être supposé à l'état liquide, bien que sa partie interne puisse être de nouveau sous l'état solide, au sens que l'on donne à ces termes (état solide et état liquide) dans nos conditions d'observation directe.

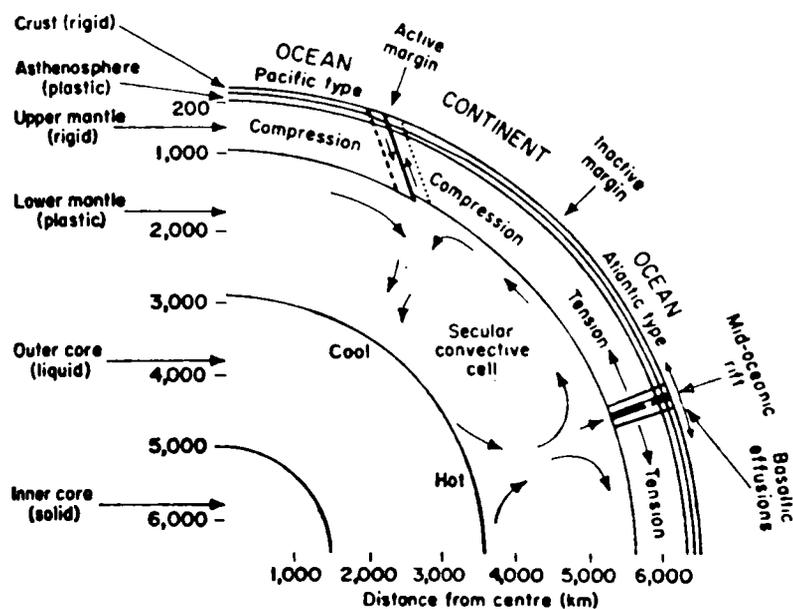


FIG. 1A. — La constitution de l'intérieur de la Terre. — D'après VAN BEMMELEN (2).

(1) Le lecteur consultera avec intérêt l'ouvrage : *Crust of the Earth* publié en 1955 par la GEOLOGICAL SOCIETY of America.

(2) Extrait du Bull. Soc. belge Géol., 1965.

(Cliché reproduit avec l'autorisation de l'éditeur et de l'auteur).

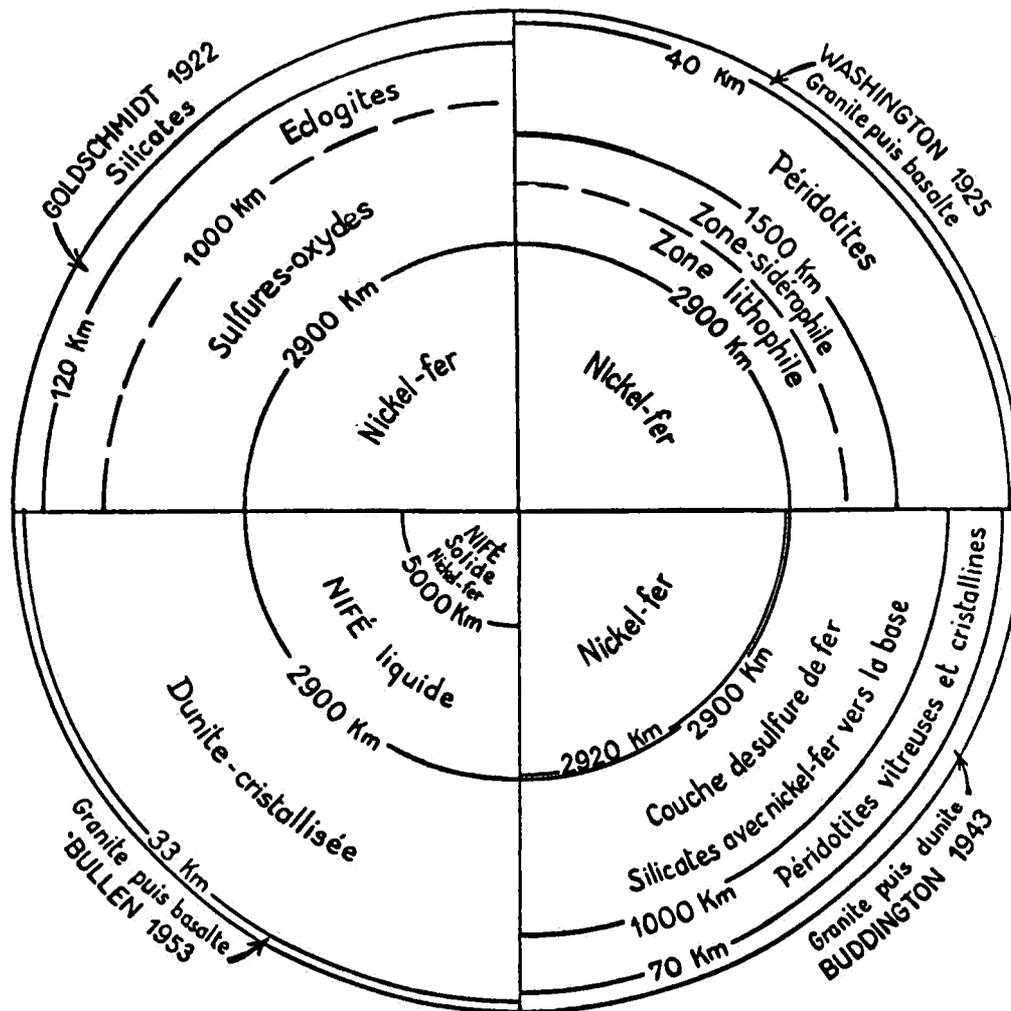


FIG. 1B. — La constitution de l'intérieur de la Terre. — D'après BRIAN-MASON (1).

Pendant longtemps, il fut admis que cette partie centrale de la Planète, est faite d'un alliage Fer-Nickel (*Nife*) ; cette conception s'accorde avec sa haute densité et aussi avec la composition chimique de certains types de météorites.

Cependant, en 1948, W.H. RAMSEY suggéra que le noyau pouvait avoir la même composition de matériau ultrabasique que le manteau, mais à très haute pression et avec une densité plus élevée. Cette hypothèse d'abord envisagée avec quelque méfiance, trouvera peut-être un appui dans les conceptions de P.M. DIRAC (2). La densité élevée du noyau tient à ce que la matière s'y trouve à l'état dit de « dégénérescence », sans avoir nécessairement une composition chimique différente de celle des parties plus externes du Globe.

(1) Tiré de l'ouvrage : BELLAIR et POMEROL, *Éléments de Géologie*, 1965.

(Cliché reproduit avec l'autorisation de l'éditeur et des auteurs).

(2) P.M. DIRAC, *A new Basis for Cosmology*, Proc. of the Royal Society, A. Vol. 165, pp. 199-208.

Il convient de rappeler ici que, d'après KUHN et RITTMANN ⁽¹⁾, le noyau serait constitué de matière solaire indifférenciée, sous très forte pression, ce qui expliquerait sa haute densité.

b) Le *manteau* s'étend de la profondeur de 2.900 kilomètres à 35 kilomètres en moyenne sous la surface de la Terre. Le mode de propagation des ondes sismiques indique que cette partie du globe est à l'état solide tout au moins si elle est soumise à des efforts instantanés. Sous l'action de sollicitations très lentes, elle peut au contraire se comporter comme un matériau relativement plastique au point de permettre la propagation de courants de convection. De toute manière, lors des secousses sismiques, les ondes transversales s'y propagent au même titre que les ondes longitudinales, alors qu'elles sont arrêtées lorsqu'elles atteignent la surface du noyau.

Les géophysiciens établissent une distinction entre manteau supérieur et manteau inférieur, sur le fait d'une légère variation des propriétés de la matière vers 1.000 kilomètres de profondeur.

On se rappellera à ce sujet un fait important : les séismes profonds ont leur épicentre à une profondeur moyenne de l'ordre de 700 kilomètres. Peut-être y a-t-il une relation entre ces deux faits d'observation.

Un autre point intéressant à noter est le suivant : vers la profondeur de 100 à 200 kilomètres, il paraît exister dans le manteau une zone relativement mince caractérisée par une moindre vitesse des ondes sismiques. Ce pourrait être une couche de plus grande mobilité permettant, par exemple, un déplacement de la masse sus-jacente par rapport à son substratum ⁽²⁾. Ce fait mérite de retenir l'attention des tectoniciciens.

Du point de vue chimique, on admet que le manteau est constitué essentiellement de silicates de plus en plus riches en minéraux denses (olivine, etc.) au fur et à mesure que croît la profondeur. Sa densité va de 3,32 à 5,66. On désigne ce matériau sous le nom de *sima*.

Cette hypothèse paraît être confirmée par certaines observations d'ordre minéralogique. De l'avis conforme de savants de diverses nations, le diamant n'a pu se former à une profondeur inférieure à 150 kilomètres, c'est-à-dire là où règnent la température et la pression nécessaires à sa cristallisation ⁽³⁾. On en déduit que les roches-mères du diamant, c'est-à-dire les Kimberlites viennent du manteau et se sont élevées jusqu'au voisinage de la surface du Globe ⁽⁴⁾.

⁽¹⁾ W. KUHN et A. RITTMANN, *Ueber der Zustand der Erdinnern und seine Entstehung aus einem homogenen Urzustand*. Geol. Rundschau B. XXXII, 1941, pp. 215-256.

On consultera avec intérêt à ce sujet W.H. RAMSEY, *Transitions to metallic phases*, Roy. Astron. Society, Accas. Notes, n° 17, vol. 3, Londres, 1954.

⁽²⁾ J.T. WILSON, *The structure and Origin of continents*. I.C.S.U. Review. Vol. 4, n° 4, 1962. Elsevier Publishing Company. Amsterdam.

⁽³⁾ M. Q. BARDET, *Contrôle géotectonique de la répartition des venues diamantifères dans le Monde*. Chronique des Mines et de la Recherche minière, 32^e années, n° 328-329, mars-avril, 1964, Paris.

⁽⁴⁾ Les Kimberlites ont une structure bréchiforme — les éléments de ces brèches sont des roches à péridot, pyroxène et biotite, renfermant le diamant comme minéral accessoire. J. JUNG, *Précis de Pétrographie*, 2^e édit., Masson et Cie, Paris, 1963.

Les Kimberlites nous éclairent ainsi sur la composition possible du manteau supérieur, dont des émanations ont pu monter grâce aux fractures qui découpent la croûte terrestre.

BARDET fait encore remarquer que les gisements de diamant et les venues de Kimberlite sont, en ordre principal, en relation avec les vieilles plate-formes à socle précambrien plissé et tectonisé depuis environ 1.000 M.A. (1).

B. LA CROÛTE TERRESTRE.

Le manteau est entouré par la croûte, dont l'épaisseur et la composition varient largement selon que l'on considère le milieu océanique ou les masses continentales.

A l'endroit de ces dernières on distingue normalement un niveau supérieur ayant sensiblement la composition du granite, de densité 2.7, désigné sous le nom de *sial*, couvert sur de larges étendues par des sédiments d'âges divers ; un niveau inférieur est de nature basaltique, de densité 3 à 3.2 ; on le désigne sous le nom de *Salsima* (ou *Sialsima*) pour tenir compte de sa composition lithologique intermédiaire entre celle du Sial caractéristique du niveau supérieur et le Sima, matériau plus dense dont est constitué le manteau. A l'endroit des continents, l'épaisseur de la croûte est en moyenne de 30 à 40 kilomètres. Cependant, comme le fait remarquer VENING MEINESZ (2), dans les aires géosynclinales, la disposition des matériaux de la croûte peut être troublée, notamment par l'intrusion de venues basiques ; il en est de même dans les régions de horsts et de graben où de grandes masses de laves ont pu pénétrer facilement dans l'épaisseur de la croûte.

A l'emplacement des océans, la croûte est faite principalement de matière basaltique recouvrant directement le sima du manteau. Son épaisseur est de l'ordre de 5 à 10 kilomètres ; toutefois, elle est recouverte par une couche de sédiments dont l'épaisseur parfois assez grande à proximité des rivages, notamment à l'endroit des estuaires, va en diminuant rapidement vers le large au point d'être très peu de chose par rapport à la couverture sédimentaire des masses continentales. Les fonds marins sont alors tapissés d'une couche peu épaisse de vase calcaire à globigérines, de dépôts siliceux organogènes ou d'argile rouge des grands fonds. Là où l'activité volcanique est grande, une masse importante de matériaux de nature éruptive peut augmenter l'épaisseur de la croûte dans de fortes proportions.

La surface de base de la croûte, essentiellement sialique sur les continents, de nature basaltique à l'emplacement des océans, est connue sous le nom de

(1) On consultera avec intérêt un travail plus récent du même auteur sur les gisements de diamant de Sibérie, paru dans le numéro de septembre 1965 de la Chronique des Mines et de la Recherche minière, 74, rue de la Fédération, Paris XV^e.

(2) F.A. VENING MEINESZ, *The Earth's Crust and Mantle*. Elsevier publishing Company, Amsterdam, 1964.

discontinuité de MOHOROVICIC ; elle souligne le contact de la croûte superficielle avec le manteau de composition ultrabasique.

Il y a lieu de signaler ici une particularité sur laquelle VENING MEINESZ, dans l'ouvrage précité, a attiré l'attention :

La différence de composition lithologique et de densité entre continents et fonds océaniques est en accord avec le principe d'isostasie ; les eaux océaniques se sont accumulées aux endroits de plus forte densité qui devaient forcément se trouver en dépression vis-à-vis des zones de densité moindre que sont les continents.

Dans l'ouvrage déjà mentionné ⁽¹⁾, VENING MEINESZ a attiré l'attention sur le caractère de *rigidité relative* de la croûte par rapport à son substratum. Selon les vues de ce savant, il est probable qu'à l'endroit des continents la *croûte rigide* se confond à peu de chose près avec la croûte telle qu'elle a été définie ci-avant. Par contre, sous les océans, la *croûte rigide* semble avoir la même épaisseur qu'à l'endroit des continents, de telle manière qu'elle comprend non seulement la couche basaltique relativement mince, mais aussi une partie du matériau ultrabasique, riche en olivine, caractéristique du manteau.

Cette dernière partie, bien qu'elle soit de même nature lithologique que le manteau, se comporte autrement que lui sous l'action des forces en action. Elle ne participe pas aux mouvements propres des courants qui affectent le manteau ; elle est cependant susceptible d'être entraînée par ceux-ci au même titre que le reste de la croûte.

Cette distinction entre les propriétés physiques et mécaniques de la croûte rigide et de son substratum est, en réalité, bien délicate. Les géologues savent par leur expérience du terrain que des roches cohérentes, telles le calcaire, le quartzite et, *a fortiori*, les roches schisteuses se sont plissées comme une matière relativement plastique, même sous une charge modérée de sédiments et, par conséquent à une température peu élevée. Ils savent aussi que ces déformations d'apparence plastique vont en s'accroissant au fur et à mesure que s'accroît la profondeur ; des matériaux rocheux ont ainsi été déformés, en plis extrêmement serrés, ou étirés sans se fracturer. C'est sans doute ici le lieu de rappeler que sous des efforts extrêmement lents, de telles déformations sont possibles même à la surface de la Terre ou tout au moins à très faible profondeur.

En conclusion de ce qui précède, un fait est acquis : la densité de la matière va en croissant avec la profondeur. Cependant en ce qui concerne la composition chimique de l'intérieur du Globe, deux hypothèses sont en présence : ou bien elle varie progressivement de la surface au centre passant d'une masse silicatée légère à une masse de plus en plus dense et de là au noyau métallique ; ou bien elle reste presque identique à elle-même sur toute la longueur du rayon terrestre, son état physique différant progressivement en rapport avec l'augmentation de la pression et de la température jusqu'à atteindre l'état dit de « dégénérescence ».

⁽¹⁾ *Op. cit.*, p. 9.

C. LA CHALEUR INTERNE DU GLOBE.

Les observations faites dans les mines et les sondages profonds ont établi que la température va en augmentant régulièrement de la surface vers l'intérieur ; le gradient géothermique varie d'un point à l'autre ; en moyenne il est de l'ordre de 30 degrés par kilomètre ; mais dans l'Ontario (U.S.A.) et au Transvaal il n'est que de 9 à 10 degrés par kilomètre.

Un tel accroissement toujours dans le même sens conduit à dire qu'en moyenne la température de fusion du basalte serait atteinte vers 35 kilomètres. Semblable évaluation ne peut cependant être considérée que comme purement théorique, car il faut tenir compte de la conductivité thermique des matériaux et de la pression qui va croissant avec la profondeur.

On a pu mesurer en divers endroits du globe le flux de chaleur provenant de l'intérieur de la Terre. Certains résultats méritent de retenir l'attention. A titre d'exemple, nous citerons le cas de la Tasmanie où le flux est relativement élevé, vraisemblablement par suite de la chaleur résiduelle en relation avec la présence d'intrusions basaltiques ; une anomalie semblable a été notée en Afrique Australe dans le Karroo.

Comme le fait observer A. HOLMES ⁽¹⁾ les résultats obtenus au Japon sont particulièrement instructifs. Des différences notables ont été relevées suivant que l'on considère une région proche d'un centre volcanique ou bien à l'endroit de la fosse profonde qui longe la côte orientale de l'île principale de l'Archipel.

De telles variations semblent résulter de la présence d'un courant subcrustal descendant le long de la côte, entraînant le fond du Pacifique sous l'arc insulaire.

Les mesures du flux de chaleur obtenues dans ces conditions apportent par conséquent une contribution importante à la compréhension de la relation existant entre les fosses océaniques profondes, maintenues grâce à ces courants, et les zones volcaniques distantes de 150 à 200 kilomètres, et où le flux de chaleur beaucoup plus élevé est la conséquence de la présence d'un courant ascendant.

Le long des rides médianes océaniques des anomalies remarquables du flux de chaleur ont également été observées. A l'endroit de la partie axiale de la ride, le flux de chaleur a été estimé être par endroits plus de deux fois plus élevé que sur les flancs de la crête. Il faut sans doute voir là l'intervention de courants subcrustaux suivant un processus comparable à celui mentionné ci-avant pour le Japon.

Il y a lieu de tenir compte aussi de la radioactivité lorsqu'on envisage la question du flux de chaleur vers l'extérieur et ses conséquences sur l'évolution de la croûte terrestre.

(1) *Principles of physical Geology*. New edition 1965, page 997.

Le problème est notamment de savoir si, à son intervention, le refroidissement de la planète est pour le moins ralenti, voire même s'il n'y a pas, au contraire un réchauffement de toute la planète conduisant à sa dilatation comme l'a supposé autrefois le professeur L. EGYED ⁽¹⁾.

A ce sujet, l'opinion du professeur G. GUEBEN de l'Université de Liège mérite d'être rappelée :

« La considération de la loi de refroidissement montre que le temps écoulé depuis le début du refroidissement doit être d'environ 20 millions d'années. Or les découvertes géologiques confirmées par les méthodes radioactives de détermination de l'âge des minerais amènent à des âges beaucoup plus élevés... Il y a donc une cause qui perturbe la loi de refroidissement et cette cause est la production de chaleur par les corps radioactifs » ⁽²⁾.

En tenant compte des mesures effectuées par divers savants, on peut conclure au moins provisoirement que « la radioactivité ne contrebalance pas l'évolution normale de la Terre ; elle ne peut que retarder son refroidissement » ⁽³⁾.

ALLAN ⁽⁴⁾ a montré que le flux de chaleur vers l'extérieur est sensiblement le même, que l'on considère la partie continentale ou la partie océanique. Or, il est établi que les matériaux de nature sialique sont plus riches en substances radioactives que le matériau de nature basaltique des fonds marins. C'est là une indication intéressante pour montrer dans quelle mesure il y a lieu de tenir compte de la radioactivité à propos de l'évolution thermique de la Terre.

Nous avons cependant à tenir compte des indications contenues dans un mémoire du professeur VAN BEMMELEN ⁽⁵⁾. Nous y trouvons des indications sur la conductivité des roches dans l'hypothèse d'un flux thermique résultant uniquement de la radioactivité des roches, d'après SCHUILING : de 2,00 dans le granite, elle passe à 0,35 dans le basalte et tombe à 0,06 dans la péridotite.

« Or », écrit VAN BEMMELEN, « les valeurs du flux thermique déduites par SCHUILING s'accordent fort bien avec les observations faites pour les continents, mais non pour les océans, où elles sont deux fois et demie plus faibles. Ces dernières présentent en outre des variations assez importantes et brutales ce qui leur suppose une origine peu profonde. Si l'on accepte l'hypothèse de masses issues de grande profondeur, s'élevant sous les rides océaniques pour ensuite s'étaler, on pourrait expliquer l'importance du flux thermique océanique par cette ascendance de matériel basique et ultrabasique chaud et par les réactions exothermiques d'hydratation des péridotites en serpentines comme le supposent HESS (1955) et DIETZ (1963). Une estimation de SCHUILING (1964) vient à l'appui de cette supposition ».

(1) L. EGYED, *A New dynamic conception of the internal constitution of the Earth*. Geol. Rundschau, t. XLVI, 1957.

(2) E. GUEBEN, *Phénomènes radioactifs et introduction à la physique nucléaire*. Éditions Desoer, Liège, p. 225.

(3) P. FOURMARUER, *Le problème de l'origine des continents*. Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belg., 5^e sér., t. XLVIII, n° 12, 1962.

(4) D.W. ALLAN, *Endeavour*, 1954, p. 89.

(5) R.W. VAN BEMMELEN, *Phénomènes géodynamiques*. Mém. Soc. belge Géol. Paléont. et Hydrol., série in 8°, n° 8, 1964. Voir page 3.

Sans vouloir nous y arrêter longuement, nous croyons utile de signaler à l'attention du lecteur un article récent de Fr. BIRCH sur l'histoire thermique de la Terre ⁽¹⁾. A l'origine la planète était froide ; l'élévation de sa température est la conséquence de la radioactivité et de l'action des marées ; une fois atteinte la température de fusion, le noyau métallique et le manteau ont pu se différencier ; la séparation de la croûte solide est venue par après, lorsque la majeure partie des substances radioactives ont disparu. La haute température du manteau à profondeur relativement faible sous les océans tient à ce que dans ces parties de la croûte, contrairement à ce qui s'est passé sous les continents, le manteau a gardé une teneur plus élevée en substances radioactives.

Quelle que soit l'origine de la température interne du globe, nous retiendrons que la différence entre les deux domaines, continental et océanique, permet de comprendre que des courants de convection aient pris naissance à l'endroit des rides médianes océaniques, c'est-à-dire à des endroits où les éléments du Manteau viennent le plus près de la surface.

C'est par les courants de convection que Sir BULLARD explique cette particularité ⁽²⁾.

Le flux de chaleur vers l'extérieur de la Terre joue, sans aucun doute un rôle considérable dans l'évolution du globe terrestre au cours des périodes géologiques. Aussi devons-nous attacher de l'importance aux différences observées dans la répartition de ce flux et aux conséquences qui peuvent en résulter. Nous citerons à cet effet une phrase tirée d'un article de G.J.F. MACDONALD ⁽³⁾ :

" In summary, the heat-flow observations taken with the radioactive heat production of common rocks establish that major differences in chemical composition exist between the subcontinental and suboceanic portions of the mantle. These considerations provide evidence, additional to that of gravity, that the continental structure extends to considerable depths within the mantle, and that the continental crust cannot be imagined as a thin block overlying a horizontally homogeneous mantle "

Cette conclusion s'accorde avec la notion de l'isostasie suivant laquelle les hauts reliefs des continents enfoncent profondément leurs racines dans le milieu basaltique sous-jacent. Rappelons simplement ici que cette conception classique a été mise récemment en doute par le professeur A. DAUVILLIER ⁽⁴⁾ qui écrit :

« Les recherches modernes n'ont pas confirmé l'isostasie. Les montagnes sont constituées de sédiments légers plissés par compression et ne possèdent pas de racines. Celles-ci pour l'Himalaya plongeraient, en effet, de quelque 130 Km au-dessous du niveau des mers, soit dans le domaine des courants de convection.

⁽¹⁾ Fr. BIRCH, *Speculations on the Earth's thermal history*. Bull. Geol. Soc. America, vol. 76, n° 2, février 1965.

⁽²⁾ E.C. BULLARD, *The flow of Heat through the Earth*, I.C.S.U. *Review of World Science*. Vol. 6, n° 2, avril 1964.

⁽³⁾ G.J.F. MACDONALD, *Continental Structure and drift*. A symposium on Continental Drift organised by P.M.S. Blackett, Sir Edward Bullard, and S.K. Runcorn, Royal Society, London, 1965, p. 215.

⁽⁴⁾ A. DAUVILLIER, *Les migrations polaires* Ciel et Terre, LXXXI année, n° 7-8, juillet-août 1965.

Et que penser des soi-disant racines des inlandsis ou des volcans des Hawaï, qui sont au contraire des exsudats de quelque 10 Km de hauteur ? »

D. LE COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX TERRESTRES SOUS L'ACTION DES CONTRAINTES.

Les géophysiciens et les géologues savent que les constituants de la croûte terrestre ne se comportent pas de la même manière suivant qu'ils sont soumis à des effets brusques ou à l'action de contraintes agissant avec une grande lenteur ⁽¹⁾. Dans un article récent, le professeur A. DAUVILLIER a encore souligné l'importance à attacher à cette question ⁽²⁾. Il écrit :

« Nous savons aujourd'hui que la Terre, quoique presque entièrement fondue, possède une extrême rigidité pour les contraintes instantanées, comme les séismes et les marées à courte période, mais qu'elle est plastique pour les contraintes faibles mais prolongées comme la force centrifuge. Cette rigidité est due à la pression lithostatique en surface et hydrostatique en profondeur comme les expériences de BRIDGMAN l'ont montré. La rigidité est conférée aux fluides par la vitesse, la pression et les forces gravitationnelles. Elle est indépendante de l'état physique : solide, liquide, gazeux ou nucléaire ».

On notera le grand intérêt de cette conception. Toutefois, dans certains cas, les géologues seront sans doute quelque peu réticents. Ils admettent — et cela résulte de multiples faits d'observation — qu'à partir d'une certaine profondeur, sous l'action de sollicitations agissant très lentement, les roches se sont comportées comme des substances plastiques quelle que soit leur composition lithologique. Il leur serait difficile d'accepter sans réserve que la même règle soit applicable aux roches qui depuis leur sédimentation sont restées en surface ou n'ont été recouvertes que d'une très faible épaisseur d'autres matériaux. Les observations de terrain établissent sans conteste que, dans une telle situation, des couches sédimentaires meubles peuvent être plissées sous des efforts extrêmement lents, sans montrer d'étirement ou de déformation à caractère plastique. Bien mieux, là où des roches déjà solidifiées ont été soumises à des efforts sous une charge minime, la fracturation est de règle et non pas la déformation plastique.

Cette remarque n'est pas sans intérêt pour le sujet qui nous occupe, car on sait que, depuis le début de son évolution géologique, la croûte terrestre est rigide au fond des océans comme à l'endroit des continents. Il faut en tenir compte si l'on envisage la possibilité d'un glissement lent des masses continentales sur le matériau des grands fonds océaniques comme l'envisage le processus de la dérive des continents.

⁽¹⁾ On connaît l'expérience classique de la dalle de pierre posée horizontalement sur deux appuis, qui prend, au bout d'un certain temps, une flèche permanente.

⁽²⁾ A. DAUVILLIER, *Les migrations polaires* Ciel et Terre, Bull. Soc. d'Astronomie... 81^e année, n° 7-8, juillet-août 1965, Bruxelles.

CHAPITRE II

LA DISCONTINUITÉ DU SIAL L'ORIGINE DES MASSES CONTINENTALES

Quel que fut l'état physique de la Terre à son origine, en tant que planète indépendante, il dut arriver un moment où elle se présentait vraisemblablement sous l'aspect d'un globe fluide ou visqueux à haute température. C'est l'opinion de Sir Harold JEFFREYS que nous avons rappelée ci-avant.

Pour atteindre à l'état actuel, il a dû forcément se former à sa surface une croûte solide au sens que nous donnons à ce terme.

Quelle est l'origine première des matériaux de la croûte ? Dans l'hypothèse très probable d'un classement par ordre de densité, on admettra volontiers que la Terre à l'état visqueux était entourée d'une atmosphère gazeuse bien différente de celle que nous connaissons. Il s'y trouvait non seulement les constituants actuels ou du moins une partie d'entre eux, mais aussi, à l'état volatil, bien d'autres corps notamment des composés de sodium et de potassium.

Il est permis de supposer que ces derniers réagirent avec la couche superficielle, la moins basique, de la masse visqueuse pour permettre la formation des silicates qui sont les constituants essentiels des roches les moins denses. C'est ce qui a conduit A. RITTMANN ⁽¹⁾ à dire que la première croûte devait être de nature pegmatitique, apparentée par conséquent aux roches granitiques, constituants les plus typiques du sial.

D'autres auteurs admettent que le sial est le résultat d'une différenciation à partir du magma sous-jacent : Des solutions de silicates, d'alcalis, de constituants volatiles émanant du manteau auraient gagné la surface pour constituer une croûte ayant une composition moyenne comparable à celle du granite.

Quelle que soit l'hypothèse adoptée, la chose essentielle est de savoir si la croûte sialique, aujourd'hui discontinue, était distribuée de même manière à son origine ou bien si elle couvrait réellement toute la surface de la planète. Les schémas établis par J.M.F. UMBGROVE ⁽²⁾ sont en accord avec cette dernière alternative. Il en est de même de ceux de A. RITTMANN. Ce dernier auteur admet cependant que la croûte originelle était d'épaisseur inégale, tandis que UMB-

⁽¹⁾ A. RITTMANN, *Zur geochemischen Entwicklung der prägeologischen Lithosphäre*, Bull. suisse Minér. et Pétrogr., 1948, vol. 28, fasc. 1.

⁽²⁾ J.M.F. UMBGROVE, *On the origin of continents and Ocean floors*, The Journal of Geology, vol. LIV, 1946, p. 174.
— *The pulse of the Earth*, Nyboff, La Haye, 1947.

GROVE l'a représentée comme étant d'épaisseur uniforme sur toute la surface du globe.

Dans l'hypothèse généralement acceptée d'un état fluide initial de la planète à haute température, avec classement des matériaux par ordre de densité croissante de la surface au centre, on est tout naturellement porté à croire à l'existence d'une enveloppe continue de Sial-Salsima. S'il en est ainsi, il y a lieu de rechercher la cause de la concentration de ce matériau moins dense en des endroits privilégiés de la Terre, qui furent les masses continentales primitives.

A titre purement historique, rappelons qu'autrefois plusieurs savants admettaient que la fosse du Pacifique n'est rien d'autre que la cicatrice laissée par le départ de la Lune, séparée de la Terre par un phénomène de résonance (1).

Aujourd'hui, à la suite des travaux de H. JEFFREYS et d'autres savants il semble que l'on doive renoncer à cette explication, bien qu'elle soit encore acceptée par divers auteurs, qui vont jusqu'à fixer la séparation des deux astres à une époque relativement très récente (Crétacé). Les géologues trouveraient facilement des arguments positifs pour combattre pareille supposition.

Il n'est certes pas interdit de supposer que la croûte primitive faite de sial et de matériau de nature basaltique fut originellement continue sur toute la surface de la Terre ou mieux ait eu au début de sa solidification, tendance à la recouvrir tout entière. S'il en fut ainsi, il y a lieu de faire appel à un facteur supplémentaire pour rendre compte de ce fait si remarquable : la concentration du sial des continents sur une étendue à peine supérieure au tiers de la surface de la Terre.

A. 1. *Théorie des courants de convection.*

Les courants de convection dans le manteau pourraient, en l'occurrence avoir joué un rôle de première importance (2).

Suivant le théorème de VON ZEIPPEL (3) une masse fluide au sein de laquelle existent des sources d'énergie donnant lieu à un gradient de température des régions centrales vers la périphérie et, par conséquent, à un transport de chaleur dans ce sens, ne peut être en équilibre hydrostatique si elle est animée d'une rotation rigide.

Ce théorème signifie qu'en présence d'un flux de chaleur, une masse fluide, soumise à sa propre gravitation et en rotation, tend vers un état stationnaire caractérisé par des courants méridiens et une rotation différentielle.

(1) Voir à ce sujet :

P. FOURMARIER, *Le problème de l'origine des Continents*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belgique, 5^e sér., t. XLVIII, n^o 12, 1962, p. 1382.

(2) A consulter à ce sujet :

G.S.F. HILLS, *The formation of continents by convection*, London, E. Arnold and Co, 1947.

(3) H. VON ZEIPPEL, *Zeitschrift für H.v. Seeliger*, p. 144, 1924 et *Astron. Nachr.* 84, 665-684, 1924.

Voir aussi à ce sujet :

A.S. EDDINGTON, *The internal constitution of the Stars*, p. 282. Cambridge University Press, 1926.

M. le professeur LEDOUX nous dit à ce sujet : « On admet actuellement que si l'on tient compte de la viscosité, la masse fluide en question évoluera vers un état stationnaire caractérisé par une circulation interne généralement très lente à la fois dans les plans méridiens et le long des parallèles. Cette dernière correspond à une rotation différentielle qui se manifestera également à la surface de la masse (périodes de rotation différentes à différentes latitudes et à différentes profondeurs) ».

De tels courants peuvent être aptes à entraîner les matériaux légers à partir des régions équatoriales pour les accumuler dans les hautes latitudes.

Dans l'ouvrage déjà mentionné ci-avant, VENING MEINESZ attribue la concentration du sial à l'influence de courants de convection. Il écrit à ce sujet ⁽¹⁾ que le noyau est une source permanente de chaleur qui influence sans aucun doute le comportement du manteau. S'il n'y avait pas de départ de chaleur du noyau vers le manteau, on ne pourrait pas expliquer la présence de courants de convection dans le noyau ; la source d'instabilité due au refroidissement du noyau n'existerait pas et l'on ne pourrait pas attribuer à la température, les courants formés dans le noyau. Cette considération est évidemment en faveur de l'existence de courants de convection dans le manteau ; c'est grâce à ces courants que l'on peut expliquer que le refroidissement du globe a pénétré aussi profondément, car la conduction et la radiation seules seraient insuffisantes pour en donner l'explication. En effet, d'après les calculs de BIRCH ⁽²⁾, la vitesse de conductibilité thermique est bien inférieure à celle des courants de convection dans le manteau, bien que celle-ci n'atteigne pas, en général, la valeur de dix centimètres par année. En l'occurrence, la question de vitesse importe peu ; le fait essentiel est qu'il puisse exister des courants dans le manteau, courants capables d'exercer une action jusque sur les éléments de la croûte.

Deux alternatives sont à envisager : la première consiste à supposer que l'action de ces courants s'est manifestée *de façon effective* alors que le sial était déjà formé à l'état solide et entourait la Terre d'une enveloppe continue. C'est sans doute de cette manière qu'il y a lieu d'interpréter les schémas établis par UMBROVE pour expliquer la discontinuité du sial dans l'état actuel de la Terre.

Cette explication est à prendre en considération si l'on tient compte des expériences réalisées par GRIGGS pour mettre en évidence l'action des courants de convection ⁽³⁾. En effet, compte tenu des lois de similitude, sous l'action de tels courants, la croûte solide recouvrant un milieu visqueux ou fluide peut être amincie et même rompue pour s'accumuler ensuite en un bourrelet là où le courant s'infléchit.

Cependant, on est en droit de supposer tout aussi bien que de tels courants existaient dans le manteau avant que se format une croûte solide continue sur

⁽¹⁾ *Op. cit.*, p. 7.

⁽²⁾ F. BIRCH, 1942, *Thermal conductivity of Rocks*, in : F. BIRCH, J.F. SCHAIRER and H.C. SPICER, *Hand book of Physical Constants*. Geol. Soc. of America spec. paper, 36, pp. 251-258.

⁽³⁾ D. GRIGGS, *A theory of Mountain Building*, American Journal of Science, 1939, pp. 611-650.

toute l'étendue de la surface terrestre. C'est alors la seconde alternative ; elle conduit à la conclusion que *la croûte sialique n'a jamais été continue*, du moins à l'état solide. Par suite du refroidissement progressif du globe, il a pu se former d'abord des blocs d'une « scorie » ou « écume » relativement légère, entraînés de l'équateur vers les pôles pour s'accumuler et donner ainsi naissance à de vastes concentrations de sial, noyaux des masses continentales futures, stabilisés lorsque se consolida à son tour le substratum visqueux sur lequel ils flottaient librement à l'origine.

Il n'est pas étonnant que, sur cette base, on ait pensé à la formation de deux grands massifs continentaux originels : l'un, situé dans l'hémisphère nord, s'étendait du Canada à la Sibérie ; c'est la *Laurasia* ; l'autre joignait l'Amérique du Sud à l'Australie en passant par l'Afrique et l'Inde péninsulaire ; on l'a dénommé *Gondwana*. Entre ces deux masses continentales, s'étendait un large espace qui, par la suite devint une mer, la *Mésogée* ou *Téthys*, allant des Antilles aux régions méditerranéennes et aux chaînes montagneuses de l'Asie centrale. Les connaissances acquises sur la géologie de cette région intermédiaire ne sont pas défavorables à une telle hypothèse, car elles ont mis en évidence sa grande mobilité au cours des temps géologiques ⁽¹⁾.

On pourrait peut-être proposer un moyen terme : la Laurasia n'aurait pas été une masse unique, mais un alignement de terres séparées les unes des autres par des étendues marines : le Continent canadien, l'Europe centrale et septentrionale et l'Asie sibérienne séparée de l'Europe par une mer comblée par la suite par les sédiments de l'Oural, du Kazakstan Central, du Tian-Shan et de la grande dépression de la Sibérie occidentale.

De son côté, la masse gondwanienne eut été en réalité, constituée, comme aujourd'hui de trois massifs continentaux correspondant à l'Amérique du Sud, à l'Afrique et à l'Australie, séparées les unes des autres par des étendues océaniques à fond de salsima.

Enfin, un continent isolé se serait arrêté à l'endroit de l'Antarctique.

On ne manquera pas d'objecter, à cette manière de concevoir les choses, la présence de l'Océan Pacifique qui, d'une part, couvre environ un tiers de la surface de la Terre et qui, d'autre part, interrompt sur une grande partie de sa longueur l'éventuel continent gondwanien primitif.

Si, comme on peut le croire, les courants de convection se manifestaient déjà dans la Terre, relativement homogène à son état originel de fluidité, ils devaient être disposés, semble-t-il, de façon régulière et symétrique en harmonie avec les conditions astronomiques comme l'a figuré PÉKÉRIS ⁽²⁾. S'il n'en est pas ainsi, c'est qu'il a existé, au moment de la genèse des Continents, une force

(1) Cette distribution des masses continentales primitives en deux blocs de part et d'autre de la Téthys a été acceptée encore récemment par le professeur Hans Rückling, de l'Université de Heidelberg.

Voir : *Geographisches Zeitschrift*, 51 Jahrgang, 1963, heft 3. Suivant les vues de ce savant, c'est à l'intervention de courants de convection dirigés vers l'axe subéquatorial de la Téthys que les deux continents primitifs se seraient disloqués avec dérive progressive de leurs fragments vers leur emplacement actuel.

(2) PÉKÉRIS, Monthly Not. Roy. Astronomical Soc. Geophysic suppl. 3343, 1935.

perturbatrice que nous ne connaissons guère, ou bien que la couche originelle de sial présentait déjà des inégalités marquées, voire des lacunes de continuité.

A ce propos, il y a lieu de rappeler que VENING MEINESZ ⁽¹⁾ a imaginé l'évolution de la surface du globe suivant un réseau octaédrique avec intervention des courants de convection pour accumuler le sial en des points privilégiés. Toutefois, l'Océan Pacifique occupe une place si importante dans la distribution des terres et des mers que l'on hésite à accepter sans réserve une telle interprétation. On imagine difficilement, en effet, qu'une pellicule de sial ait couvert une telle étendue et ait pu être entraînée pour accroître quelque peu les continents voisins. Faut-il plutôt admettre que le sial n'a jamais existé à l'endroit du Pacifique, tout au moins là où son fond est de nature basique ?

La répartition antipodale des continents et des océans qui a depuis longtemps attiré l'attention des géographes n'en reste pas moins une énigme. Cependant, s'il faut en croire R.A. DALY elle serait due à l'influence de la Lune à l'époque très lointaine où celle-ci était beaucoup plus proche de la Terre qu'elle ne l'est actuellement, et où la croûte sialique était en voie de formation par différenciation aux dépens du sima sous-jacent ⁽²⁾.

Rappelons cependant deux avis opposés sur la cause de cette particularité géographique :

En 1952, VENING-MEINESZ écrivait : " rather than one sixth of the continental area is antipodal to continent ". Ce savant en déduit qu'une telle distribution ne peut pas être due au hasard.

Cependant, dans un article récent F.F. EVISON et P. WHITTLE ⁽³⁾ après un examen statistique du problème concluent qu'il est impossible de dire si la disposition actuelle des continents par rapport au domaine océanique est due ou non au hasard !

En présence de ces opinions contradictoires, le géologue préfère s'abstenir.

Il est peut-être utile de rappeler dès à présent que, depuis le Précambrien, toute l'évolution géologique s'est faite en majeure partie autour de la partie centrale des masses continentales, noyau comprenant les terrains les plus primitifs que le géologue puisse observer à la surface de la Terre. C'est peut-être là un argument intéressant à faire valoir en faveur de la discontinuité originelle de la croûte sialique. Les continents auraient été, à l'origine, de vastes amas de produits de différenciation de nature plus acide, formés aux dépens de la partie superficielle de la Terre. Sous l'action d'une cause extérieure à la Terre, selon toute probabilité, ces amas de matériau léger se seraient groupés de préférence sur une partie de la surface du globe, alors qu'ils pouvaient glisser aisément sur un substratum non encore consolidé, comme le font les premiers éléments de la croûte d'une coulée de lave.

(1) F.A. VENING MEINESZ, Verh. Kon. Akad. der Wetensch., t. LVI, n° 4, 1944. Amsterdam.

(2) R.A. DALY, *Origin of Land hemisphere and Continents*, American Journal of Science, vol. 249, 1951, pp. 903-934.

(3) F.F. EVISON and P. WHITTLE, *The antipodal location of Continents and Oceans*, Geological Magazine, vol. XCVIII, n° 5, sept.-oct. 1961, pp. 377-739.

La distinction qu'établissent les géographes entre un hémisphère continental et un hémisphère océanique, avec la grande étendue du Pacifique, remonterait ainsi à l'époque de la formation de la croûte primitive de la Terre.

On fera volontiers un rapprochement entre la thèse exposée ci-dessus de la discontinuité originelle de la croûte sialique et l'opinion exprimée par M. l'Abbé GRAINDOR du Collège de France au cours de la session de la Royal Society of London consacrée à l'étude de la dérive des continents ⁽¹⁾.

Notre distingué confrère écrit à ce propos :

“ It is my opinion that if we admit the formation of a crust from initial igneous matter this crust has most probably appeared here and there as crystals in a cooling eutectic. If as geophysicist have pointed out there are convection movements since the beginning of cooling the different crustal parts have been in constant motion, sometimes joining together, sometimes drifted apart ; at no time would there existed a continuous crust over the Earth's Surface. ”...

Il découle tout naturellement de là que le mouvement des masses sialiques indépendantes les unes des autres devait cesser dès qu'une croûte solide s'était formée à l'endroit des zones à constitution de Sima qui s'étendaient entre les masses sialiques.

A. 2. *Théorie de Grussov.*

Dans un article intitulé *Metastasy*, W.C. GRUSSOV ⁽²⁾ expose, à propos de l'origine de la croûte terrestre, une conception assez différente, bien que conduisant à des résultats analogues.

Son point de départ est le suivant : Les plus anciennes roches connues du Précambrien sont, pour la plupart tout au moins, d'origine volcanique ; certaines d'entre elles ont la structure des « pillow-lavas ». Sur cette base, GRUSSOV admet qu'à l'origine toute la surface de la Terre était recouverte d'une nappe d'eau de 2000 pieds de profondeur moyenne ; il n'y avait par conséquent aucune érosion possible. Par après, du fait d'éruptions volcaniques, des îles apparurent ce qui permit à l'érosion de se manifester avec, pour conséquence, l'édification des premiers sédiments. L'étude des assises successives du Précambrien permet d'établir qu'aux matériaux de nature purement volcanique se mêlèrent bientôt des sédiments normaux en proportion de plus en plus grande, au fur et à mesure que l'action se prolongeait.

Par classement des matériaux libérés par l'érosion, la séparation se fit de plus en plus complète, les éléments légers de nature acide restant près du rivage, les éléments basiques, plus facilement mis en solution étant entraînés vers la mer. De ces diverses actions résulta une sorte de ségrégation de la croûte océanique primitive. L'étendue de la plate-forme littorale, formée de l'accumulation des

⁽¹⁾ *A Symposium on Continental Drift*, Royal Soc. of London, 1965, p. 208.

⁽²⁾ W.C. Grussov, *Metastasy in Polar Wandernig and continental Drift*, Edited by Arthur C. Munyan, Soc. of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, juillet 1963.

matériaux légers s'accrut progressivement au détriment de l'océan. Ces diverses actions amenèrent un approfondissement progressif des océans. L'accumulation des matériaux en bordure du continent primitif put atteindre des épaisseurs considérables au point que, les premiers dépôts formés se métamorphisèrent, se transformant en roches cristallophylliennes.

Telle est, en résumé, d'après GRUSSOV, le processus suivant lequel s'est faite la séparation entre domaine océanique et domaine continental. Il expose quelques faits en vue d'établir la réalité de l'approfondissement des océans ⁽¹⁾.

Cette manière de concevoir les choses, n'est pas sans une certaine analogie avec l'hypothèse des blocs originels de sial enracinés dans le sima. Le processus apparaît différent sans doute, mais il donne une explication de la discontinuité originelle de la croûte sialique et par conséquent de l'isolement très ancien des masses continentales. On ne voit cependant pas pourquoi, dans ces conditions, il y aurait eu un hémisphère continental s'opposant à une vaste partie de la surface terrestre où dominent les océans.

L'hypothèse des blocs de sial, différenciés du sima et flottant à sa surface permet de mieux comprendre que, sous l'action de sollicitations extérieures, les continents aient eu une tendance à se rassembler sur une partie de la surface de la Terre, suivant la théorie de DALY, sans se présenter nécessairement sous l'aspect d'une terre unique, la Pangée.

A. 3. *Théorie de l'impact.*

Tout récemment, DONN et ses collaborateurs ⁽²⁾ ont repris l'examen du problème si délicat de l'origine des masses légères qui sont les continents. Ils rappellent tout d'abord que différentes hypothèses sont à prendre en considération :

a) La différenciation d'un matériau granitique aux dépens d'un magma basaltique ;

b) la concentration de matériaux légers à l'intervention de courants de convection issus du manteau, rassemblant en blocs isolés une sorte d'écume légère couvrant originellement la surface du globe ;

c) la formation des continents par impact de une ou plusieurs masses de faible densité. On a calculé que s'il se produisait un tel phénomène, il correspondrait à la chute de plusieurs masses de dimensions comparables à celles des continents. L'Australie et l'Antarctique exigeraient la chute de corps ayant des dimensions comparables à celles du plus grand des astéroïdes. La Lune pourrait correspondre à l'un de ces corps qui par impact donnerait un continent.

⁽¹⁾ Voir à ce sujet : H.H. HESS, *Drowned ancient islands of the Pacific Basin*, Amer. Journal of Science, vol. 244, n° 11, 1946.

⁽²⁾ William L. DONN, Bertram D. DONN and Wilbur G. VALENTINE, *On the Early History of the Earth*, Bull. Geol. Soc. of America 1, vol. 76, nr 3, march, 1965, pp. 287-306.

Malgré que des objections aient été présentées à cette dernière théorie, DONN et ses collaborateurs estiment qu'elle explique le plus facilement la formation des continents composés d'une substance moins dense que le soubassement dans lequel ils sont enracinés. Il va sans dire qu'une telle hypothèse s'accorde avec le principe de la discontinuité originelle du sial, qui paraît devoir être admise actuellement.

Par contre, POLLARD (*Bull. geol. soc. America*, vol. 77, 1966) estime que les arguments avancés par ces auteurs sont insuffisants pour appuyer leur hypothèse.

Il ne faut pas perdre de vue que dans la thèse de la discontinuité originelle deux interprétations sont encore possibles : ou bien, lors de leur formation, les blocs primitifs de sial étaient déjà situés approximativement à l'emplacement des continents actuels, avec leur partie centrale précambrienne ; ou bien ils étaient rassemblés en une masse unique telle la Pangée de WEGENER, masse qui se disloqua par la suite, avec dérive de ses fragments. Ce sera l'objet de la 2^e partie de ce rapport de donner les arguments en faveur de l'une ou de l'autre conception.

Les thèses que nous venons d'exposer brièvement partent de l'idée qu'au moment de la solidification de la croûte primitive, la partie légère de celle-ci, correspondant au sial n'était pas continue sur toute la surface de la Terre. Nous allons rappeler succinctement deux autres conceptions qui partent de l'idée opposée, à savoir une continuité parfaite ou à peu près de la couche sialique résultant des premières différenciations.

B. 1. *Hypothèse de Chevallier et Cailleux.*

En 1958, ces savants ont publié un article ⁽¹⁾ destiné à établir que si l'on pouvait ramener à leur forme primitive les couches plissées des terrains archéens des massifs centraux des continents, on arriverait à recouvrir complètement la surface du globe. En conséquence, le plissement de la croûte sialique a eu pour résultat de dégager le sima à l'emplacement des océans et d'isoler les continents les uns des autres.

Malheureusement, on se rend compte bien difficilement du mécanisme d'une telle transformation intéressant toute la surface du globe, alors que les massifs centraux antérieurs au Cambrien ne couvrent, en réalité, qu'une portion bien minime de la surface de la Terre.

B. 2. *Hypothèse de Belousov.*

Dans un travail récent ⁽²⁾, notre savant confrère de l'Académie des Sciences de Moscou a émis une hypothèse différente des précédentes pour rendre compte de la discontinuité du sial.

⁽¹⁾ J.M. CHEVALLIER et A. CAILLEUX, *Essai de reconstitution géométrique des continents primitifs*, Zeitschr. für Geomorphologie, Bd. 3, Ht. 4, 1958.

⁽²⁾ V.V. BELOUSOV, *Development of the Earth and Tectogenesis*, Journal of Geophysical Research, vol. 65, n° 13, 1960.

Tout d'abord, en ce qui concerne l'origine première de la Terre, l'auteur adopte l'hypothèse « planetesimale ». A ses débuts, la planète était froide et de composition homogène. L'élévation progressive de sa température est due à la radioactivité. Il y a actuellement déperdition de chaleur dans la zone superficielle jusqu'à 500 kilomètres de profondeur ; plus près du centre, au contraire, la température augmente, d'où possibilité d'expansion.

C'est là un autre aspect du problème.

BELOUSSOV admet que l'histoire géologique de la Terre se résume en deux phases essentielles : a) formation d'une croûte granitique par différenciation ; des solutions de silicates, d'alcalis, de constituants volatiles émanant du manteau auraient gagné la surface pour constituer une croûte granitique primitive, continue sur toute la surface de la planète ; b) au cours d'une seconde phase, il y aurait eu montée de basalte, digérant partiellement la croûte granitique, détruisant ainsi sa continuité première, en même temps que s'approfondissaient les bassins océaniques par une descente due à l'augmentation de densité, de la croûte résultant de sa basification progressive. Comme argument en faveur de cette thèse, BELOUSSOV cite le cas du haut plateau du Tian-Shan existant depuis le Paléozoïque moyen avec rajeunissement au Cénozoïque ; sa racine est basaltique et non pas granitique. De même les venues basaltiques des grabens africains et notamment du fond de la Mer Rouge sur une largeur de 60 kilomètres et aussi les émissions si importantes de « basalte des plateaux » sont en faveur de sa théorie (1).

Il y a lieu de signaler à ce sujet que, d'après les études poursuivies par les géologues russes, dans la région des mers intérieures (Caspienne et Mer Noire) le soubassement granitique fait défaut au-dessus de la discontinuité de MOHOROVICIC. Les savants soviétiques sont portés à croire que le matériau de nature granitique a disparu par suite d'une « basaltification » conformément aux vues de BELOUSSOV (2).

On sait d'ailleurs que la formation des eugéosynclinaux est marquée par un important apport de matériel basique ; c'est le cas dans les Alpes notamment. Les actions de basaltification sont à prendre largement en considération, non seulement dans les chaînes plissées, mais aussi à l'endroit des plate-formes (3).

En résumé, suivant le principe de la basification mis en avant par BELOUSSOV, l'isolement des continents est la conséquence de la montée du magma basaltique qui a digéré et fait disparaître le sial à l'endroit des océans. On peut croire qu'il y a de ce fait une relation évidente avec l'existence de courants s'élevant du manteau et dont la localisation serait la conséquence d'une moindre épaisseur de la croûte sialique originelle à leur endroit. Cela revient, en somme à admettre

(1) On consultera à ce sujet le travail suivant : P. BELLAIR, *Le volcanisme de l'Afrique septentrionale*, Publ. Congr. Geol. Intern. XX Session, Mexico 1956, S^o : I : *Volcanologie du Cénozoïque* (tome I), Mexico, D.F. 1957.

(2) Tiré de GEOTIMES, avril 1965, page 12.

(3) Voir à ce sujet : A.A. BOGDANOFF, M.V. MOURATOV et V.E. KHAIN, *Éléments structuraux de la croûte terrestre*, Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam., vol. V, fasc. 4, Paris, 1963.

que les aires centrales des masses continentales sont en rapport avec des zones de plus grande épaisseur d'une croûte sialique continue. On approche ainsi de la notion d'une discontinuité originelle du Sial.

Cette réflexion est, d'ailleurs en harmonie avec la thèse des courants de convection. En effet, compte tenu des expériences de GRIGGS, de tels courants ont dû se localiser là où il n'y avait pas de croûte sialique ou tout au moins, dans l'hypothèse d'une croûte sialique continue, là où celle-ci présentait l'épaisseur minima.

Ces considérations nous font penser que si la croûte sialique était continue à l'origine sur toute la surface du globe, elle présentait des variations importantes dans son épaisseur.

L'hypothèse de la basification progressive de certaines parties de la croûte terrestre, prônée aussi par Y.M. SCHEINMANN pour expliquer la nature du fond de l'Atlantique Nord ⁽¹⁾ ne peut être prise en considération que sous certaines réserves. Il conviendrait, en effet, de montrer dans quelle mesure elle s'harmonise avec les phénomènes de granitisation et notamment avec la mise en place des grands massifs de roches granitiques tels ceux qui jouent un rôle prépondérant dans la constitution d'une grande partie des Andes en Amérique du Sud.

C. EXPANSION DE LA TERRE ⁽²⁾.

Il est à peine nécessaire de rappeler ici que, pendant très longtemps, à la suite notamment des travaux de lord KELVIN, les géologues, adoptant les vues d'Élie de BEAUMONT se rallièrent à la théorie de la contraction de la Terre, laquelle était originellement à l'état de fusion ignée. C'était le moyen le plus simple, en apparence, d'expliquer les plissements de l'écorce terrestre à l'intervention des efforts tangentiels.

Cependant l'astronome J.K.E. HALM de l'Afrique Australe, dès 1935 apporta des arguments contre cette manière de concevoir les choses. Il se basait sur les connaissances acquises à cette époque quant à l'évolution des étoiles. Il estimait que la densité originelle de la Terre était de 9.13 au lieu de 5.5, sa densité actuelle; son rayon était de 5.430 kilomètres au lieu de 6.371 kilomètres.

Cette conception nouvelle passa d'abord presque inaperçue, mais elle trouva par la suite des protagonistes.

Parmi les études les plus remarquables à ce sujet, nous en retiendrons deux, celle d'EGYED et celle de CAREY.

⁽¹⁾ Y.M. SCHEINMANN, *Duration of Earth Crust transformation*. Tectonophysics 1 (5) (1964), 377-383. Elsevier Publishing Cy, Amsterdam.

⁽²⁾ On consultera avec intérêt le chapitre consacré à cette question par Arthur HOLMES dans son ouvrage: *Principles of physical Geology*, Nouvelle édition Th. Nelson, Londres et Edimbourg, 1965.

C. 1. *Théorie d'Egyed.*

Cette théorie soulève des problèmes de grand intérêt pour notre travail ; il convient que nous l'exposions avec quelque détail.

D'après les derniers travaux du savant géophysicien hongrois ⁽¹⁾, la partie centrale de la Terre (noyau) ne serait pas de nature métallique (fer-nickel) comme on l'admettait généralement autrefois ; elle serait faite de matériaux silicatés, tout comme le reste de la planète, mais à l'état de « dégénérescence » conséquence de la haute pression existant à la limite du noyau. Suivant l'opinion de DIRAC ⁽²⁾ par un abaissement continu de la pression, il se produit une diminution progressive de la densité, ce qui revient à une expansion du globe. Dans ces conditions, la croûte, continue à l'origine, doit se déchirer ; l'écartement des fragments disjointes crée des espaces à fond de sima, dépressions où vont se concentrer les eaux des océans.

Le déplacement relatif des blocs continentaux provoqué par l'expansion du Globe a de ce fait des effets comparables à ceux de la dérive puisqu'il permet la séparation des fragments de la croûte originellement accolés les uns aux autres.

A l'appui de sa thèse, EGYED a réalisé une expérience à petite échelle montrant que la formation d'une large dépression par l'expansion d'une sphère n'est pas illusoire. Il est cependant bien délicat d'appliquer à la Terre tout entière les déductions tirées d'un essai de ce genre. Rappelons qu'autrefois des savants réputés avaient la prétention d'expliquer toutes les particularités des zones plissées à l'aide d'expériences réalisées sur des modèles de quelques décimètres de longueur. Peu de personnes accepteraient encore aujourd'hui de prendre de telles comparaisons en considération, si ce n'est pour l'interprétation de détails secondaires de la tectogenèse.

A titre d'information, nous citons ici l'article du professeur K.M. CREER de l'Université de Newcastle-on-Tyne paru dans la revue *Nature* (n° 203 de 1964). Ce savant affirme avoir vérifié la théorie de l'expansion en calquant sur des calottes de matière plastique les masses continentales d'un globe terrestre. Après avoir découpé ces calques et les avoir remodelés à chaud il les disposa sur une sphère de rayon moitié moindre, qu'ils recouvrirent parfaitement à un détail près.

Aussi le professeur CREER croit-il pouvoir affirmer que la séparation des continents est due à la dilatation progressive de la Terre. Elle se serait faite très lentement (environ cinq centimètres par siècle) et les déchirures se seraient produites en plusieurs étapes. La première aurait séparé l'Asie actuelle des côtes occidentales de l'Amérique, en même temps que le Globe atteignait ses dimensions d'aujourd'hui.

⁽¹⁾ L. EGYED, *La théorie dynamique de la Terre*, Rev. géogr. Phys. et Géol. dynam., vol. II, fasc. 3, 1963.

⁽²⁾ Comme le fait observer notre confrère Ledoux, la thèse de Dirac repose sur des vues cosmologiques très spéculatives qui n'ont reçu jusqu'à présent aucune confirmation dans le domaine astronomique (évolution de l'univers, des étoiles) où les effets les plus sensibles devraient se marquer.

Le principe est donc le même que dans la théorie d'EGYED, mais la marche du phénomène semble avoir dû se faire de façon quelque peu différente.

C. 2. *La théorie de S.W. Carey* (1).

Après une étude rigoureuse de la tectonique du monde entier, S. WARREN CAREY arrive à la conclusion qu'il est impossible de faire une reconstitution rationnelle de la face de la Terre à la fin de l'ère paléozoïque sans admettre que la planète avait alors un rayon plus petit que le rayon actuel ; cela revient à dire que, depuis lors, la Terre est en expansion.

CAREY arrive ainsi à la conclusion que la surface de la Terre, y compris l'étendue du Pacifique a augmenté de 28,5 % ; en ne faisant pas intervenir cet Océan, l'expansion peut être estimée à 44 % de la surface originelle.

Nous essayerons de résumer sa thèse ou tout au moins d'en rappeler les données essentielles.

La méthode de travail de CAREY est la suivante : Il s'efforce de rétablir la paléogéographie de la surface terrestre à la fin du Paléozoïque, en ramenant à leur état et emplacement originels les formations plus récentes qui ont été déformées par plissement ou déplacées par le jeu des grandes failles.

Il admet d'autre part, que la croûte à l'endroit des Océans présente une résistance marquée aux déformations, voire même une résistance supérieure à celle des aires géosynclinales des continents et peut-être à celle des boucliers qui en constituent la partie centrale. Il écarte, de ce fait, l'idée que les continents sont susceptibles de se mouvoir librement à la surface du globe ; il renonce ainsi à la conception de WEGENER.

Par contre, il défend l'opinion que, par dilatation, des dépressions peuvent se former sur les fonds marins comme au travers des masses continentales ; dans son esprit, l'Atlantique, la Mer Rouge, et les fossés d'effondrement du continent africain résultent d'actions identiques. L'auteur s'efforce de démontrer que les « rift valleys » résultent d'efforts de tension même si l'on y rencontre des couches plissées.

En outre, selon lui, le remplissage des dépressions ainsi créées se fait par la montée de sima cristallin.

Pour mettre en évidence l'expansion de la Terre, CAREY s'efforce de montrer qu'après une phase de plissement ayant donné un orogène sensiblement rectiligne, il a pu se produire un changement brusque de direction de cet orogène en relation avec une déchirure de la croûte du côté convexe de la courbe ainsi formée ; en s'ouvrant progressivement, par une sorte de mouvement de rotation centré sur la courbure de l'orogène, la fracture a laissé apparaître le Sima en surface soit sous forme d'une surface triangulaire (Sphénochasm) soit sur une étendue de forme rhomboïdale (rhombochasm). Il en résulte forcément un accroissement

(1) S. WARREN CAREY, *Tectonic approach to continental Drift*, in *Continental Drift*, A Symposium, Geol. Departm. University of Tasmania 1958. Hobart (Tasmanie).

de la surface de la Terre, conduisant à une augmentation de son rayon, c'est-à-dire une expansion.

Pour appuyer sa conception de l'expansion du Globe, CAREY décrit une série de cas particuliers choisis dans différentes parties du globe, de manière à expliquer la séparation de blocs continentaux autrefois jointifs, séparés actuellement par l'Océan. Il arrive ainsi à des résultats comparables à ceux que d'autres auteurs cherchent à expliquer par la théorie de la dérive des blocs sialiques.

Nous pensons préférable de reporter la discussion de la théorie de l'expansion à la deuxième partie de l'ouvrage, après avoir procédé à un examen critique de la dérive des continents à l'aide des enseignements fournis par diverses disciplines. Certains arguments sont, en effet, valables pour la critique de la thèse de l'expansion comme pour celle de la thèse Wegenerienne.

D. THÉORIE DE JEAN LAGRULA.

A l'occasion de cet exposé sur l'origine des masses continentales, nous croyons utile de rappeler sommairement une théorie nouvelle émise par le professeur JEAN LAGRULA de l'Université d'Alger.

Selon lui, à l'époque de l'Antécambrien le plus ancien, la Terre était à l'état *naturel* ; sur toute sa surface s'étendait la *Panthalassa*, océan mondial uniforme. Au cours d'une période froide, des inlandsis prirent naissance dans les régions polaires. Au fur et à mesure de la croissance de ces massifs glacés, et cela grâce à l'érosion et à la sédimentation sous-crustale, une racine compensatrice se forma. Lors de la fonte de l'inlandsis, le réajustement isostatique provoqua un mouvement ascendant de la racine, ce qui eut pour effet l'émersion d'un continent primitif.

Les géologues hésiteront sans doute à se rallier à cette conception nouvelle.

E. CONCLUSIONS.

En *conclusion* de ce chapitre deux points essentiels paraissent devoir retenir spécialement l'attention :

- a) continuité ou discontinuité de la première croûte sialique ;
- b) dans l'hypothèse de la discontinuité, blocs isolés de Sial ou leur rassemblement en une Paugée originelle.

Ici une réflexion s'impose : s'il a existé une croûte sialique continue, pourquoi tous les fragments provenant de sa dislocation n'ont-ils pas évolué de la même manière sur leurs bords ? Comment expliquer que les côtes du Pacifique diffèrent si profondément de celles des autres océans ? Pourquoi la Mésogée (Tethys), mer essentiellement épicontinentale pourrait-elle avoir été un trait permanent

de la surface du globe pendant toute la durée des temps géologiques, avec une tendance à se resserrer progressivement, en apparence tout au moins ?

Par ce bref rappel des idées en cours, on voit combien est délicat le problème dont l'étude nous a été confiée. La base même fait défaut puisqu'à l'heure actuelle les géologues et les géophysiciens n'ont aucune certitude quant à l'aspect de la surface de la Terre au moment où a débuté son histoire géologique. L'hypothèse la plus probable paraît être celle de la discontinuité originelle de la partie sialique de la croûte ; s'il en est bien ainsi le problème consiste à rechercher si ses fragments étaient au départ assemblés en une Paugée unique ou s'ils étaient disjoints comme ils le sont aujourd'hui. Peut-être convient-il de songer aussi à une autre hypothèse : la concentration du sial en une masse unique à des époques diverses, séparées par des phases de dislocations. Il est cependant bien délicat de vouloir s'engager dans cette voie.

La deuxième partie du rapport sera consacrée à l'examen méthodique des arguments présentés en faveur du fixisme ou du mobilisme. Si nous arrivons à conclure en défaveur de la thèse de la dérive pour expliquer la répartition actuelle des terres et des mers, nous arriverons forcément à renoncer au principe de l'expansion tout au moins dans sa forme généralisée. Nous ne manquerons pas cependant d'en rappeler la signification à la fin de la deuxième partie.

CHAPITRE III

LA STRUCTURE DES MASSES CONTINENTALES

Nous avons insisté antérieurement sur la différence essentielle qui existe entre la composition lithologique des masses continentales et celle des grands fonds océaniques. On peut supposer qu'il en fut ainsi dès la solidification de la croûte primitive, quelle que fut la répartition des continents dans les premières phases de l'évolution géologique de la Terre.

D'autre part, la géologie enseigne que les continents ont subi depuis cette époque lointaine une évolution profonde. Dès le début de leur existence, les masses sialiques devaient former relief à la surface du globe, dépassant le niveau moyen des océans primitifs. Sous l'action des agents atmosphériques l'érosion s'y est produite suivant des règles analogues à celles de la nature actuelle. Les matériaux provenant de la désagrégation des zones de relief ont été entraînés dans les dépressions où ils se sont accumulés sur des épaisseurs considérables, compte tenu de la subsidence résultant de l'accumulation même de ces matériaux suivant le principe de l'isostasie. Par après, ces sédiments ont été déformés, plissés, métamorphisés. De ce fait, certaines parties basses de la surface des continents correspondant aux aires à sédimentation maximale (géosynclinaux) ont été changées en de nouveaux reliefs, dont l'évolution s'est faite à son tour conformément aux mêmes règles. Sur un continent ou sur une fraction de continent, l'évolution géologique se marque ainsi par des mouvements oscillatoires dirigés suivant la verticale.

Les déformations de la croûte terrestre sont de diverses natures ; ou bien elles consistent en zones plissées avec toutes leurs complications, telles les plis de formes diverses et les nappes de charriage, ou bien elles sont marquées par le déplacement de massifs plus ou moins étendus entre des fractures subverticales qui sont les failles radiales (aujourd'hui appelées aussi failles de profondeur).

La preuve de ces déplacements oscillatoires de secteurs de la croûte terrestre est donnée par la présence de dépôts à faune marine à des altitudes parfois considérables à l'intérieur des continents, jusqu'au sommet des montagnes les plus hautes du Monde.

La présence de tels sédiments jusque dans la partie centrale des plus grands continents peut faire supposer qu'il y eut, au cours des temps une modification profonde dans la distribution des terres et des mers. Si la chose est indiscutable au point de vue géographique, il convient de ne pas lui donner la même valeur quant à l'évolution géologique de la surface du Globe. Il n'est nullement établi

que de grands océans avec leur fond de matériau basique et dense se sont installés là où précédemment existait la terre ferme. Il est facile d'établir que les dépôts marins situés aujourd'hui loin des côtes de l'océan ont été formés dans des mers épicontinentales et non pas dans de grandes fosses océaniques.

C'est là un point très important sur lequel il convient d'attirer tout particulièrement l'attention. En effet, si les massifs continentaux d'aujourd'hui n'ont été envahis autrefois que par des mers continentales, ne faut-il pas voir là la preuve d'une stabilité des grandes zones sialiques qui sont les masses continentales, s'opposant aux grands fonds océaniques de nature toute différente ?

Nous croyons utile à ce propos de reproduire une phrase écrite par notre confrère, le professeur Paul MICHOT ⁽¹⁾ :

« Ce ne sont cependant pas de tels déplacements verticaux qui transforment les domaines océaniques en domaines continentaux : *nulle part en effet on ne trouve à la surface des continents une région qui, par sa constitution, rappelle la croûte océanique*, à savoir une couverture sédimentaire horizontale surmontant un fond basaltique ; toutes les étendues basaltiques même épaisses reconnues sur les continents reposent sur des sédiments ou des domaines cristallins sialiques (province de Thulé, Karroo, Deccan, etc.) ; elles sont donc un intermède dans l'histoire continentale ».

Comme nous l'avons dit ci-avant, c'est là un argument en faveur de l'immobilité du domaine continental à la surface de la Terre. Cette conclusion serait appuyée encore par l'observation suivante : Sous un ensemble de couches plissées concordantes aussi bien que sous de vastes étendues de formations sédimentaires horizontales, dont on peut atteindre la base, apparaît partout un bâti constitué par d'anciens sédiments affectés par les efforts orogéniques comme par le métamorphisme, compliqué éventuellement par des intrusions de roches éruptives.

On peut résumer la situation en citant encore une phrase du travail de P. MICHOT, mentionné ci-avant :

« La structure des continents dans leur partie visible est donc essentiellement le produit de phénomènes orogéniques ; » et notre confrère ajoute : « *En fait la couche granitique est toute orogènes...* ».

On peut y voir la confirmation de ce que nous avançons tout à l'heure, à savoir que *la répartition de la croûte terrestre entre domaine continental et domaine océanique telle que nous la voyons aujourd'hui est une disposition très ancienne remontant peut-être à l'origine même de la croûte terrestre*.

S'il en est bien ainsi, il paraîtra difficile de se rallier sans réserve à la conception de l'expansion prônée par certains savants, à moins d'accepter qu'elle ait pratiquement cessé ses effets depuis l'époque de l'édification des premiers sédiments à la surface de la Terre.

Nous aurons l'occasion de reprendre l'examen de cette question. Auparavant, nous pensons utile de nous arrêter un instant au rappel de quelques notions

⁽¹⁾ P. MICHOT, *La structure continentale*, Bull. Classe Sciences Acad. roy. Belgique, 3^e sér., t. XLIX, n^o 12, 1963.

essentielles relatives aux grandes dislocations de la croûte terrestre : Les plissements (orogènes ou tectogènes) et les champs de fractures radiales.

A. LES ZONES PLISSÉES (Orogènes).

On sait que toute zone plissée est limitée dans le temps comme dans l'espace. Son point de départ est le géosynclinal, c'est-à-dire une aire de subsidence maximale, due suivant les théories modernes, à des courants de convection dans le manteau ⁽¹⁾. Dans une dépression formée à leur intervention, les sédiments se sont accumulés sur une épaisseur parfois énorme, pour autant que les massifs émergés voisins aient pu fournir les matériaux nécessaires. L'évolution tectonique, correspondant à la transformation du géosynclinal en zone de relief, vient ensuite; les terrains sédimentaires, horizontaux à l'origine, sont affectés de plis et de charriages atteignant parfois une ampleur énorme; en même temps, ces terrains sont affectés par le métamorphisme dont le stade le plus avancé est leur transformation en roches cristallophylliennes et en roches granitiques.

Toute zone soulevée au-dessus du niveau des mers est soumise à l'érosion jusqu'à atteindre le stade de pénéplanation. Dès ce moment, l'orogène a atteint son stade final.

L'examen quelque peu détaillé de la structure des orogènes établit combien est complexe la construction d'un tel édifice. Bien que la seconde phase marquée par la surrection et le plissement de l'orogène soit relativement brève vis-à-vis du temps que demande le remplissage d'une aire géosynclinale de quelque importance, elle n'en est pas moins la résultante d'une suite de phases secondaires : la surrection ne se fait pas partout à la fois; elle débute dans une partie de la fosse géosynclinale pendant que le dépôt des sédiments se poursuit dans le reste du bassin; puis la ride gagne progressivement de telle manière qu'il peut s'écouler un temps appréciable entre le plissement de deux parties proches l'une de l'autre; il en résulte souvent des remaniements des déformations tectoniques antérieures (nappes par exemple) au fur et à mesure que s'achève la construction de l'édifice orogénique. Comme corollaire, l'érosion de la chaîne plissée ne débute pas partout en même temps.

Il est à peine besoin d'ajouter qu'une telle évolution d'un fuseau de l'écorce terrestre peut se réaliser symétriquement par rapport à l'axe de la première ride formée; l'ensemble de la zone plissée a de ce fait une allure en éventail; KOBER a attiré tout particulièrement l'attention sur cette disposition symétrique, en lui attribuant peut-être une valeur trop absolue ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Voir à ce sujet : F.A. VENING MEINESZ, *The Earth's crust and mantle*, Elsevier publishing Company, Amsterdam, 1964.

⁽²⁾ L. KOBER, *Der Bau der Erde*, 2^e édit., Berlin, 1928.

Il faut ajouter que, dans l'esprit de KOBER, la partie axiale d'une telle zone plissée a une tendance à s'affaisser, ce qui peut conduire à la formation d'une vaste dépression telle la Tyrrhénide, la plaine pannonique, etc... désignées par KOBER sous le nom de « Zwischen Gebirge ».

Cette façon de concevoir l'édification d'une zone plissée ou orogène est intéressante pour le sujet qui nous intéresse. Elle permet de comprendre notamment que certaines chaînes de montagnes soient limitées à un seul versant de l'éventail imaginé par KOBER ; dans ce cas, tous les plis sont, à quelques exceptions près déversés vers l'avant-pays ; par contre, l'arrière pays s'est effondré suivant une zone de fracture correspondant à la zone failleuse qui limite d'un côté la Zwischen Gebirge d'après les vues de KOBER. Nous en connaissons des exemples très beaux par exemple à la bordure occidentale de la chaîne calédonienne de Scandinavie, à la limite orientale de la chaîne des Appalaches sur le territoire des États-Unis d'Amérique, de l'Apennin et bien d'autres.

Cela permet de comprendre qu'une masse continentale a pu s'étendre autrefois bien au-delà de la limite actuelle de l'Océan qui la borde aujourd'hui.

Pour les Appalaches, par exemple, on a pu montrer que la sédimentation pendant le Dévonien était alimentée par des matériaux venant de l'Est, c'est-à-dire d'une ligne de hauteurs qui émergeaient à cette époque dans la direction de l'Océan Atlantique.

Une autre conclusion découle aussi de ce que nous venons de rappeler à propos de la construction progressive d'une zone plissée. Les différentes rides accolées les unes aux autres qui en sont les éléments essentiels sont forcément parallèles les unes aux autres. On conçoit ainsi que deux zones plissées plus éloignées dans le temps aient obéi à une règle semblable. Ainsi s'explique la règle bien connue du parallélisme approximatif des zones plissées successives. Une telle règle, hâtons-nous de le dire, n'est pas absolue. On connaît de nombreuses exceptions ; il n'empêche qu'elle se vérifie si l'on n'envisage que les traits majeurs de l'évolution de la croûte terrestre et de ses masses continentales.

D'autre part, la surrection d'un orogène ravine le relief, soumis alors aux agents de désagrégation ; les nouveaux sédiments ainsi formés se déposent en grande partie au pied de la nouvelle chaîne, là où, suivant les lois de l'isostasie il y a tendance toute naturelle à la subsidence. C'est encore une raison pour qu'il y ait tendance au parallélisme des zones plissées successives.

Il ne nous paraît pas nécessaire de reprendre, en détail à propos de l'élaboration du présent rapport, l'exposé des diverses théories qui ont été imaginées pour expliquer toutes les particularités d'une zone plissée de la croûte terrestre. Nous renvoyons aux traités généraux. Cependant pour les géologues qui cherchent à se documenter sur la question si controversée de la Dérive des Continents, nous croyons bien faire de signaler l'article de CHADWICK ⁽¹⁾ paru dans le même volume

⁽¹⁾ P. CHADWICK, *Mountain Building Hypotheses in Continental Drift*, edited by S.K. Runcorn International Geophysics series, vol. 3, p. 195, Academic Press, New York et Londres, 1962.

que le travail de RUNCORN ⁽¹⁾ auquel nous aurons à nous référer longuement au cours de la deuxième partie.

Dans cet article, CHADWICK cherche à mettre en évidence la complexité du problème ; il conclut par cette phrase :

“ Recent reviews of work on the formation of mountains argue unanimously that none of the hypotheses so far proposed is free from serious drawbacks. This conclusion also emerges from the present survey alongside the view that the subject is likely to remain in its present unsatisfactory state until the nature and mode of action of the basic diastrophic forces are much more clearly understood ”.

En s'exerçant sur le relief dépassant le niveau des mers, l'érosion trouble forcément l'équilibre isostatique ; par le fait même, l'édifice tectonique s'élève lentement jusqu'à ce que la discontinuité de MOHOROVICIC ait atteint son niveau normal ; dès ce moment est atteint le stade final de l'orogénèse marqué par la pénéplanation de la région plissée avec apparition en surface de matériaux évolués à plus ou moins grande profondeur, pouvant avoir atteint de ce fait un métamorphisme très avancé.

Le résultat final est qu'un orogène correspond, en réalité, à une accumulation de matière légère sur une épaisseur variable suivant son importance. Les mesures gravimétriques comme celles de la déviation de la verticale au voisinage d'un massif montagneux, c'est-à-dire d'un orogène, ont établi depuis longtemps que le relief visible est compensé, ou presque, en profondeur. Il en résulte forcément que le massif sialique correspondant à l'orogène se présente sous forme d'un bourrelet allongé qui enfonce sa racine dans le sima sous-jacent et cela d'autant plus profondément que le relief est lui-même plus marqué. Des mesures géophysiques ont établi que la discontinuité de MOHOROVICIC à l'endroit des orogènes est déprimée d'une valeur égale à 4 ou 5 fois la valeur du relief visible.

Une telle accumulation du sial à l'emplacement d'un orogène semble ne pouvoir résulter que d'un *resserrement* de l'aire géosynclinale originelle.

On s'est efforcé dans des cas concrets, de mesurer le rétrécissement de la croûte terrestre correspondant à la surrection d'un orogène, l'évaluation étant faite suivant une section perpendiculaire à la direction du plissement. Il suffit, semble-t-il, de dérouler les plis et de ramener en arrière les nappes qui ont glissé vers l'avant-pays. Dans le cas concret des Alpes, CADISH a estimé que le rétrécissement est de l'ordre de 480 kilomètres pour une distance originelle de 630 kilomètres ramenée ainsi à 150 kilomètres ⁽²⁾.

Ces évaluations paraissent aujourd'hui fort exagérées. D'après les conceptions tectoniques récentes les plis proprement dits et les nappes peuvent résulter de phénomènes de glissement sur des surfaces peu inclinées, en relation, non pas

(1) S.K. RUNCORN, *Paleomagnetic Evidences for Continental Drift. and its geophysical Cause.*

Même volume p. 1.

(2) J. CADISH, *Geologie der Schweizer Alpen*, 2^e édit. avec la collaboration de E. Niggli, Éditions Wepf et Co, Bâle, 1953.

avec des poussées tangentielles, mais avec des contraintes orientées suivant la verticale, notamment sous la seule action de la pesanteur.

Les estimations proposées par André AMSTUTZ sont, à cet égard beaucoup plus modérées. Il évalue, en effet, le rétrécissement à l'emplacement des Alpes à 50 kilomètres seulement ⁽¹⁾. Nous croyons pouvoir nous rallier à cette manière de voir.

A ce propos, nous citerons un bref passage de l'ouvrage de HOLMES auquel nous avons déjà fait appel précédemment :

“ But now it is realised that folding and thrusting do not necessarily imply crustal shortening... » ⁽²⁾.

Si un orogène est limité dans le temps, il l'est aussi dans l'espace. A titre d'exemple, on peut prendre le cas des Alpes et du Jura où les terrains mésozoïques et cénozoïques sont plissés, tandis qu'ils s'étalent en couches subhorizontales au-delà des limites de l'arc alpin, c'est-à-dire dans le centre et l'ouest de l'Europe.

D'autre part, suivant sa longueur, un orogène ne se prolonge pas indéfiniment ; il est limité, comme il l'est dans une section transversale. Pour certains, leur longueur est relativement restreinte ; pour d'autres, au contraire, elle peut être considérable comme c'est le cas pour le complexe orogénique récent des Alpes et de l'Himalaya.

L'ARRANGEMENT DES OROGÈNES. Sur la base de ces données, nous nous sommes montrés enclins à admettre la tendance à un parallélisme des orogènes édifiés successivement sur un même massif continental.

Nous allons aborder ce problème en nous basant sur ce que l'on sait de la structure géologique des continents.

Il ne nous est pas possible de reprendre cette question en détail. Elle intéresse cependant la solution du problème qui nous est posé. En effet nous sommes en présence de deux alternatives extrêmes : ou bien la surface de la Terre va en se rétrécissant, conséquence du refroidissement progressif de la Planète, ou bien il y a expansion ainsi que nous l'avons rappelé au chapitre précédent. Il paraîtrait difficile dans cette dernière hypothèse d'expliquer l'accumulation de matière sialique suivant une bande allongée de la surface terrestre correspondant à un orogène, avec son enracinement dans son substratum.

D'autre part, les courants de convection dont il a été fait état pour expliquer la concentration du sial originel à l'endroit des continents, sont à prendre en considération. On sait l'usage que A. RITTMANN ⁽³⁾ a fait de cette hypothèse pour expliquer la formation des orogènes et l'application remarquable qu'André AMSTUTZ ⁽⁴⁾ a cru pouvoir proposer pour expliquer la tectonique alpine.

⁽¹⁾ A. AMSTUTZ, *Le domaine alpin s'est-il beaucoup contracté au cours de sa tectogenèse*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. 262, série D, 28 mars 1966.

⁽²⁾ A. HOLMES, *Physical geology new editions*, 1964, p. 965.

⁽³⁾ A. RITTMANN, *La température nelle crosta terrestre e l'orogenesi*, Mem. e nota dell' edit. di geol. appl. dell' univ. di Napoli, Vol. I, 1947-48, p. 21.

⁽⁴⁾ On trouvera en résumé les faits essentiels de la théorie d'Amstutz dans l'ouvrage suivant : « *Session spéciale de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie et de la Société géologique de Belgique* », tenue à Genève, Cogne et Domodossola du 7 au 14 septembre 1962. Bull. Soc. belge géol., t. LXXI, fasc. 3, 1963.

Certes des objections sérieuses peuvent être présentées. Nous en citerons une seule : si la théorie paraît s'appliquer sans peine aux chaînes qui bordent le Pacifique sur tout son pourtour, pourquoi ne trouve-t-on pas la même disposition en bordure des autres océans, notamment de l'Atlantique et de l'Océan Indien ? Et cependant, comme nous le verrons ci-après, les fonds océaniques situés en bordure sont sensiblement de même constitution de part et d'autre.

Quoiqu'il en soit, une fois l'orogène pénéplané, une nouvelle série sédimentaire peut se déposer en discordance de stratification sur la tranche des couches érodées. Elle pourra à son tour subir une évolution comparable à celle de l'orogène précédent, marquant ainsi une nouvelle période constructive du domaine continental.

Dans la majorité des cas, un compartiment de l'écorce terrestre apparaît, de ce fait, constitué par la superposition d'une série d'orogènes, pouvant à leur tour être couronnés par une couverture de sédiments horizontaux, ainsi que nous l'avons déjà indiqué.

Au cœur des continents se trouve un massif formé des roches les plus anciennes que l'on connaisse à la surface de la Terre ; elles sont plissées et métamorphisées. Ce massif supporte sur ses bords et sur une partie plus ou moins étendue de sa surface des terrains à peine plus jeunes qui n'ont pas été déformés par les efforts orogéniques ou ne l'ont été que de façon très modérée pour prendre une allure ondulée en larges dômes et en zones déprimées. Ces massifs très anciens sont les *boucliers* ; leur couverture de couches plus récentes en allure subhorizontale est désignée sous le nom de *plate-forme*.

Chacun de ces boucliers agrandi de sa plate-forme fait ainsi l'office de massif résistant sur les bords duquel se sont modelées les unités géologiques plus récentes.

Le Continent nord-américain est l'un des exemples les plus typiques de cette structure ⁽¹⁾.

Autour de la baie d'HUDSON s'étend un vaste massif couvrant aussi la majeure partie du Groenland. Ce sont des terrains antérieurs au Cambrien, plus ou moins métamorphisés. Par endroits, le massif est recouvert de Paléozoïque horizontal et non métamorphique ; ces mêmes formations, en couches faiblement inclinées, affleurent suivant sa bordure. Ce très vieux socle précambrien apparaît ainsi comme une masse rigide ; c'est le bouclier ou môle canadien. Au sud-ouest de ce bouclier, s'étend une vaste contrée formée de Paléozoïque horizontal ou à peine ondulé, correspondant à la région des grandes plaines ; c'est la plate-forme nord-américaine prolongeant la couverture du bouclier, soulignant ainsi l'importance que prend ce massif en profondeur au-delà de sa zone d'affleurement.

En bordure du bouclier et de sa plate-forme affleurent des terrains affectés par des plissements d'âge plus récent. A l'est c'est la chaîne des Appalaches dont la phase finale de plissement date de la fin du Carboniférien ; vers le nord la

⁽¹⁾ On consultera avec intérêt l'ouvrage : Ph. B. KING, *The evolution of North America*, Princeton University Press, 1959, Princeton, New Jersey, U.S.A.

structure est complexe et plusieurs phases de diastrophisme peuvent être distinguées notamment la phase taconique et la phase calédonienne, largement développée à la bordure orientale du Groenland.

Vers le sud, par les Monts Ouachita, les plis appalachiens contournent le bouclier et sa plate-forme et vont se rattacher à des plissements affectant le Permien de l'ouest des États-Unis (Névéda) suivant ainsi l'allure du bord occidental de la plate-forme. Parallèlement à la côte Pacifique se sont développées des chaînes plus récentes qui, vers le sud, s'incurvent pour se rattacher à l'arc des Antilles.

D'un autre côté, la zone plissée du Groenland se prolonge vers l'Alaska ; elle est suivie vers le nord par des plissements plus jeunes.

Cette disposition générale donne ainsi l'impression que le bouclier canadien a bien été le massif résistant qui a orienté les déformations ultérieures de ces terrains pour édifier les chaînes plissées successives. Le résultat a été de donner au continent américain sa structure actuelle si remarquable du point de vue géologique.

L'Europe est bâtie sur le même modèle que l'Amérique du Nord. Le môle scandinave, formé de Précambrien entoure la Baltique dans sa partie septentrionale et s'étend jusqu'à l'Océan Arctique ; il se prolonge vers le sud-est par la plate-forme russe où ses terrains sont recouverts par des formations paléozoïques et mésozoïques horizontales, ou affectées d'ondulations en forme de cuvettes (Synclises) ou de rides (antéclises) peu accusées. En bordure de ce très vieux massif résistant se sont dressés successivement des orogènes de plus en plus récents, calédonien et hercynien, suivis par les mouvements alpins dans la zone méditerranéenne qui rattache l'Europe à l'Afrique du nord et « aux chaînes de l'Asie centrale. Les plis posttriasiques de l'Océan Arctique sont en quelque sorte un équivalent atténué des chaînes posthercyniennes de la Méditerranée. La structure de l'Europe a bien été orientée par le vieux bouclier scandinave et sa plate-forme.

Une carte tectonique de l'Asie permet de voir qu'à l'est des grandes dépressions à terrains tertiaires et quaternaires s'étendant au pied de l'Oural, la situation est comparable. Autour d'un vieux bouclier et de sa plate-forme ⁽¹⁾ couvrant une vaste surface en Sibérie et dans le nord de la Chine, se sont édifiés, comme en Europe, des orogènes de plus en plus jeunes qui mettent en évidence la loi de la constitution tectonique des continents par l'accolement autour du bouclier rigide, de rides se moulant sur ses bords.

Dans ses grandes lignes, l'Amérique du Sud est la symétrique de l'Amérique septentrionale par rapport aux chaînes plissées récentes des Antilles.

On y distingue tout d'abord un vaste massif de Précambrien s'étendant sur une grande partie du Brésil et des Guyannes ; c'est le bouclier brésilien équivalent du bouclier canadien. Il est recouvert sur une partie importante de sa surface

(1) La plate-forme sibérienne s'étend autour d'un centre de terrains précambriens : le massif d'Anabar.

par des terrains paléozoïques et postpaléozoïques en couches horizontales ou peu inclinées, formant les bassins de l'Amazone et de Parnaibo-Sao Francisco.

A sa bordure, il s'enfonce sous des terrains plus récents en couches peu inclinées.

A l'ouest du bouclier Brésil-Guyannes s'allongent les chaînes plissées complexes des Andes ; elles sont parallèles à la côte du Pacifique, comme à la bordure occidentale du bouclier.

Sans doute les plissements des Andes, quant à la répartition de leur phase finale ne se succèdent pas systématiquement à partir du bouclier comme c'est le cas en Europe ; il n'empêche que le massif résistant Brésil-Guyannes a joué un rôle prépondérant dans la disposition d'ensemble des chaînes andines qui en épousent fidèlement la forme ⁽¹⁾.

L'Australie occupe une position symétrique de celle de l'Amérique du Sud par rapport à l'Océan Pacifique.

Un vaste massif précambrien forme l'ossature de toute la partie ouest du Continent australien ; il est recouvert par des lambeaux d'étendue variable de terrains plus récents, depuis le Paléozoïque jusqu'au Tertiaire ; vers l'est ce massif ancien, est bordé par des terrains paléozoïques affectés de plis d'âge taconique à l'intérieur du continent, puis par des plis d'âge hercynien, montant jusqu'au Permo-Trias dans la chaîne montagneuse qui suit la côte orientale de l'Australie. Plus à l'est encore, la rangée d'îles de la Nouvelle-Zélande aux îles de la Sonde, en passant par la Nouvelle-Calédonie correspond à une chaîne plissée plus récente d'âge andin qui se moule comme les précédentes sur le bord du Môle australien. Plus loin encore, des îles à plissements très récents (postmiocène) augmentent dans une large mesure, sous les eaux du Pacifique, la masse continentale de nature sialique correspondant à toute l'Océanie, c'est-à-dire au continent australien et aux nombreuses îles situées à l'est.

Si l'on tient compte de ce que, le long du rivage occidental de l'Australie, des déformations hercyniennes adoucies se sont produites, épousant ainsi l'allure du bouclier ancien du côté de l'ouest on arrive à cette conclusion qu'au cours des âges, ce massif précambrien, constitué de terrains sédimentaires plissés métamorphisés, semble s'être agrandi progressivement par l'adjonction de zones plissées de plus en plus jeunes. La règle est la même pour l'Australie que pour les autres massifs continentaux déjà envisagés.

L'Afrique ne fait pas exception à la règle.

Au nord d'un très vaste massif précambrien plissé et métamorphique, recouvert par places de lambeaux de terrains plus jeunes, apparaissent des zones plissées de plus en plus récentes ; les dernières, formées en bordure de la Méditerranée, se rattachent au système des plissements alpins du sud de l'Europe. Une étroite zone plissée affectant le Paléozoïque suit la côte occidentale de l'Afrique

⁽¹⁾ On consultera avec intérêt l'ouvrage : *Handbook of South American Geology an explanation of the Geologic Map of South America*, William JENKS, Editor Geolog. soc. of America, mem. 65, 1956.

saharienne jusqu'en Guinée, soulignant la forme du massif ancien dans cette partie du continent. Dans la partie méridionale de l'Afrique, le Précambrien domine encore largement suivi vers le sud par des formations plissées d'abord d'âge paléozoïque, puis d'âge Karroo (Carbonifère supérieur à Jurassique) ; le môle africain est ainsi bordé, tant au nord qu'au sud, par des zones de diastrophisme distribuées suivant la même règle que sur les autres continents, comme si l'Afrique actuelle résultait de l'accolement de rides plissées tout autour du bouclier précambrien.

Bien que caché en très grande partie par sa calotte de glace, le Continent Antarctique mérite de retenir l'attention car il constitue un trait d'union entre les continents sud-américain, africain et océanien. Compte tenu de sa surface, il joue un rôle important pour l'interprétation des faits susceptibles de conduire à la solution du problème de l'origine des Continents ⁽³⁾.

Suivant leur situation par rapport au méridien de GREENWICH, on distingue l'Antarctide orientale correspondant à un massif cristallin et cristallophyllien d'âge précambrien, terrains sédimentaires plissés et métamorphisés au même titre que les formations équivalentes des boucliers nord-américain, africain, brésilien et australien. Sur ce massif s'étendent des dépôts subhorizontaux datant du début du Paléozoïque au Permo-Trias ; il s'agit donc là d'un massif resté à l'état rigide depuis près de 600 millions d'années ⁽⁴⁾.

Par contre l'Antarctide occidentale est une zone de caractère géosynclinal où, d'après ce que l'on sait actuellement, se sont accumulés des sédiments depuis le Silurien jusqu'au Miocène, en une série de cycles orogéniques ; en d'autres termes, il s'agit d'une chaîne qui rappelle les Andes et aussi les arcs insulaires entourant l'Australie du côté du Pacifique.

L'Antarctide correspond ainsi à la juxtaposition de deux unités dont l'évolution géologique fut très différente : stabilité à l'est, instabilité à l'ouest. C'est une disposition comparable, dans les grandes lignes, à celle de l'Amérique du Sud. Sur une carte des terres environnant le pôle austral, on est frappé de voir la continuité remarquable entre les unités tectoniques de l'Amérique du Sud, de l'Australie et de l'océanie. Les chaînes récentes de la bordure orientale du Pacifique se suivent presque sans discontinuité depuis l'Amérique du Sud jusqu'en Nouvelle Zélande en passant par l'Antarctide occidentale. Par rapport à ce grand trait tectonique d'importance primordiale, les môles brésilien, antarctique et australien sont disposés de manière identique (figure ci-contre).

Il convient d'ajouter un détail qui a son importance : dans l'est de l'Australie il existe des plis affectant le Permo-Trias ; dans l'extrême sud de l'Afrique, les couches de même âge (Karroo) ont été redressées et plissées avant le retour de

⁽¹⁾ Nous renvoyons au bel ouvrage : *Geology and Paleontology of the Antarctic*, édité par B. HADLEY en 1965 (Antarctic Research series, de l'American Geophysical Union, volume 6).

⁽²⁾ D'après des mesures récentes, l'âge des roches de la partie centrale de ce massif précambrien peut être estimé à plus ou moins 1800 M.A.

E. PICCIOTTO et A. COPPEZ — *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 85, Bull. p. 263, 1962.

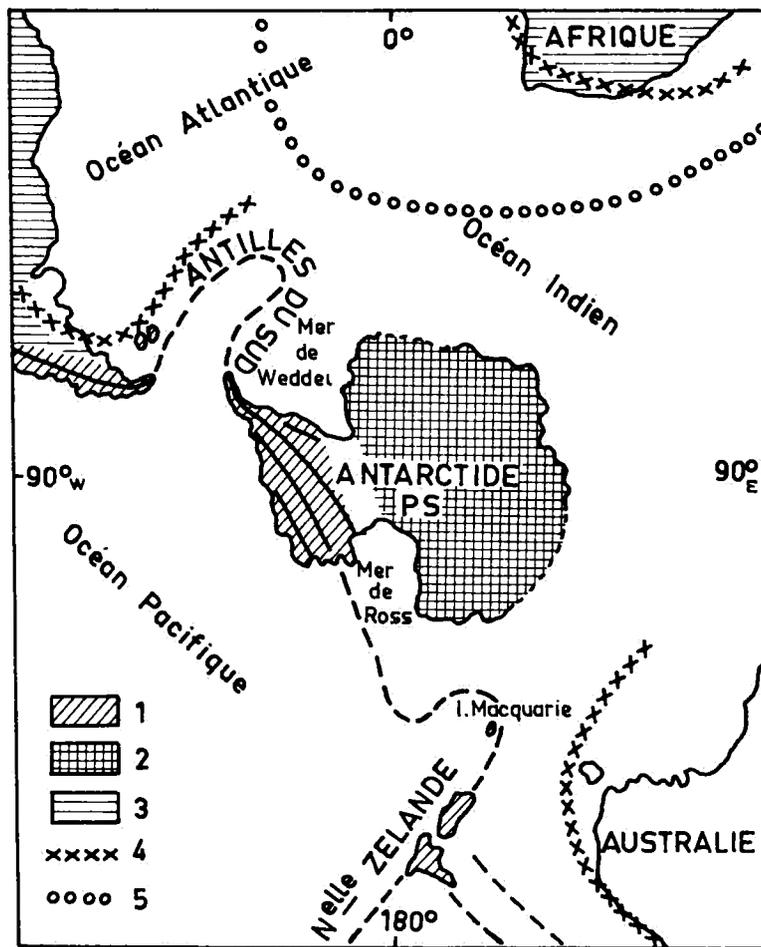


FIG. 2. — La situation de l'Antarctide par rapport aux continents voisins.
 1 : plis andins ; 2 : bouclier antarctique ; 3 : plis pré-andins ; 4 : plis post-Karoo ; 5 : crête médiane atlantique.

la mer au Crétacé ; aux îles Falkland comme dans la Sierra de Tandil et la Sierra de la Ventana (province de Buenos Aires) des plis affectent le Dévonien et aussi le Permo-Trias. Ces divers endroits de même signification géologique sont répartis suivant un arc qui épouse la forme générale de l'Antarctide. En combinant ces données à celle des plissements andins qui entourent ce continent du côté opposé, on doit se rendre à l'idée que la région de l'Antarctide est centrée sur un vieux massif rigide (Antarctide orientale) autour duquel, dans toutes les directions, se sont accolés des orogènes plus jeunes (fig. 2).

Si succinct que soit cet aperçu sur la constitution géologique des continents, il montre de façon indéniable que tous ont été édifiés suivant une règle identique :

Autour d'un massif devenu rigide depuis plus de 600 millions d'années, se sont faites des chaînes plissées qui se sont modelées sur ses bords. C'est la présence de ces anciens boucliers qui, du point de vue géologique, marque la notion du continent. La figure 3 met en évidence la présence de ces massifs à la surface du globe.

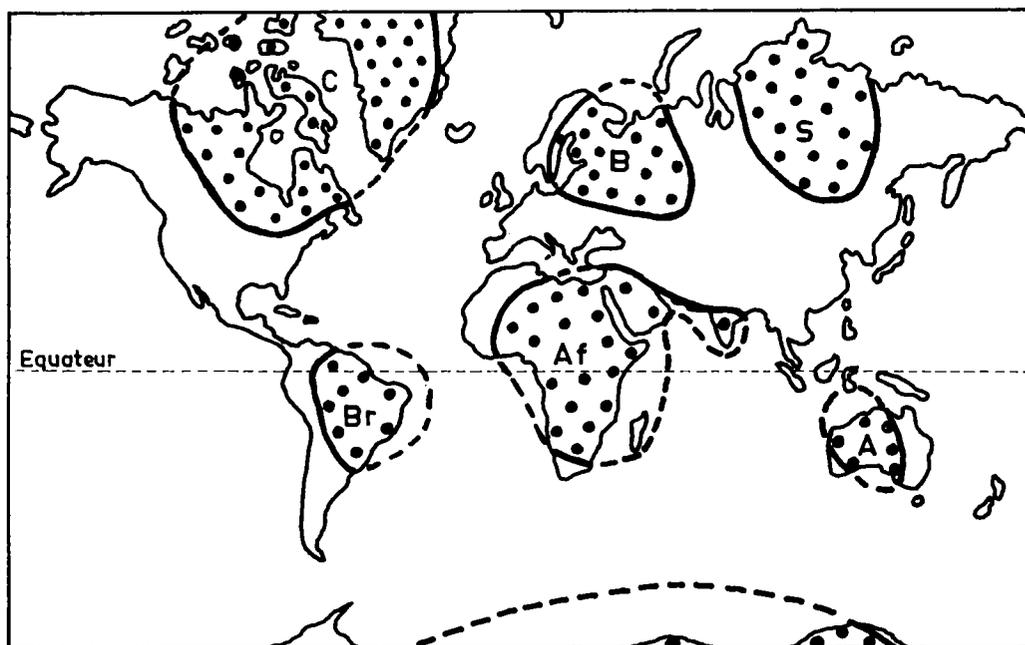


FIG. 3. — La répartition des boucliers à la surface de la Terre.

On dira peut-être que l'Inde péninsulaire a une signification analogue à celle des massifs rigides ou boucliers signalés à l'endroit des divers continents. Il est exact, en effet qu'elle comprend un soubassement précambrien plissé et métamorphisé sur lequel reposent, en couches horizontales, des formations beaucoup plus récentes datant de la fin du Carbonifère et du Permo-Trias, (formation de Gondwana). Il s'agit donc d'un bloc rigide comparable, par son âge et sa structure géologique, aux boucliers africain et australien entre lesquels il est situé. On est autorisé cependant, semble-t-il, à considérer l'Inde péninsulaire comme étroitement unie au massif ancien afro-arabique, auquel appartient aussi Madagascar et l'archipel des Seychelles. En effet, l'arc de l'Himalaya, à son extrémité occidentale, s'incurve vers le sud-ouest par les plis de l'Afghanistan et du Beloutschistan, puis change encore de direction à partir du Golfe Persique pour contourner le massif d'Arabie. Cette disposition fait penser que cette longue chaîne de plis récents épouse la bordure d'un seul massif comprenant l'Inde, l'Arabie et l'Afrique avec Madagascar et les Seychelles.

Il est bon de faire remarquer ici que, d'après le professeur C.S. PICHAMUTHU ⁽¹⁾ ; les roches les plus anciennes du massif précambrien de l'Inde se trouvent dans l'État de Mysore. A première vue elles semblent ainsi former la terminaison orientale d'un massif orienté vers l'ouest-sud-ouest se prolongeant sous les eaux de l'Océan et se rattachant probablement aux terrains précambriens de l'arc des Seychelles et du plateau de Mascarène, c'est-à-dire au massif africain. En réalité

⁽¹⁾ C.S. PICHAMUTHU, *Some observations on the structure metamorphism and geological evolution of Peninsular India*, Journal of the Geological Society of India, vol. 3, 1962, Bangalore.

un tel raccord ne peut pas être admis intégralement. Si l'on consulte, en effet, le diagramme physiographique de l'Océan Indien dressé par BRUCE, C. HEEZEN et Marie THARP (Geol. Soc. of America, 1966) on remarque que la branche nord de la crête axiale de l'Océan Indien passe précisément entre l'Inde péninsulaire et le plateau de Mascarène, pour constituer la Carlsberg Ridge se terminant dans le golfe d'Aden, ride bordée de part et d'autre par une étroite plaine abyssale.

Même avec cette restriction, il est permis de grouper en un seul ensemble l'Afrique, Madagascar, les Seychelles, l'Arabie et l'Inde péninsulaire.

Si l'on accepte cette manière de voir, le bouclier afro-arabo-indien prend une importance prépondérante dans la constitution géologique et l'évolution de l'écorce terrestre, comme il est visible sur la figure 3. En lui donnant une telle extension, on lui attribue aussi une forme d'ensemble remarquable. Il se caractérise, en effet, par une disposition symétrique par rapport à un axe passant par l'est africain. Comme on le verra plus loin, il existe un axe de symétrie intéressant toute la croûte terrestre et qui passe à cet endroit. Il est à noter aussi que la crête médiane de l'Atlantique, prolongée par la crête occidentale de l'Océan Indien suit exactement la forme de ce grand massif ⁽¹⁾. Compris de cette manière, le massif continental afro-arabo-indien occupe une position centrale par rapport aux autres boucliers qui l'entourent. B.B. BROCK ⁽²⁾ a attiré l'attention des géologues sur cette disposition remarquable. La planche jointe à sa note est très parlante à cet égard.

L'étude structurale des continents actuels permet d'affirmer que la vision de deux grands continents primitifs : la Laurasia et la Gondwana est trop simpliste et ne répond pas aux données réelles de la géologie. Selon toute probabilité, le Sial originel s'est concentré en sept endroits privilégiés de la surface de la Terre, formant ainsi le point de départ des sept grands continents ayant chacun leur zone centrale devenue définitivement rigide ou à peu près depuis 600 millions d'années au point de n'avoir plus été influencée par les efforts de plissement, tandis que les orogènes ultérieurs se sont édifiés autour de ces môles ou boucliers avec leurs plates-formes.

On comprend alors pourquoi VENING-MEINESZ a pensé à, une distribution géométrique en rapport avec un réseau de courants de convection. C'est là une vue de l'esprit, remarquable sans doute, mais qui soulève immédiatement une objection. Les fragments de la croûte sialique ne sont pas régulièrement distribués à la surface de la Terre comme le voudrait la théorie. L'Océan Pacifique par exemple, qui devrait être un des fragments affaissés, couvre à lui seul un tiers de la surface du globe. Il n'empêche, comme nous le verrons plus loin, que les centres des continents actuels ne sont pas distribués au hasard ; leur emplacement semble bien avoir été conditionné par une règle fondamentale, en rapport avec des sollicitations qui se sont exercées dès la formation de la croûte terrestre.

⁽¹⁾ J.P. ROTHE a souligné la forte sismicité de cette zone sous-marine : *La zone séismique médiane indo-atlantique* Proc. Roy. Soc. of London, ser. A, vol. 222, n° 1150, pp. 387-397.

⁽²⁾ B.B. BROCK, *Aspects of form, and the fragmentation of the crust of a sphere*, Proc. Geol. Soc. of South Africa, vol. LXI, 1958, Johannesburg.

Cet aperçu sommaire des grands traits de la constitution géologique des continents permet de dégager deux règles générales :

a) La première nous autorise à admettre que les zones plissées successives, c'est-à-dire les orogènes, ne se sont pas édifiées dans un ordre quelconque ; bien au contraire, les plus anciennes sont généralement en bordure immédiate des grands boucliers, les plus récentes en sont les plus éloignées ; de toute manière, chacun de ces orogènes s'est en quelque sorte modelé sur celui qui l'a précédé, comme pour marquer une tendance à l'agrandissement systématique du continent par l'accolement de rides successives. C'était l'opinion d'Édouard SUESS qui admettait un accroissement progressif des continents par adjonction de chaînes plissées de plus en plus récentes au massif résistant originel.

Dans un article présenté au cours du symposium tenu en Tasmanie en 1958, le professeur VOISEY est d'avis que les continents se sont agrandis progressivement par la formation de géosynclinaux successifs suivant la bordure du noyau des masses continentales.

Une telle affirmation, conforme à l'opinion d'Éd. SUESS prête à confusion. Elle évoque l'idée de l'extension progressive du bloc sialique par empiètement sur le domaine océanique à fond de Sima ou de Salsima. D'autre part, si une masse continentale a pour origine un bloc sialique isolé, il serait bien peu vraisemblable que sa disposition originelle n'eut pas été comparable à celle des masses continentales actuelles, dont une partie seule émerge du niveau de l'Océan, tandis qu'une autre partie, d'étendue appréciable s'enfonce sous le niveau de l'eau pour constituer la plate-forme continentale et une partie du talus continental. Les géosynclinaux avec leur remplissage de matériel sialique entraîné à l'Océan, générateurs des futurs orogènes, intéressent la plate-forme continentale et non pas les grandes profondeurs océaniques.

Comme nous l'avons rappelé précédemment (page 36) tout orogène a pour soubassement un orogène plus ancien pénéplané, sur lequel ses couches de base reposent en discordance de stratification. Par conséquent, il ne peut pas être considéré comme un agrandissement du bloc sialique primitif suite à un empiètement sur le domaine océanique ; il provient uniquement semble-t-il de la remise en mouvement de matériaux préexistants et de même composition minéralogique.

Il doit être entendu cependant qu'une telle discordance ne peut pas avoir un caractère de généralité pour une époque déterminée. C'est ainsi qu'en Europe occidentale, le Dévonien inférieur affecté par le plissement hercynien est, par endroits, nettement en discordance sur le Silurien alors qu'ailleurs il y a une simple lacune stratigraphique à leur contact et qu'en d'autres lieux il y a continuité de sédimentation entre les deux formations, la discordance se trouvant à un niveau inférieur.

Peut-être serait-on tenté de croire que les zones plissées les plus récentes situées en bordure des grands océans marquent malgré tout un agrandissement du

continent aux dépens de l'océan. Les faits d'observation ne s'accordent cependant pas avec cette manière de voir.

En effet, en Amérique du Nord, les chaînes plissées récentes de la bordure du Pacifique, les mieux situées à cet égard, comportent un soubassement formé de roches plissées et métamorphiques, d'âge précambrien, au moins en partie ⁽¹⁾. Il en est ainsi en Nouvelle Zélande, et au Japon comme en Amérique.

Tout aussi bien, en bordure de l'Atlantique nord, les terrains paléozoïques de l'orogène appalachien reposent en discordance sur un substratum précambrien qui se prolonge sous les eaux de l'Océan. A la suite de recherches par sondages sismiques qu'ils ont effectuées sur la structure des fonds océaniques de l'Atlantique nord, BRUCE C. HEEZEN, Marie THARP et Maurice EWING ⁽²⁾, ont établi l'existence sous le talus continental (continental rise) à l'est de la côte des États-Unis d'Amérique, d'une lentille sédimentaire épaisse de plusieurs kilomètres reposant sur la croûte basaltique océanique par l'intermédiaire d'une mince intercalation granitique.

L'histoire géologique de la chaîne appalachienne est, en réalité, très complexe. On sait, par exemple que vers la fin des temps dévoniens, il devait exister une ride émergée au sud-est de la chaîne actuelle, ride qui a fourni les éléments nécessaires à la sédimentation du Dévonien supérieur ; celui-ci se présente, en effet sous le facies marin au nord-ouest, tandis qu'il est continental dans la direction du sud-est. Par après, cette ancienne chaîne pré-appalachienne s'est affaissée et est actuellement recouverte, sous les eaux de l'Atlantique, par les terrains post-paléozoïques affleurant en bordure de l'Océan. Il s'agit sans doute de cette ancienne chaîne dont les recherches des savants américains ont révélé l'existence ; elle appartient partiellement au socle appalachien, composé de terrains précambriens.

C'est ce qui pourrait donner l'illusion qu'en bordure de l'Atlantique, une partie de la chaîne plissée a pu s'édifier sur fond océanique.

Les observations faites au Spitzberg et à l'île des Ours sont peut-être plus intéressantes encore. Un soubassement archéen formé principalement de gneiss d'origine certainement sédimentaire, supporte en discordance de stratification les dépôts détritiques, avec part importante de calcaires, connus sous le nom d'Hecla Hook, allant du Précambrien récent à l'Ordovicien ; cette formation est recouverte à son tour en discordance par des dépôts allant du Silurien supérieur au Dévonien supérieur, que couronne une nouvelle couverture discordante non plissée débutant au Trias.

Le Spitzberg et l'île des Ours sont bien proches des fonds océaniques de l'Atlantique nord où domine le basalte ; il est remarquable de voir, en cet endroit, cette superposition d'orogènes de plus en plus récents.

Dans certains cas cependant, on pourrait supposer un accroissement local d'un continent aux dépens de l'Océan. On sait, en effet, que certaines îles océani-

⁽¹⁾ Il paraît établi que le soubassement comprend du Précambrien très ancien, comparable quant à son âge, à celui que l'on connaît dans le bouclier canadien.

⁽²⁾ Tiré de P. МІСНОГ, *La structure continentale*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belg., 5^e sér., t. XLIX, n^o 12, 1963.

ques sont faites de matériaux ne remontant pas au-delà du Crétacé moyen tout au plus ; aussi peut-on émettre l'hypothèse que ces lieux sont en relation avec des phénomènes tectoniques récents, en bordure des chaînes plissées les plus jeunes, en relation si l'on veut avec la préparation de nouvelles fosses géosynclinales, amorces de futurs orogènes au front des masses continentales où à peu de distance de celles-ci.

Nous ajouterons encore que l'étude détaillée du bouclier canadien a mis en évidence un fait important ⁽¹⁾. Le géologue se trouve là en présence d'une puissante masse de formations cristallophylliennes et cristallines ; la paléontologie se montre impuissante à en établir la stratigraphie ; heureusement, l'étude par les éléments radioactifs a compensé cette carence et l'on sait aujourd'hui que les terrains précambriens de cette vaste étendue correspondent à une série d'orogènes superposés, séparés les uns des autres par des discordances de stratification ; l'histoire des temps précambriens est ainsi, à cet égard, comparable à celle des périodes plus récentes dont les formations sédimentaires correspondantes sont datées par leurs fossiles. La distribution de ces orogènes précambriens paraît s'être faite autour d'une aire centrale où affleurent les dépôts les plus anciens.

Il est prématuré de penser que tous les boucliers d'âge précambrien ont une histoire analogue ; la seule chose que l'on puisse dire c'est qu'ils sont constitués de plusieurs orogènes superposés.

Nous aimons signaler ici la distribution probable des orogènes précambriens dans le bouclier baltique telle que l'a figurée le professeur L.U. DE SITTER ⁽²⁾. Son croquis paraît indiquer tout comme celui dressé pour le bouclier canadien, une répartition systématique des orogènes précambriens par rapport à une aire centrale divisée elle-même en plusieurs parties.

Nous avons rappelé ci-avant que le professeur PICHAMUTHU a établi par la même méthode que les formations précambriennes les plus anciennes de l'Inde Péninsulaire se trouvent dans l'État de Mysore ; elles sont entourées, dans la direction de l'est, par des dépôts de plus en plus jeunes faisant comme elles partie du socle précambrien de ce pays.

Par ces trois exemples : Canada, Baltique, Inde péninsulaire, on peut entrevoir la possibilité d'un arrangement systématique autour d'une aire centrale, la plus ancienne. La règle serait ainsi la même pour les terrains antécambriens que pour les dépôts plus récents disposés régulièrement autour d'un vieux bouclier et de sa plate-forme.

Aussi croyons-nous pouvoir poser comme règle approximative que l'édification des grands boucliers précambriens a pu se faire suivant une règle comparable à celle observée pour les terrains plus récents qui les encadrent.

Tout cela porte à réfléchir : Si un continent résultait de l'adjonction de bourrelets successifs s'accolant les uns aux autres, en empiétant progressivement sur

⁽¹⁾ J.T. WILSON, R.P. RUSSELL, R.M. FARQUHAR, *Handbuch der Physics*, Bd 47. S. 288, 1956. D'après R.E. SCHEIDEGGER, *Principles of geodynamics*, Springer-Verlag, Berlin, 1958.

⁽²⁾ L.U. DE SITTER, *The relation between geology and geophysics*, ICSU review of world science, vol. 5, n° 1, janvier 1963. Elsevier Publishing Company. Amsterdam, p. 20.

l'océan, il devrait en être de même pour le bouclier dont le point de départ serait extrêmement restreint, conception certes peu vraisemblable. L'hypothèse d'Éd. SUESS fait image ; elle n'est pas conforme à la réalité.

Il convient en effet de se montrer très circonspect en l'occurrence. L'arrangement méthodique des orogènes précambriens autour d'une aire centrale du bouclier nord-américain est actuellement mise en doute d'après ce qu'a bien voulu nous communiquer le professeur L. CAHEN. D'autre part, une disposition presque concentrique des orogènes précambriens pourrait faire croire qu'au début du Précambrien, le massif continental nord-américain n'émergeait réellement que sur une étendue extrêmement réduite ; la désagrégation de ses matériaux constituants ne pouvait pas fournir la masse de sédiments nécessaire au remplissage d'un géosynclinal, prélude de la formation de l'orogène le plus ancien connu dans cette partie du monde.

Il ne faut pas perdre de vue que la formation d'une aire géosynclinale est complexe et que ses matériaux de remplissage sont empruntés à des zones de relief affleurant de part et d'autre de l'aire subsidente. D'autre part, la relation plus ou moins marquée entre la disposition des orogènes précambriens et celle des chaînes plissées plus récentes répond à une règle approximative dont on trouve divers exemples dans la structure des continents ; l'orientation des plis antérieurs influence dans une mesure plus ou moins large la direction des déformations plus récentes. Nous avons à ce propos revu la carte provisoire des directions tectoniques du Précambrien en Afrique Centrale et Australe dressée par Arthur HOLMES (4). Cette carte laisse voir des changements notables dans la direction des formations précambriennes ; par son examen attentif, on se rend compte aisément de l'influence de ces déformations sur la genèse du bassin du Karroo, comme de la cuvette congolaise, en relation avec des inflexions antérieures dans la direction des plissements précambriens.

En résumé, nous pensons pouvoir admettre les conclusions suivantes : 1) Les orogènes des massifs continentaux sont en relation plus ou moins étroite les uns avec les autres et semblent s'être disposés suivant un ordre déterminé, bien que l'on puisse trouver des exceptions à cette règle ; 2) dans l'axe des orogènes les plus éloignés des grands boucliers et de leur plate-forme, apparaît du Précambrien souvent comparable quant à son âge à celui des boucliers ; 3) une conséquence importante se dégage alors de l'analyse de la première question que nous nous sommes posée à la suite de la description sommaire de la structure des continents : Depuis sa partie centrale, jusque sur ses bords, un massif continental est constitué par la superposition d'orogènes successifs. Ceux-ci ont été édifiés grâce à des remaniements répétés d'un même matériau, constamment remis en mouvement, dont l'origine première est le sial primitif. *L'étendue actuelle des masses continentales doit être bien peu différente de celle des blocs originels de*

(4) A. HOLMES, *The sequence of the Pre-Cambrien orogenic belts in South and Central Africa*. Congrès geol. intern., 18^e Sess., Grande-Bretagne, 1948. Rapport de l'Assoc. des Serv. geol. africain, Londres, 1951.

sial. Une permanence aussi remarquable doit être prise en très sérieuse considération dans l'examen du problème d'une dérive éventuelle des continents.

Nous ne désirons pas nous arrêter plus longuement sur cette question, somme toute accessoire pour le but que nous poursuivons. Nous renvoyons le lecteur à l'intéressant ouvrage de MARSHALL KAY : *North American Geosynclines* (1).

Il reste à rechercher pourquoi l'étendue des continents est relativement faible à côté de celle des océans. Nous y reviendrons plus loin. Auparavant, nous pensons devoir examiner la seconde règle qui paraît se dégager de la connaissance de la structure des continents.

b) Cette seconde règle a pour base un fait d'observation remarquable. L'examen d'une carte géologique du Monde permet de voir que les zones plissées les plus récentes, d'âge cénozoïque, sont réparties uniquement en bordure du Pacifique et suivant la zone dite de la Téthys ou Mésogée (Antilles, région méditerranéenne, chaînes montagneuses de l'Asie centrale) ; elles ne s'insinuent pas entre les massifs résistants en dehors de ces deux grandes unités tectoniques. Cela revient à dire que ces chaînes récentes couvrent sur le globe une étendue plus restreinte que les zones orogéniques antérieures comme si la partie de la surface terrestre susceptible de se déformer allait en diminuant progressivement au cours des temps (2).

B.B. BROCK fait observer à ce propos que si les orogènes anciens couvrent une surface plus grande que les zones plissées récentes, la longueur de chacun d'eux est relativement réduite ; leur nombre est, par contre, d'autant plus grand à chaque époque que l'on remonte plus loin dans l'histoire de la Terre (3).

D'autre part, la distribution des chaînes récentes est significative ; elle correspond approximativement à la bordure de l'hémisphère continental complétée par la ceinture mésogéenne coupant cet hémisphère en deux parties, un bloc septentrional rappelant la Laurasia et un bloc méridional correspondant aux Terres de Gondwana.

Il ne paraît pas douteux que tout cet ensemble de plis récents forme un tout en relation avec un champ de forces commun. Il serait hors de propos de discuter ici des problèmes posés du point de vue géodynamique ; nous renvoyons à une note récente de M. DUBOURDIEU, professeur au Collège de France (4).

Quand on examine une carte du Monde sur laquelle ont été figurés les grands boucliers autour desquels sont disposées les zones plissées plus jeunes, on est frappé de voir la place prépondérante qu'occupe le massif ancien de l'Afrique, avec ses annexes : Madagascar, l'Arabie et peut-être aussi l'Inde péninsulaire. Comme B.B. BROCK (5) l'a mis en évidence les boucliers des deux Amériques, de l'Antarc-

(1) The Geological Society of America, memoir 48, nov. 1951.

(2) P. FOURMARIER, *Le problème de l'Origine des Continents*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belgique, 5^e sér., t. XLVIII, n^o 12, 1962.

(3) B.B. BROCK, *On orogenic evolution with special reference to Southern Africa*, Trans. Geol. Soc. of South Africa, vol. LXII, 1959.

(4) G. DUBOURDIEU, *Sur les forces géologiques*, C. R. séances Acad. Sc. Paris, tome 259, n^o 25, p. 4750, 21 décembre 1964.

(5) B.B. BROCK, *Aspect of form and the fragmentation of the Crust of a Sphere*, Proc. Geol. Soc. of South Africa, vol. LXI, 1959.

tide, de l'Australie, de l'Asie et de l'Europe sont disposés de façon systématique autour du bloc africain. Dans l'hémisphère continental, ce bloc paraît avoir joué un rôle capital tout au long des périodes géologiques. Il n'est pas jusqu'aux rides médianes de l'Atlantique et de l'Océan Indien qui ne l'encadrent de façon remarquable, comme on le montrera plus loin.

Peut-on accepter qu'un tel arrangement soit l'effet du hasard ? N'est-il pas plus raisonnable d'y voir la conséquence d'un principe directeur qui a régi toute l'évolution de la surface du globe depuis l'existence des premiers continents ?

Ici une remarque s'impose. Reportons-nous à ce propos à la carte de répartition des séismes à la surface de la Terre annexée à un article du professeur EGYED (1). Comme d'autres auteurs nous l'ont déjà indiqué, les séismes sont particulièrement abondants en bordure du Pacifique ; ils sont encore relativement nombreux suivant les chaînes plissées de la Téthys ; on les signale en outre à l'endroit de fossés tectoniques sur les vieux continents (Afrique) et aussi le long des crêtes médianes océaniques. En somme, toutes les zones de dislocations récentes sont favorables à la production des séismes. Il y a néanmoins un fait remarquable : les tremblements de terre profonds sont localisés uniquement en bordure du Pacifique, et encore font-ils défaut à l'endroit de l'Amérique du Nord. Il y a là un caractère particulier dont l'importance ne peut échapper à qui veut comprendre l'évolution tectonique du Globe.

Il est inutile, pensons-nous, de reprendre ici, même en résumé, ce que l'on a écrit à propos des restes éventuels du sial originel en quelques endroits privilégiés des continents. Rappelons seulement que suivant l'opinion de notre confrère P. MICHOT, la constitution d'orogènes très puissants entraîne, à la base de ces édifices, une assimilation intense de leur matériau sédimentaire par le basalte sous-jacent avec production d'un magma plagioclasique dont la cristallisation accompagnée d'une différenciation synorogénique conduit à la constitution d'un tréfonds anorthositique ancré dans la base de l'édifice (2).

Comme conséquence, P. MICHOT admet que les grands massifs homogènes d'anorthosites catazonales apparaissent comme la base même de l'orogène dans sa phase d'activité maximale ; c'est là que la sédimentation géosynclinale reposait sur la croûte basaltique.

Il paraît certain, d'autre part que les matériaux les plus anciens, au centre géologique des boucliers, sont quelque peu différents des dépôts plus récents, notamment par la plus grande abondance des laves, la rareté des calcaires et même par la nature particulière des dépôts métallifères. Le fait a été constaté au Canada, en Inde péninsulaire, en Afrique australe et en Australie. Nous avons signalé la chose précédemment (page 26) à propos de la conception de GRUSSOV sur la genèse de la croûte primitive.

(1) L. EGYED, *On the mechanism of Mountain Building and Folding*, Geologischen Rundschau, Bd 50, 1960, p. 225.

(2) P. MICHOT, *Le problème des intrusions marginales*, Geol. Rundschau, Bd 50, 1960.

Si nous avons rappelé ces quelques données à propos des restes de la croûte primitive c'est parce que des doutes subsistent quant à la raison d'être de la localisation aussi marquée du matériau sialique des continents. On peut émettre deux hypothèses à ce propos : ou bien ce sial originel ne couvrirait pas une surface supérieure à celle des masses continentales actuelles, ou bien une partie de l'enveloppe sialique primitive a été absorbée par le matériau basaltique sous-jacent. BELOUSSOV a défendu cette dernière thèse, ainsi que nous l'avons rappelé précédemment (page 28), il se base notamment sur le fait que dans le Tian-Shan la série sédimentaire repose sur du basalte et non pas sur du granite ; il pourrait en être de même sous les parties de la croûte terrestre restées stables depuis longtemps, telles les grands boucliers, constituant la zone centrale des continents.

Suivant la thèse de BELOUSSOV, la distribution des continents à la surface de la Terre est la conséquence de l'ascension du magma basaltique qui a fait disparaître le sial à l'endroit des océans. Ne faut-il pas en déduire que la croûte sialique y était moins épaisse, puisqu'elle a été digérée plus rapidement qu'à l'emplacement des continents ?

Il apparaîtrait en effet difficile d'accepter intégralement l'explication proposée par notre distingué collègue sans admettre, en même temps, que l'épaisseur du sial originel variait d'un endroit à un autre de la surface de la Terre.

Cette réflexion est aussi pertinente à propos de la théorie des courants de convection. En effet, compte tenu des expériences de GRIGGS, les courants de convection auraient été capables de refouler sur eux-mêmes les matériaux de moindre densité relative pour donner à la croûte terrestre une surépaisseur à l'emplacement des masses continentales. Des inégalités dans la puissance de la croûte originelle auraient certainement facilité cette action. A fortiori, il en serait de même si la croûte superficielle s'est formée progressivement par la solidification de blocs flottant librement sur la masse sous-jacente encore visqueuse.

Mais est-il rationnel d'étendre l'hypothèse de BELOUSSOV à tous les grands fonds océaniques où l'épaisseur de la croûte sialique aurait été systématiquement plus faible qu'à l'endroit des continents ? La réponse à cette question semble devoir être négative. On comprend, en effet, que par la superposition des orogènes, le soubassement sialique des continents ait été amené en profondeur, et soumis ainsi à une élévation de température et de pression susceptible de faciliter les réactions avec le magma basaltique sous-jacent. Par contre, aux endroits où de telles interventions ne se sont pas produites, il ne semble y avoir aucune raison pour que le sial, produit de différenciation du matériau sous-jacent, soit transformé à nouveau en un matériau plus basique et plus dense.

Nous citerons cependant ici un bref article de SCHEINMANN qui intéresse spécialement l'Atlantique Nord ⁽¹⁾. L'auteur part de l'idée que, avant l'Éocène, un continent s'étendait en travers de l'Atlantique, joignant l'Amérique septen-

(1) Y.M. SCHEINMANN, *Duration of Earth-crust deformation on the basis of data for the northern Atlantic*, *Tectonophysics* 1. (5) (1964), pp. 377-383. Elsevier Publishing Cy. Amsterdam.

trionale à l'Europe à hauteur de l'Islande. La transformation du matériau continental en matériau océanique est due à l'action de courants venant du manteau supérieur, gagnant progressivement la surface, transformant ainsi le sial superficiel en une masse plus basique comparable à celle des grands fonds océaniques.

D'après SCHEINMANN une telle transformation se serait faite d'abord dans l'Atlantique Sud pour s'étendre ensuite dans l'Atlantique Nord à une époque plus récente, à partir de l'Oligocène par exemple.

Devant la complexité du problème il est difficile de conclure. Il convient certainement de montrer beaucoup de prudence, même s'il paraît probable que les massifs continentaux n'ont que peu varié en étendue depuis leur genèse ainsi que semblent l'indiquer les faits acquis sur la structure des orogènes et leur répartition à la surface de la Terre.

B. FAILLES RADIALES ET DÉCROCHEMENTS HORIZONTAUX (Strike-slip faults).

Dans ce chapitre consacré à la structure géologique des masses continentales, il convient de considérer le réseau des grandes failles radiales, dites aussi failles profondes, qui sont souvent des décrochements horizontaux ⁽¹⁾ d'après le sens relatif du déplacement des massifs qu'elles mettent en contact. Nous envisageons ici les failles qui forment à la surface de la Terre un réseau d'allure sensiblement géométrique et qui n'ont rien à voir avec la genèse des zones plissées.

Certes, la structure de ces dernières est souvent caractérisée par la présence de grandes failles subverticales, suivant lesquelles l'arrière pays s'est affaissé par rapport à la masse principale de l'orogène, comme c'est le cas par exemple pour la zone centrale des ovales méditerranéens. Nous ne croyons pas nécessaire de nous y arrêter car elles ne sont qu'une particularité des zones plissées.

Pour ce qui concerne les grandes fractures indépendantes du plissement, l'un des continents les plus typiques est certainement l'Afrique ; la présence de tels accidents géologiques y a été signalée depuis longtemps, notamment à l'endroit des grands fossés d'effondrement ; la Mer Rouge, la rive orientale de Madagascar, une série de dépressions lacustres en sont des exemples bien connus. Leur disposition en un réseau d'allure géométrique est tout à fait remarquable ; elle domine pour ainsi dire toute l'évolution géologique de la majeure partie de ce grand continent. Nous reproduisons à ce propos la petite carte contenue dans la 2^{me} édition de l'ouvrage de R. FURON : Géologie de l'Afrique. Elle montre clairement les traits essentiels de ce grand réseau de fractures radiales au Sud du grand accident sud-atlasien (fig. 4).

L'examen de la carte dressée par Arthur HOLMES est particulièrement instructive ⁽²⁾. Elle met bien en évidence l'arrangement systématique des larges

(1) Ce sont les " strike-slip faults " ou " wrench faults " des géologues de langue anglaise.

(2) A. HOLMES, *Physical Geology*, Nouvelle édition, 1965, fig. 763, page 1054.

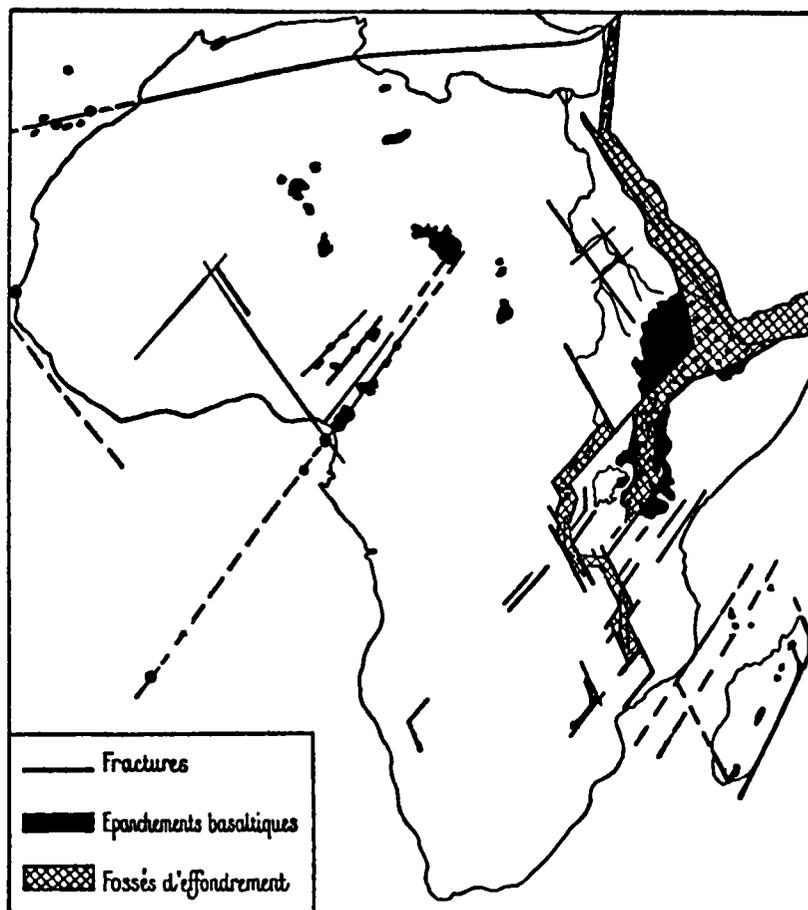


FIG. 4. — Le réseau de failles radiales du continent africain (d'après R. FURON).
(Cliché reproduit avec l'autorisation de l'auteur).

dépressions de forme polygonale, des crêtes qui les séparent et des grandes fractures limitant les fossés d'effondrement (fig. 5).

Les failles qui délimitent la dépression de la Mer Morte, en Palestine sont en relation avec le réseau de la Mer Rouge. D'après CAREY, il s'agit, dans le cas de la Mer Morte de décrochements horizontaux (strike slip faults), le long desquels le déplacement peut être estimé de l'ordre de 200 kilomètres.

R. ALLEN ⁽¹⁾ a mis en évidence la présence d'un grand nombre de cassures de cette nature tout le long de la bordure du Pacifique. En général, dit-il, elles sont rectilignes sur une grande partie de leur longueur. Ces failles sont, pour la plupart des décrochements horizontaux. Le déplacement suivant l'horizontale peut être considérable. Pour ce qui concerne la faille de San Andreas en Californie, dont la remise en mouvement a causé le grand séisme de San Francisco de 1905, Noble ⁽²⁾ écrivait en 1925 :

⁽¹⁾ Cf. R. ALLEN, *Circumpacific faulting*, Résumé des Communications présentées à l'Assemblée générale annuelle de la Geological Society of America, en 1963.

⁽²⁾ L.F. NOBLE, *The San Andreas Rift, etc.*, Carnegie Institution of Washington, Year Book, n° 25, 1925-26, p. 410.

“ The distribution of certain Tertiary rock masses along the master fault affords a suggestion that a horizontal shift of many miles has taken place along the rift. ”

Dans une série de travaux, CROWELL ⁽¹⁾ a pu établir avec certitude que le déplacement horizontal le long de ce grand accident est de l'ordre de 350 miles depuis la fin du Jurassique, c'est-à-dire depuis environ 140 millions d'années ⁽²⁾.

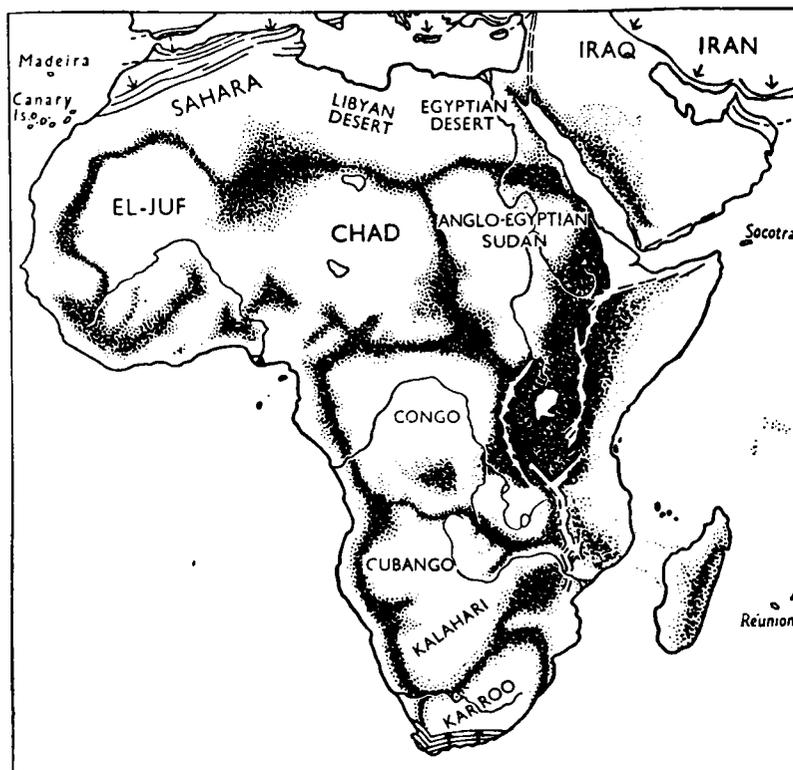


FIG. 5. — La structure du continent africain (d'après A. HOLMES).

(Cliché reproduit avec l'autorisation de l'éditeur).

CROWELL admet que cette faille remonte à une époque beaucoup plus reculée et qu'elle peut avoir, dans les terrains du soubassement prépaléozoïque une amplitude de déplacement horizontal de plus d'un millier de miles.

Dans son article présenté en 1960 au Congrès Géologique à Copenhague, il termine par la déclaration suivante :

“ In summary, strike-slip of many tens of miles, perhaps hundreds seems probable in southern California. Such faulting appears to be characteristic of

⁽¹⁾ J.C. CROWELL, *The San Andreas fault in Southern California*, Congrès géol. Internat. XXI^e session, Copenhague, 1960.

part. 18, pp. 45-52 :

— : Sciences, n° 134, 1961, p. 1429.

— *Displacement along the San Andreas fault*, California, Geol. Soc. of America, spec. paper, 71, 1962.

⁽²⁾ La vitesse de déplacement serait de l'ordre de 2.5 miles par million d'années à cette époque, tandis qu'au Pléistocène moyen elle atteindrait 10 miles pour être actuellement de 30 miles.

Ces chiffres sont tirés de : A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, nouvelle édition, 1965.

tectonic deformation and must therefore be taken into account in a satisfactory theory of orogeny ”.

Dans un travail tout récent JOHN C. REED et BRUCE BRYANT ⁽¹⁾ ont cherché à établir que la zone à roches mylonitisées dite *Brevard Zone* dans la Caroline du Nord est à interpréter comme un décrochement horizontal (Strike-slip fault) de grande amplitude. Le déplacement, de sens dextrogyre, aurait une valeur de 135 miles au moins ; il paraît s'être produit à la fin du Paléozoïque ou au début du Trias.

On voit se compléter ainsi sur le continent américain le réseau de décrochement dont l'importance apparaît de plus en plus nette dans le mouvement relatif de grands blocs de la croûte terrestre.

Une autre grande faille a retenu également l'attention des géologues, c'est la *Faille Alpine* ⁽²⁾ de l'île méridionale de la Nouvelle Zélande. Il paraît établi qu'un déplacement horizontal notable s'est produit le long de cette fracture ; on en a estimé l'importance à 300 miles, mais certains pensent que cette évaluation est probablement exagérée.

CAREY fait observer que des failles de même nature affectent aussi l'est de l'Australie et la Tasmanie.

Dans un travail récent ⁽³⁾ Émile ROD affirme que la plateforme australienne se partage en deux douzaines de blocs en contact par failles radiales le long desquelles le déplacement des blocs s'est effectué en majeure partie suivant l'horizontale ; ces fractures sont donc du type des « strike-slip faults ».

On peut penser que les caractères sont les mêmes pour les grandes failles radiales qui affectent la chaîne des Andes en Amérique du Sud, mais nous manquons de données à ce sujet.

A propos de l'origine des failles profondes en bordure du Pacifique, Hugo BENIOFF ⁽⁴⁾ émet deux hypothèses : ou bien elles résultent d'un mouvement de glissement du continent vers l'Océan, comparable à une action de dérive ; ou bien il s'agit d'une extension du domaine continental aux dépens de l'océan par suite d'un changement de la nature du matériau dû à des causes physiques ou à une différenciation de nature chimique ; cela conduit à une augmentation de volume, ce qui oblige la masse continentale à s'avancer sur le fond océanique voisin.

Des failles radiales sont aussi signalées sur le versant atlantique du continent sud-américain notamment au Brésil ⁽⁵⁾ et en Argentine ⁽⁶⁾.

PIMIENTA mentionne notamment la présence de failles de direction N-E — S-W parallèles à la côte mais aussi de cassures secondaires orthogonales. On y

⁽¹⁾ JOHN C. REED and BRUCE BRYANT, *Evidence for Strike-Slip Faulting along the Brevard Zone in North Carolina*, Bull. geol. Soc. America, vol. 75, n° 12, décembre 1964, p. 1177.

⁽²⁾ MAX F. CARMON J., *Evidence concerning major lateral offset of Alpine Fault, New Zealand*. Résumés des communications à présenter à l'assemblée générale de 1964 de la Geological Society of America.

⁽³⁾ *Eclogae geologicae Helvetiae*, vol. 59, n° 2, 1966.

⁽⁴⁾ HUGO BENIOFF, *Movements on major transcurrent faults in Runcorn*, Continental Drift.

⁽⁵⁾ J. PIMIENTA, *Le rivage du Gondwana brésilien*, Publ. Congrès geol. intern., XX^e Session, Mexico, 1956. Comisión para la correlación del sistema Karroo, p. 181.

⁽⁶⁾ *Handbook of South American Geology* William F. JENKS, Editor, Mem. Geol. Soc. of America, n° 65, 1956.

verra sans doute les éléments d'un réseau de fractures à deux directions conjuguées comme on en connaît dans bien d'autres parties du monde.

En Europe, nous avons tout d'abord à rappeler l'existence, en Écosse, de la *Great Glenn Fault*, particulièrement bien étudiée par W.Q. KENNEDY. Orientée du SW au NE, elle consiste, en réalité, en une zone failleuse. Le déplacement horizontal des blocs en présence est établi avec certitude et il peut être évalué à environ 65 miles (environ 100 kilomètres). Le déplacement maximal s'est fait durant le Dévonien supérieur et le début du Carboniférien ; actuellement elle constitue encore une zone de faiblesse ; on compte à son endroit une soixantaine de petites secousses séismiques durant les deux derniers siècles (1).

J.T. WILSON a fait connaître la présence, sur le continent nord-américain d'une faille analogue, qu'il considère comme pouvant être le prolongement, au delà de l'Atlantique, de la *Great Glenn Fault*. C'est la « Cabot Fault » s'étendant de Boston à la côte nord-orientale de Terre-Neuve (2).

Dans un cas comme dans l'autre il s'agit de fractures anciennes bien antérieures, d'après WILSON à la crête médiane de l'Atlantique.

Sur le continent européen, il convient de citer encore le réseau complexe de fractures si typique de la vallée inférieure du Rhin, du Limbourg hollandais et de l'est de la Belgique, comme celui compris dans l'intervalle entre les Vosges et la Forêt Noire. De part et d'autre, on y a vu des indices de déplacement suivant l'horizontale ; d'autre part, elles ont vraisemblablement fait sentir leurs effets durant la sédimentation du Paléozoïque, comme au cours des périodes plus récentes jusqu'au Quaternaire et même aux alluvions du fond de certaines vallées.

La direction des fractures du Rhin inférieur est approximativement SE-NW, et leur prolongement vers le nord passe entre les Iles Britanniques et la Scandinavie pour atteindre la côte du Groenland à hauteur du Scoresby Fjord c'est-à-dire là où, d'après les cartes géologiques, se termine brusquement la bande de Paléozoïque qui longe le rivage groenlandais (3) tandis que les sédiments postpaléozoïques s'avancent largement vers l'intérieur au Sud du 71^e parallèle nord.

On ne peut s'empêcher de croire qu'il s'agit, en l'occurrence d'un trait majeur de la tectonique mondiale. Il est possible, en effet, par une disposition en relais, d'établir son raccord avec le grand réseau de failles radiales du continent africain, notamment avec les fractures qui se voient en bordure de la Mer Rouge.

Nous trouvons à ce sujet des données précieuses dans deux publications du professeur Ek. BONČEV (4) de l'Académie bulgare des Sciences. Les cartes annexées

(1) A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, new edition, 1965, p. 231.

(2) J.T. WILSON, « *Cabot Fault, an Appalachian Equivalent of the San Andreas and Great Glenn Fault and some Implications for Continental Displacement* », *Nature*, vol. 195, n° 4837, July 14, 1962, pp. 135-138.

(3) *Geology of the Arctic*, University of Toronto Press, vol. I, 1961. Voir notamment la planche accompagnant l'article de HALLER, *Account of Caledonian Orogeny in Greenland*.

(4) Ek. BONČEV, *Probleme der Lineamenteektonik im Ostlichen teil der Balkanhalbinsel*, Académie bulgare des Sciences. Bull. de l'Institut géologique Strašimir Dimitrov, vol. XIV, 1965.

— *Pegmatische Gleitungen, totenstörungen und schollengliederung der Erdkruste im Ostlichen teil der Balkan halbinsel*, Carpatho-Balkan geological Association. VII Congress, Sofia, sept. 1965, Reports, part. I, 1965.

On consultera avec intérêt l'excellente vue d'ensemble de la géologie de la Bulgarie rédigée par le professeur

à ces travaux permettent de voir qu'il existe à l'ouest de Sofia, entre les Balkans et Carpathes d'une part et les Dinarides d'autre part une large zone failleuse de direction approximative NW-SE. Prolongée vers le Nord-Ouest, elle fait corps avec la large zone failleuse dont nous venons de rappeler l'existence dans la vallée du Rhin et l'est de la Belgique et il est facile de concevoir son prolongement avec la zone de fracture qui, d'après ce que nous avons dit ci-avant, s'en va jusque la côte groenlandaise.

En réalité, il existe dans cette partie de l'Europe une large zone de dislocations de direction prédominante NW-SE. Nous rappellerons à ce sujet que le massif de Bohême est limité du côté N-E par une large zone affaissée elle-même en connexion étroite avec la grande ligne de fracture située en bordure de la plateforme russe et dont la direction est également NW-SE ; c'est aussi la direction des Montagnes de S^{te} Croix avec leurs plissements et dislocations affectant le terrain jurassique. Ces déformations ont manifesté leurs effets durant la sédimentation si l'on en juge d'après les variations de puissance des formations sédimentaires, telles le Jurassique ⁽¹⁾.

De l'autre côté, dans la direction du Sud-Est, cette zone failleuse est indiquée comme se prolongeant sous la Mer Égée ; il est facile ainsi d'envisager son raccord avec les accidents de même nature en relation avec le fossé de la Mer Rouge où des failles radiales se voient clairement dans certaines falaises.

La figure 2 du travail de A.A. BOGDANOFF, M.V. MOURATOV et V.E. KHAIN publiée dans la Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique (vol. V, fasc. 4, Paris, 1963) est également très parlante à ce sujet ; on y voit très clairement le « massif médian » du Rhodope limité à l'Ouest par une ligne droite qui le met en contact avec la zone eugéosynclinale de Yougoslavie.

De ces données, on peut conclure qu'il existe en Europe une grande zone de fractures s'étendant du Groenland à la Mer Rouge. On pourrait la désigner sous le nom de *Zone de dislocation transeuropéenne*.

En Europe, le jeu des failles radiales pendant une très longue durée semble être confirmé encore par les relevés effectués par MM. Michel SEGURET et François PROUST dans les Cévennes méridionales. Des fractures de direction NE-SW ont été actives à de nombreuses reprises ; leur orientation oblique à la compression de la phase pyrénéenne les apparente, quant à leur genèse, à des fractures réparties sur toute l'étendue du territoire européen ⁽²⁾.

Y.S. YOUTCHEV de l'Académie bulgare des Sciences, sous le titre : *Notions fondamentales sur la géologie et les richesses minérales du territoire de la République populaire de Bulgarie*.

Ce mémoire fut publié à l'occasion du VII^e Congrès de l'Association des géologues Carpatho-balkaniques tenu à Sofia en 1965.

⁽¹⁾ Voir à ce sujet : R. UNRUG, *Paleocurrents in the Lower Jurassic Sediments on the Northern Slopes of the Holy Cross mts (Central Poland)*, Bull. Acad. Polon. des Sciences, sér. Sc. géol. et géogr., vol. X, n° 1, 1962.

⁽²⁾ M. SEGURET et F. PROUST, *L'évolution tectonique post-hercynienne de la bordure mésozoïque des Cévennes méridionales entre Alès et Ganges*, Résumé dans le C. R. sommaire des séances de la Société géologique de France, Séance du 8 février 1965.

Dans un article récent, A.V. PEIVE ⁽¹⁾, en rappelant l'existence des grands décrochements de Nouvelle Zélande, Écosse, Californie, cite aussi le Ferghana où des accidents de même nature ont été signalés.

A ce propos, ce savant émet l'hypothèse que ces grandes fractures s'arrêtent en profondeur, à une zone où se développent les phénomènes magmatiques, soit au-dessus soit en dessous de la discontinuité de MOHOROVICIC, ce qui permet le glissement relativement facile des blocs ainsi délimités et, par conséquent, leur déplacement horizontal sur des surfaces notables.

Dans son ouvrage " Fundamentals of geology " (page 193) VON BUBNOFF fait observer que les failles transversales majeures ne sont pas nécessairement en relation avec les régions plissées. Il écrit ensuite :

" For geometrical reasons it must be supposed that such movements terminate downwards at a horizontal movement surface, implying that an upper rigid crustal segment moves over a plastic or fluid basement. This argument leads to Wegener's theory of continental drift or epeirophoresis... Meanwhile it must be quite understood that our case involves not a " free drift " but directed " geschiente " movements (CLOOS) along vertical surfaces or „ paraphors " (v. SEIDLITZ) ".

Nous verrons au chapitre suivant que l'exploration récente du fond des océans a mis en évidence la présence de grandes fractures de même nature. On en arrive ainsi à croire que toute la surface du globe est couverte d'un large réseau de failles radiales ou plutôt de décrochements horizontaux. L'origine d'un tel réseau ne peut être cherchée que dans l'évolution générale du globe au cours des temps. On ne manquera pas d'être frappé par le fait que la surface de la Lune paraît être affectée de cassures de ce type, disposées de façon comparable au réseau terrestre.

Cependant, pour montrer combien est délicate la question des grandes failles radiales et des décrochements horizontaux, nous croyons bon de citer un bref passage d'un article publié en 1958 par V.V. BELOUSSOV ⁽²⁾ :

" The role of such deep faults in the structure of the earth and their history present an attractive problem for further study. This touches on the problem of large horizontal movements along deep vertical faults. American geologists are attracted by this topic, as illustrated by the San Andreas fault ; Soviet geologists do not share their enthusiasm and in fact have strong doubts as to the reality of large horizontal displacements ".

Il est sans doute bon de citer ici la brève, note de Charles L. DRAKE sur les failles radiales de l'Est Africain ⁽³⁾. Cette question a été examinée par un groupe

⁽¹⁾ A.V. PEIVE, *Fractures and their role in the structure and development of the Earth's crust*, Publ. Congr. Geol. Intern., XXI^e session, Copenhague, 1960, part. XVIII, p. 280.

⁽²⁾ V.V. BELOUSSOV, *Some factors governing the development of the earth's crust*, Endeavour, vol. XVII, nr 68, pp. 173-180, october 1958.

⁽³⁾ Charles L. DRAKE — *East African Rift System*. Geotimes novembre 1965, p. 13.

de géologues réunis en un symposium tenu à Nairobi (Kenya) en avril 1965. De la relation publiée on peut tirer les conclusions suivantes :

Les fractures radiales qui affectent cette partie de l'Afrique ont manifesté leurs effets à des époques différentes ; leur relation avec les dislocations du Précambrien sont peut-être plus apparentes que réelles.

Beaucoup de fossés d'effondrement sont asymétriques, l'un des côtés correspondant à une faille tandis que l'autre est marqué par une simple inflexion des couches ; dans certains cas, seule l'inflexion des strates est intervenue.

Le système des effondrements (Rift System) paraît bien être en relation avec un large soulèvement qui a affecté toute la région.

L'activité éruptive de type alcalin paraît en relation avec ce mouvement de la croûte terrestre.

Il ne serait pas de mise d'exposer de façon quelque peu complète ce que l'on a écrit à propos de la genèse de ces grandes fractures. Rappelons cependant quelques faits qui peuvent être utiles pour le but que nous poursuivons.

On a montré qu'en exerçant une pression verticale sur une sphère, ou bien sur un cylindre posé sur une surface horizontale, l'axe du cylindre étant perpendiculaire à cette surface, il se produit des fissures plus ou moins profondes formant un réseau à deux directions conjuguées inclinées à 45 ou 50 degrés sur la verticale. Un examen attentif des résultats de l'expérience montre qu'il y a tout au moins une tendance au glissement des deux fragments voisins qui serait comparable au déplacement suivant un décrochement horizontal à la surface du globe ⁽¹⁾.

Dans la nature, une telle fracturation de la croûte terrestre peut résulter de divers facteurs, à défaut de l'intervention d'un effort extérieur comparable à celui des expériences rappelées ci-avant. Il est loisible de penser à un changement dans la vitesse de rotation de la Terre. De son côté, VENING MEINESZ ⁽²⁾ songe à l'intervention des courants de convection nés dans le Manteau ; leur action serait multiple suivant les conditions réalisées dans la Nature ; elle peut provoquer la formation des géosynclinaux tout aussi bien que celle des horsts et des grabens, grâce aux poussées horizontales nées de l'action même de ces courants.

En conclusion, la croûte terrestre apparaît comme ayant été essentiellement mobile au cours de la longue durée des temps géologiques. Cette mobilité s'est concrétisée de deux façons : suivant certains fuseaux les terrains se sont déformés par plissement, avec les failles de charriage qui en dépendent ; d'autre part toute la surface du globe est couverte d'un réseau de fractures radiales séparant des blocs susceptibles de glisser horizontalement l'un par rapport à l'autre et dont les déplacements au cours des temps peuvent donner l'impression de dérive.

Les grandes failles radiales sont aussi des endroits privilégiés pour la localisation des séismes et des volcans et pour la montée des roches basiques des zones

⁽¹⁾ MAX LOHEST, *Expériences de tectonique*, Ann. Soc. Géol. Belg., t. XXXIX, Mém., pp. 547-583, Liège, 1912.

⁽²⁾ VENING MEINESZ, *Op. cit.*, Earth's Crust and Mantle.

profondes. Rappelons à ce sujet qu'il existe suivant l'axe de la Mer Rouge une dislocation de ce type soulignée par des venues de roches basiques sur une largeur de 60 kilomètres. On serait tenté, en présence de ce fait, de voir là un argument en faveur de l'expansion. Cependant, il faudrait éviter de généraliser un fait local ou exceptionnel. En bordure de la Mer Rouge, dans les falaises de la rive du golfe de Suez, des failles de cette nature sont visibles sans qu'il y ait apparence d'écartement des blocs en contact.

En Afrique, les grandes failles voisines du Tanganika ne montrent aucun indice d'ouverture appréciable et ne sont pas soulignées par des montées de roche éruptive, même si leur existence permet de comprendre la localisation de centres volcaniques en des endroits privilégiés. Toutefois nous avons rappelé ci-avant que, dans l'Est africain tout au moins, les cassures délimitant les fossés d'effondrement ne peuvent être prises pour des décrochements horizontaux.

La faille de San Andreas présente les mêmes caractères ; la présence de stries subhorizontales très apparentes sur sa surface n'est pas en faveur d'une tendance à l'ouverture de la faille pour permettre, par expansion de l'écorce, la montée de matériaux basiques venant de zones profondes.

Nous compléterons ces données lors de l'examen de la constitution des fonds océaniques au chapitre suivant.

Dans le chapitre précédent, nous avons résumé les idées de S.W. CAREY ⁽¹⁾ sur un type particulier de déformations de la croûte terrestre qu'il appelle « oroclins ». Le sens même du déplacement le long de ces oroclins fait penser qu'il pourrait être en relation étroite avec les décrochements horizontaux.

A propos de ces déformations de la croûte terrestre, il n'est pas inutile de faire connaître les conclusions d'un article de DONALD V. WISE ⁽²⁾. L'auteur tente une explication de la disposition en apparence anormale, en forme de Z de la zone des intrusions granitiques d'âge mésozoïque comme des venues ultrabasiques de même âge entre les parallèles 35 et 45 latitude nord, dans les cordillères de l'Ouest américain.

Actuellement on peut dresser une carte montrant un changement d'allure systématiquement ordonné entre ces parallèles, changement qui se marque dans le tracé de la bordure du géosynclinal, dans l'allure des zones métallifères, dans la répartition des foyers sismiques.

La déformation des zones originellement rectilignes serait la conséquence d'une distorsion impliquant un déplacement des masses dans le même sens que celui révélé par les observations sur la faille San Andreas, qui se trouve non loin de la zone considérée.

Peut-être pourrait-on voir là une similitude avec les oroclins de CAREY.

⁽¹⁾ S.W. CAREY, *The orocline concept in geotectonics*, part. I. The papers and proceedings of the Royal Society of Tasmania, vol. 89, pp. 255-288, 1955.

⁽²⁾ DONALD V. WISE, *An outrageous hypothesis for the tectonic pattern of the North American Cordillera*, Bull. Geol. Soc. of America, mars 1963.

C'est cependant un argument qu'il faut manier avec une extrême prudence. Rappelons à ce propos que la forme en arc bien connue dans certaines chaînes plissées telles les Alpes, les Carpathes, l'arc Rifain n'a rien à voir avec les oroclins tels que les comprend CAREY. Certes, à l'instar de GOGUEL ⁽¹⁾ on peut supposer que l'édification des Alpes occidentales s'est faite à l'intervention d'une translation globale du sud vers le nord. Il convient toutefois de faire quelques réserves à ce sujet.

En conclusion, la connaissance de la constitution des masses continentales plaide en faveur de la discontinuité originelle de la croûte sialique ; les continents sont un trait permanent de la surface de la Terre, tant dans leur forme que dans leur étendue. Sont-ils restés toujours dans la même position les uns par rapport aux autres ? C'est une question qui sera examinée en détail dans la deuxième partie de l'ouvrage. Nous pouvons déjà dire que le réseau des grandes fractures radiales indique la possibilité de déplacements relatifs des blocs qu'elles délimitent. On peut attribuer le même rôle aux oroclins pour autant qu'il soit possible d'attribuer les changements brusques dans la direction des orogènes à des efforts postérieurs à l'édification de ces derniers. La démonstration de la réalité de ces efforts doit être faite dans chaque cas particulier.

(1) J. GOGUEL, Bull. Soc. Géol. France, 7^e sér., t. V, n° 1, 1963.

CHAPITRE IV

LES OCÉANS

A. LES EAUX OCÉANIQUES.

Pendant toute la durée de l'évolution géologique du Globe, les océans et les mers ont joué un rôle primordial si l'on en juge d'après l'importance des sédiments à faune marine. Aussi paraît-il rationnel de se poser la question suivante : Le volume des eaux océaniques est-il resté constant pendant toute la durée des temps géologiques ? et, d'autre part, la composition des eaux marines a-t-elle varié de manière appréciable ?

En ce qui concerne la composition des eaux océaniques, nous pouvons nous référer à un article de W.W. RUBEY paru en 1951 ⁽¹⁾. D'après cet auteur, les données géologiques indiquent que les variations de composition ont été faibles.

Rubey fait remarquer à ce propos que la quantité de carbone contenu dans les roches à l'état de carbonates ou de matière organique est environ 600 fois la teneur totale actuelle de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la biosphère. Si seulement un centième de ce carbone était soudainement ajouté à l'atmosphère et à l'océan beaucoup d'espèces d'organismes disparaîtraient. De même la fixation du CO₂ dans les conditions actuelles, sans un apport supplémentaire de cet élément par une autre source que l'érosion normale, conduirait à la formation de brucite au lieu de calcite comme sédiment marin. Or, en apparence, l'histoire géologique ne laisse pas supposer qu'il y ait eu de telles disparitions d'être vivants, ni aucun excès de brucite par rapport à la calcite. Il y a donc lieu de faire appel à un autre apport que celui dû à l'érosion et au métamorphisme pour expliquer une telle constance.

En l'occurrence, selon toute vraisemblance, l'activité volcanique est le facteur essentiel.

Cela conduit l'auteur à admettre que le volume des océans a été constamment en augmentant, ce qui peut, d'ailleurs se concilier avec une augmentation du volume des masses continentales accompagné d'un affaissement des fonds océaniques.

Selon l'auteur, quatre facteurs peuvent être mis en cause :

a) fusion des roches sous les marges instables des continents et des géo-synclinaux ;

⁽¹⁾ W.W. RUBEY, *Geologic history of Sea Water*, Bull. Geol. Soc. of America, vol. 62, nr 9, september 1951, p. 1111.

b) montée de ces fractions fondues, telles du granite ou des magmas hydratés et leur cristallisation près de la surface ;

c) réajustement isostatique continu entre continents et bassins océaniques ;

d) érosion et sédimentation avec instabilité de la marge continentale et des zones montagneuses conduisant à une nouvelle fusion sélective en profondeur.

Cette conclusion paraîtra pour le moins assez inattendue. La constance de composition des eaux océaniques, compte tenu du grand cycle perpétuellement renouvelé de l'érosion, de la sédimentation, du métamorphisme, du diastrophisme semble l'indice le plus net d'une constance du volume global des eaux terrestres, peut être modifié dans une faible mesure par les apports venant de l'intérieur à l'intervention du volcanisme.

La règle posée par RUBEY n'est peut-être pas aussi absolue que semble le croire ce savant. Il y eut vraisemblablement des variations périodiques dans la composition des eaux des océans si l'on tient compte de l'alternance de séries sédimentaires riches en calcaires et de séries qui sont pauvres en carbonate de chaux.

Il faut tenir compte aussi de ce que certaines époques de l'histoire géologique sont caractérisées par l'abondance relative de dépôts d'un type particulier comme les sulfates, etc.

Nous rappellerons à ce propos l'opinion du professeur KUENEN ⁽¹⁾ : d'après lui, le volume des eaux océaniques est resté sensiblement constant pendant toute la durée des temps géologiques. Il écrit en effet : " Still it is justifiable to assume that the volume of the oceans as well as the area and depth of the oceanic basins were of the same order and magnitude as they are at present ".

B. LA CONSTITUTION DES FONDS OcéANIQUEs.

Nous savons déjà que les fonds océaniques diffèrent grandement des continents par la densité plus élevée du matériau dont ils sont formés, et dont la nature basaltique est infiniment probable. Il en a été question longuement au cours de l'exposé qui précède, nous ne croyons pas devoir y revenir.

Cependant, il n'est pas sans intérêt d'insister une fois encore sur la différence entre les fonds océaniques et les océans pris dans le sens géographique.

Pour l'Océan Pacifique, DALY fait observer qu'à l'Ouest de la « ligne andésitique » des géologues, longeant les arcs insulaires en bordure de l'Asie, le sial et le salsima paraissent avoir une épaisseur moindre qu'à l'endroit du continent.

⁽¹⁾ Ph. H. KUENEN, *Marine Geology*, John Wiley and Sons, New York, 1950. Voir notamment p. 151.

Sans doute, faut-il y voir la terminaison en biseau de la masse continentale asiatique.

Ce serait, par conséquent, une erreur de considérer sous le même angle toute l'étendue de l'océan tel qu'il est figuré sur les cartes géographiques. Les observations géologiques sur l'arc jalonné par les îles Bismarck, Salomon, Fidji et Tonga révèlent l'existence de roches sédimentaires plissées selon toute probabilité à l'époque miocène ; il s'agit là d'une ride parallèle à celle qui joint la Nouvelle-Guinée à la Nouvelle-Calédonie et à la Nouvelle-Zélande, un peu plus jeune cependant que cette dernière. Il existe ainsi une série de rides parallèles à la côte australienne, et actuellement immergées ⁽¹⁾, rides de plus en plus récentes du Continent vers l'Océan.

Compte tenu de ces observations, on peut croire que les masses continentales de l'Asie et de l'Australie ne sont pas limitées à leurs rivages actuels ; il faut y adjoindre toute une partie des fonds océaniques où sont disséminés les nombreux archipels et îles de l'Océanie, comme les arcs insulaires qui jalonnent la bordure orientale de l'Asie.

A ce propos, les géologues ne manqueront pas d'insister à nouveau sur un fait de première importance qui cadre bien avec ce que l'on sait des structures continentales : l'âge de plus en plus récent de ces chaînes plissées, c'est-à-dire de ces orogènes, partiellement immergés, au fur et à mesure qu'augmente leur distance aux massifs rigides précambriens de l'Australie et de l'Asie.

Les données recueillies sur une partie du Pacifique, située au nord et au nord-est de l'arc précité, sont également pleines d'enseignement à cet égard. Les îles des archipels Tubuai, de la Société, de Tuamotu, Gambier et Marquises sont principalement de nature volcanique ; les laves rejetées sont basaltiques, mais accompagnées aussi de trachyte, d'andésite, de phonolite ; le caractère basique semble s'accroître au fur et à mesure qu'augmente la distance aux arcs insulaires à terrains plissés. Cela laisse supposer que ces Archipels ont pour soubassement une épaisseur minime de sial, constituant la terminaison en biseau du sial largement développé dans l'Australie et dans les chaînes d'îles plus importantes qui l'encadrent ; la même réflexion s'impose vis-à-vis du continent asiatique.

Si cette manière de comprendre la constitution profonde de cette partie du Pacifique était démontrée, elle permettrait d'affirmer que les blocs originels de sial allaient en s'amincissant depuis une zone centrale jusqu'à leur bordure. C'est évidemment aux dépens de cette zone centrale plus épaisse, émergeant davantage de l'océan primitif, que se seraient faits les premiers sédiments et les premières zones plissées, le phénomène se reproduisant ensuite en reculant petit à petit vers la bordure du bloc sialique.

On peut admettre, avec beaucoup de vraisemblance qu'en bordure des deux Amériques le fond du Pacifique est de nature sialique, sur une largeur moindre,

(1) Voir à ce sujet : E. AUBERT DE LA RUE, *Étude géologique et prospection minière de la Polynésie franç.* Publié par l'Inspection générale des Mines et de la Géologie, Paris, 1959.

cependant, qu'au voisinage de l'Australie et de l'Asie avec leurs guirlandes insulaires. On a certaines raisons de croire qu'il en est ainsi à l'emplacement du plateau des Albatros en face de l'Amérique du sud. Les îles Galapagos sont de nature volcanique en majeure partie ; elles sont formées de basalte, mais on y a signalé aussi de l'andésite. L'archipel pourrait être situé à la bordure du prolongement sialique sous-marin du continent sud américain.

Par contre, en face du Mexique, se trouve dans le Pacifique par 10°, 18', 41" de latitude nord et 109°, 12', 34" de longitude ouest, l'atoll de Clipperton dont le soubassement est principalement de nature trachytique (1). Peut-être faut-il en conclure qu'il correspond à la bordure sialique de l'est du Pacifique.

Cette limite est soulignée par la présence d'une étroite zone suivant laquelle les venues éruptives récentes ont, en moyenne, la composition des andésites. C'est ce que l'on nomme la ligne andésitique dont le tracé est indiqué à la figure 8, ci-après.

En dehors de ces bandes marginales de nature sialique le long des rivages occidental et oriental du Pacifique, on peut admettre que le sima ou le salsima domine sur tout le reste de l'étendue de cet Océan. De toute manière, le sial semble y faire défaut.

Malgré les données si parlantes recueillies par les séismologues, les géologues sont enclins à une grande prudence. Je rappellerai à ce sujet que GILLULY admet l'existence de granites océaniques aussi bien que d'océanites continentales. Toutefois, les exemples envisagés par ce savant dans le sud ouest du Pacifique ne sont pas tout à fait démonstratifs car il s'agit peut-être de matériaux provenant de la ceinture insulaire du Continent australien.

Rappelons encore à ce propos que, d'après les sondages effectués dans l'atoll d'ÉNITEWORK des sédiments d'âge éocène reposent sur un substratum de basalte à olivine (2).

L'Océan Atlantique présente lui aussi des irrégularités quant à la constitution lithologique du fond sous la couche peu épaisse de sédiments récents.

La ligne axiale de cet océan est soulignée par une crête médiane qui suit fidèlement l'allure de ses deux rives. La nature du fond océanique ne semble pas être la même de part et d'autre de cette ride (3). A l'Ouest, domine le sima ou le salsima ; à l'Est, le fond est plus proche du sial comme s'il était en majeure partie de nature sédimentaire. R. FURON rapporte notamment, que des trilobites ont été ramenés par la drague de 4.255 mètres de profondeur par le Talisman en 1883 (4). En 1947, l'expédition Atlantis a démontré l'existence, à l'endroit de la

(1) A.G. OBERMULLER, *Contribution à l'étude géologique et minérale de l'île Clipperton (Polynésie française)*. Publié par l'Inspection générale des mines et de la géologie, Paris, 1959.

(2) H.S. LADO and S.O. SCHLANGER, *U.S. Geol. Survey profess. Papers*, 260 Y. Washington, 1960, pp. 863-903.

(3) J.P. ROTHE, *La structure de l'Atlantique*, Annali di Geofisica, vol. IV, n° 1, 1951.

(4) R. FURON, C.R. Acad. Sc. Paris, t. 228, 1949, pp. 1509-1510.

ride médiane, de calcaire cénozoïque consolidé. Dans l'Atlantique sud, des îles de nature volcanique jalonnent la crête médiane ; elles ont fourni quelques renseignements intéressants : L'île Ascension est caractérisée par des laves du genre du trachyte, de la rhyolite, de la phonolite avec des venues basaltiques plus récentes ; les scories rejetées par les volcans renferment, par endroits des blocs de granite amphibolique et aussi des blocs de diabase et de gabbro.

Les îles St^e Hélène et Tristan da Cunha sont formées en majeure partie de laves basaltiques et phonolitiques. A Tristan da Cunha un bloc de gneiss a été rejeté lors d'une éruption, ce qui pourrait faire croire à l'existence de sial en cette partie du fond atlantique.

Les volcans des îles Gough et Nightingale ont rejeté des laves trachytiques et basaltiques.

Nous croyons intéressant de rappeler ce que notre confrère M. le professeur P. MICHOT écrit à ce propos ⁽¹⁾ :

« Il serait toutefois erroné d'attribuer à la croûte océanique une composition exclusivement basaltique. Il est bien établi par l'observation de ces îles » (de la crête médiane atlantique) « qu'une minime fraction de leur partie visible est formée par des andésites, trachytes, phonolites, voire rhyolites ; ces roches sont des produits de la différenciation d'un magma de composition basaltique normale. Il leur est parfois associé des roches granitiques (lato sensu) qui représentent des différenciés analogues cristallisés dans des conditions de refroidissement plus lent. Ce serait une interprétation incorrecte et l'origine d'une confusion que de ranger ces matériaux dans la couche sialique proprement dite soit en raison de leur nature pétrographique, soit en raison de leur composition chimique où silice et alumine prédominent ».

Nous reprendrons plus loin la question de la constitution de la ride médiane de l'Atlantique car il s'agit d'une particularité du relief sous-marin qui se répète dans tous les océans et dont la signification profonde ne peut pas échapper.

Compte tenu des données que nous venons de rappeler, le fond de l'Atlantique apparaît quelque peu différent de celui du Pacifique notamment par une extension plus grande des sédiments d'âges divers à l'est de la crête médiane, tandis qu'à l'Ouest de celle-ci s'étend un fond de nature basaltique jusque très près des côtes américaines.

Cependant, d'après M. EWING et Fr. PRESS ⁽²⁾ les mesures de vitesse des ondes superficielles lors de tremblements de terre récents semblent établir que le fond de l'Atlantique aussi bien que celui du Pacifique est constitué de roches basiques, lourdes, immédiatement sous la couche superficielle correspondant à l'eau et aux sédiments meubles. La différence signalée entre Atlantique et Pacifique tient à ce que l'on avait jusqu'alors considéré comme négligeable cette

⁽¹⁾ P. MICHOT, *La structure continentale*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belgique, 5^e série, t. XLIX, n° 12, 1963, p. 1337.

⁽²⁾ M. EWING et Fr. PRESS, *Crustal structure and surface wave dispersion*, Bull. Seismol. Soc. of America, vol. 40, n° 4, p. 271, octobre 1950.

masse superficielle (eau et sédiments) alors qu'en réalité il y a lieu d'en tenir compte.

Pour plus de détails au sujet de la composition du fond de l'Atlantique nous renvoyons aux travaux dont un résumé a paru dans le n° 1626 Session 1964 publié le 20 octobre 1965 des Proceedings of the Geological Society of London, par les soins du " Volcanic Studies group " suite au Colloque du 19 mai 1965 sur les volcans de l'Atlantique.

Ajoutons encore à ce propos le fait suivant :

Les mesures auxquelles ont procédé dans ces dernières années J. EWING et M. EWING (1) ont établi que, dans l'Atlantique, la croûte est essentiellement basaltique sur une épaisseur de 5 kilomètres. Suivant la ride médiane, large de 700 miles, l'épaisseur de la croûte atteint 25 à 30 kilomètres, dont la partie supérieure, sur 3 à 4 kilomètres, est d'origine volcanique, principalement basaltique, tandis que la partie profonde consiste en un matériau de composition mixte entre le basalte et la matière du manteau. Ces savants admettent que la ride a été édifiée par la montée de grandes masses basaltiques le long d'une fracture, en rapport avec des courants de convection dans le manteau.

Les résultats obtenus au voisinage de l'Islande par Tryggvason (2) sont quelque peu différents de ceux rapportés par les précédents auteurs.

Dans leur article sur le dépôt des sédiments dans les profondeurs de l'Atlantique, DAVID B. ERICSON, M. EWING, BRUCE C. HEEZEN et G. WALLIN écrivent (3) " There are in the collection of the Lamont Geological Observatory 63 cores that contain sediments ranging in age from Pliocene to Lower Cretaceous. On the average these older sediments are distinctly more calcareous than the associated Pleistocene sediments. Apparently the pre-Pleistocene Atlantic was freer of terrigenous sediment in suspension than was the Pleistocene or even the Recent Atlantic ".

C'est le moment de signaler ici tout l'intérêt d'une très brève note de NOE-NYGAARD (4) sur les îles Far-Oer. Celles-ci sont constituées essentiellement par des laves basaltiques sur une épaisseur de près de 3000 mètres ; vers 2000 mètres sous le sommet de la série se trouve un niveau sédimentaire peu épais (une dizaine de mètres) dans lequel est intercalée une couche de charbon ; on y trouve également des débris de végétaux.

Il est établi que ces venues basaltiques sont d'âge tertiaire. Tout l'archipel est ainsi formé par l'accumulation de venues successives de lave, avec accidentellement un arrêt de courte durée qui a permis la formation de dépôt à flore terrestre.

(1) J. EWING and M. EWING, *Seismic refraction measurements in the Atlantic Ocean basins, in the Mediterranean Sea, on the Mid-Atlantic Ridge and in the Norwegian Sea*, Bull. Geol. Soc. America, vol. 70, 1959, p. 291.

(2) E. TRYGGVASON, *Naturrufræðingnun*, t. 29, 1959, p. 80. Référence tirée de M. BATH, *Crustal structure in Iceland and surrounding Ocean*, I.C.S.U. Review, vol. 4, n° 3, 1962.

(3) *Sediment Deposition in Deep Atlantic in Crust of the Earth (a symposium)* Al. POLDERVAART, editor, The Geol. Soc. of America special Paper 62, 1955, reprinted, 1963.

(4) A. NOE-NYGAARD, *The geology of the Faroes*, Quart. Journ. of the Geol. Soc. of London, N° 472. Vol. CXVIII, part. 4, dec. 1962.

Dans la deuxième partie de ce rapport, nous aurons l'opportunité de reprendre l'examen de cette question ; ce sera l'occasion de citer l'opinion du Dr Y. SCHEINMANN, de Moscou, sur la probabilité de l'existence d'un continent aujourd'hui disparu à l'emplacement d'une partie de l'Atlantique nord ⁽¹⁾.

La nature du fond de l'Océan Indien ne semble pas être tout à fait identique à celle du fond du Pacifique bien que la discontinuité de MOHOROVICIC se trouve, d'un côté comme de l'autre à la même profondeur. Sous l'Océan Indien, comme sous l'Atlantique, la croûte terrestre a des propriétés élastiques semblables à celles des continents ; il en est tout autrement sous le Pacifique.

D'après A.E. SCHEIDEGGER ⁽²⁾, cette différence tient à ce que dans le Pacifique le substratum de sima apparaît à nu, tandis que, dans l'Atlantique et l'Océan Indien, le matériau est le même qu'à l'endroit des continents, mais avec une épaisseur moindre comme l'indique le tracé de la discontinuité de MOHOROVICIC.

Pour l'Océan Indien, nous rapporterons l'opinion de R.W. RAITT et G.S. GEORGE JR ⁽³⁾. Ces auteurs ont établi que le fond de cet océan présente de grandes variations de structure, comme de vitesse de propagation des ondes séismiques. La variété des résultats obtenus par les explorations est plus grande que dans les zones profondes du Pacifique ; en moyenne la distance au manteau paraît être de 1 à 2 kilomètres plus grande que dans le Grand Océan ; par contre, une très mince croûte a été observée : au nord de l'île Amsterdam le manteau serait à la profondeur de 7,5 kilomètres pour une profondeur de la mer de 3 kilomètres et demi.

De son côté R.A. DALY ⁽⁴⁾ signale que, dans l'Océan Indien la ride de Murray (mer Arabique), la ride de Carlsberg et celle des Seychelles semblent être constituées par du sial et du salsima ; ailleurs, si le sial est absent le salsima peut être représenté.

Les îles Seychelles faites de granite et de terrains métamorphiques peuvent être considérées comme le prolongement du massif ancien de Madagascar sous les eaux de l'Océan. Le plateau sous-marin de Mascarene paraît bien être le prolongement nord-oriental de ce massif ancien. A première vue, on est tenté de voir là l'amorce d'une connexion étroite entre Madagascar et l'Inde péninsulaire.

La situation est cependant quelque peu différente si l'on tient compte des données du diagramme physiographique dressé par BRUCE C. HEEZEN et Marie THARP ⁽⁵⁾. En effet, il résulte des données relevées par ces savants que la ride médiane de l'Océan Indien se confond avec la ride de Carlsberg. Or, on sait que les rides médianes des océans sont essentiellement formées de matériaux basiques

⁽¹⁾ Y.M. SCHEINMANN, *Duration of Earth crust Transformation, on the basis of data for the northern Atlantic*, Tectonophysics, Elsevier Publishing Cy, Amsterdam, 1964, pp. 377-383.

⁽²⁾ A.E. SCHEIDEGGER, *Principles of geodynamics*, Springer Verlag, Berlin, 1958. Voir page 48.

⁽³⁾ RUSSEL W. RAITT and G. SHOR GEORGE JR, *Seismic refraction studies of the Indian Ocean*, Communications à l'Assemblée générale de la Geological Society of America, 1963.

⁽⁴⁾ R.A. DALY, *Origin of land Hemisphere and Continents*, Amer. Journal of Science, vol. 249, décembre 1951, pp. 903-924.

⁽⁵⁾ Dept. Geology and Lamont Geological Observatory Columbia University, New York, N. Y., 1965.

et ne peuvent pas être confondues avec le Sial. Dans de telles conditions, on ne peut pas admettre un raccord direct de la ride de Madagascar-Seychelles-plateau de Mascarène avec les terrains anciens de l'Inde péninsulaire.

Dans le travail mentionné ci-dessus, BRUCE C. HEEZEN et Marie THARP font remarquer que le fond de l'Océan Indien est caractérisé par la présence de microcontinents de direction subméridienne. Dans la partie septentrionale de l'Océan, ils distinguent de l'Ouest à l'Est, la ride du Mozambique, celle de Madagascar, des Seychelles et de Mascarène, le plateau des Lacquedives, la ride *Ninety years*.

Quant au relief de son fond, la partie méridionale de l'Océan Indien est caractérisée par le plateau des Kerguelen ; celui-ci apparaît sur le diagramme comme un vaste prolongement sous-marin de l'Antarctique.

La présence de ces aires de faible profondeur, émergeant par endroits, ou microcontinents de HEEZEN et THARP constitue la grande différence entre l'Océan Indien et le Sud-Atlantique. Signalons aussi la grande différence d'orientation des décrochements dans l'Atlantique d'une part, dans l'Océan Indien d'autre part.

Nous croyons devoir insister ici sur le fait que l'île de Madagascar présente vers le nord un prolongement sous-marin de grande longueur, jalonné par les Seychelles et, vers le sud, un autre prolongement de très faible largeur, désigné sous le nom de Madagascar Ridge sur la carte de B.C. HEEZEN et Marie THARP.

Ajoutons que d'après le professeur BELLAIR, il existe un massif important de granodiorite sous le basalte dans les îles Kerguelen ; il s'agit bien là d'un matériau de nature sialique. Dans cet Océan toute une série d'île seraient ainsi faites non pas de matériau océanique, mais de sial, par exemple du granite et des schistes cristallins. Par contre, l'île Amsterdam, située à l'est, de nature volcanique, est formée uniquement de basalte.

Ces indications, tout incomplètes qu'elles soient suffisent à montrer que le sial n'est pas limité à l'étendue des continents géographiques. Certains fonds océaniques en sont en partie constitués et l'opposition entre les deux domaines apparaît peut-être moins importante qu'on pourrait le croire au premier abord. Si l'on s'en tenait à des notions trop générales, le Sial s'étendrait sur près des deux tiers de la surface du Globe ; son extension est certainement moindre. C'est peut-être un argument en faveur de l'existence d'une croûte originelle discontinue de sial dont les surépaisseurs pourraient correspondre aux masses continentales et à certaines crêtes ou hauts-fonds actuellement cachés sous les eaux marines.

Quelles que soient les différences observées entre les fonds des divers océans, il n'en est pas moins vrai que, en moyenne, leur nature diffère profondément de celle des continents. Il est bon de citer ici une phrase d'un article de H.W. MENARD ⁽¹⁾ :

⁽¹⁾ H. W. MENARD, *Developments of median elevations in ocean basins*, Bull. Geol. Soc. America, vol. 69, pp. 1179-1186, 1958.

“ Recent geophysical measurements reveal that ocean basins are profoundly different from continents. The hypothesis that continents formerly existed in some places where ocean basins are now found is correspondingly less acceptable ”.

Menard écrit aussi :

“ The permanence of continents and ocean basins is in dispute, but there can be little doubt that each has some highly stable characteristics, namely :

” 1) A distinct topographic level that is so widespread as to dominate the hypsographic curve of the earth (Kosima, 1921, p. 36).

” 2) A characteristic suite of rocks that is statistically different if not completely so (GILLULY, 1955, p. 8-10).

” 3) A typical apparently layered crustal structure as revealed by seismic methods (EWING and Press, 1956, p. 2-4).

” A continent cannot be changed into an ocean basin without changing 35 Km of one type of rock into 5 Km of another type and lowering the surface by more than 5 Km ”.

Comme on le voit, tout cela va à l'encontre d'une conception ancienne consistant à supposer, à l'endroit du Pacifique, l'existence d'un vaste massif résistant, de nature analogue à celle des môles canadien, scandinave, sibérien, africain ⁽¹⁾.

C. LE RELIEF DES FONDS OCÉANIQUES.

Le relief du fond des océans à l'intérieur de la plate-forme et du talus continental, nous apparaît aujourd'hui comme bien moins régulier qu'on l'imaginait autrefois. Les observations par sondages ou par les méthodes acoustiques ont révélé des inégalités considérables.

1. *Iles, reliefs volcaniques et guyots.*

En conclusion des recherches entreprises au cours de ces dernières années, MENARD a dressé une série d'esquisses montrant la distribution de reliefs isolés de diverses origines dans l'étendue de l'Océan Pacifique.

Les uns sont des crêtes ou des cônes volcaniques émergeant du soubassement ; d'autres désignés sous le nom de « seamounts » paraissent être de même nature mais sont entièrement sous l'eau. Tous ces reliefs distribués sur les grands fonds océaniques sont essentiellement de nature basaltique, recouverts ou non par des calcaires coralliens.

⁽¹⁾ Ce môle pacifique hypothétique figure sur la planche I annexée à l'ouvrage de L. DE LAUNAY, *La science géologique*, Librairie Arnaud Colin, Paris, 1905.

Les « guyots » ⁽¹⁾ sont des reliefs isolés, à parois relativement abruptes et dont le sommet a été aplani par l'érosion à une époque où ces pics émergeaient.

De tels reliefs isolés sont connus dans le golfe d'Alaska, dans le nord-ouest du Pacifique, au nord des îles Marshall. Un ouvrage a été consacré à ce genre de relief dans le Pacifique central, entre les îles Marshall et l'archipel des Hawaï ⁽²⁾. Nous avons trouvé dans l'édition de 1964 de ce livre des enseignements de grand intérêt pour le sujet qui nous occupe.

Les guyots sont formés d'un basalte à olivine très semblable à celui des îles Hawaï. Cette roche se présente à l'état de débris sur le sommet des pics, débris résultant de l'érosion par les vagues. Certains guyots sont couronnés également de constructions coralliennes.

On peut considérer les reliefs de ce type comme d'anciens volcans ou rides volcaniques comparables aux constructions de cette nature de l'archipel des Hawaï. Les guyots abondent surtout dans la moitié ouest du Pacifique.

D'après une carte dressée par MENARD ⁽³⁾, il est possible de tracer certains alignements suivant lesquels les reliefs volcaniques sont orientés, dessinant en quelque sorte des crêtes correspondant à des accidents tectoniques. Il est intéressant de les mettre en parallèle avec la disposition des grandes failles radiales reconnues sur le fond du Pacifique. L'ensemble paraît bien correspondre à un réseau systématiquement ordonné. C'est du moins ce que laisse apparaître la carte de MENARD. (Fig. 6)

L'étude des échantillons de roches sédimentaires recueillis sur certains de ces reliefs a permis de dire que la faune consistant en coraux, rudistes, stromatoporoïdes et mollusques est d'âge crétacé, de l'Aptien au Cénomaniens. Cette faune présente une grande affinité avec celle de même âge de la Téthys ; à cette époque, le climat était tropical ou semi-tropical. D'autres guyots ont fourni des restes organiques datant du Crétacé supérieur ou du Paléocène. Enfin, les foraminifères planctoniques recueillis montrent une grande affinité avec ceux du Mexique.

Les guyots apportent incontestablement la preuve d'un affaissement du fond du Pacifique au moins depuis le Crétacé ; il s'agit là d'un vaste mouvement épéirogénique. Le fait avait déjà été envisagé par Ch. DARWIN ⁽⁴⁾ pour expliquer la croissance des récifs coralliens d'une épaisseur trop considérable en égard aux conditions de vie de ces organismes.

On établira volontiers un rapprochement entre ces observations et le fait que nous avons rapporté d'après P. TERMIER à propos de la crête médiane de l'Atlantique : la présence de lave vitreuse semblant indiquer sa mise en place près de la surface.

(1) Ce nom fut donné par Harry H. Hess en mémoire du géographe Arnold Guyot qui vivait au XIX^e siècle.

H.H. HESS, *Drowned ancient Islands of the Pacific Basin*, Amer. Journ. of Science, vol. 244, pp. 772-791, 1946.

(2) EDWIN L. HAMILTON, *Sunken Islands of the mid Pacific Mountains*, Mem. 64 Geol. Soc. of America, 1956, réimprimé en 1964.

(3) H.W. MENARD, *Geology of the Pacific Sea floor*, Experientia, vol. XV, fasc. 6, 1959.

(4) Ch. DARWIN, *Structure and distribution of coral reefs*, 3^e édition, New York, D. Appleton and Co, 366, p. 1889.

D'autres récifs sont, au contraire, à une hauteur parfois considérable au-dessus du niveau de la mer comme on peut le voir aux îles Hawaiï. Si le fond de l'Océan est descendu à certains endroits, il a pu s'élever à d'autres. En réalité, il faut voir dans ces mouvements la preuve d'un gauchissement ondulatoire de la croûte terrestre, dont on trouve des manifestations tout aussi marquées sur les continents.

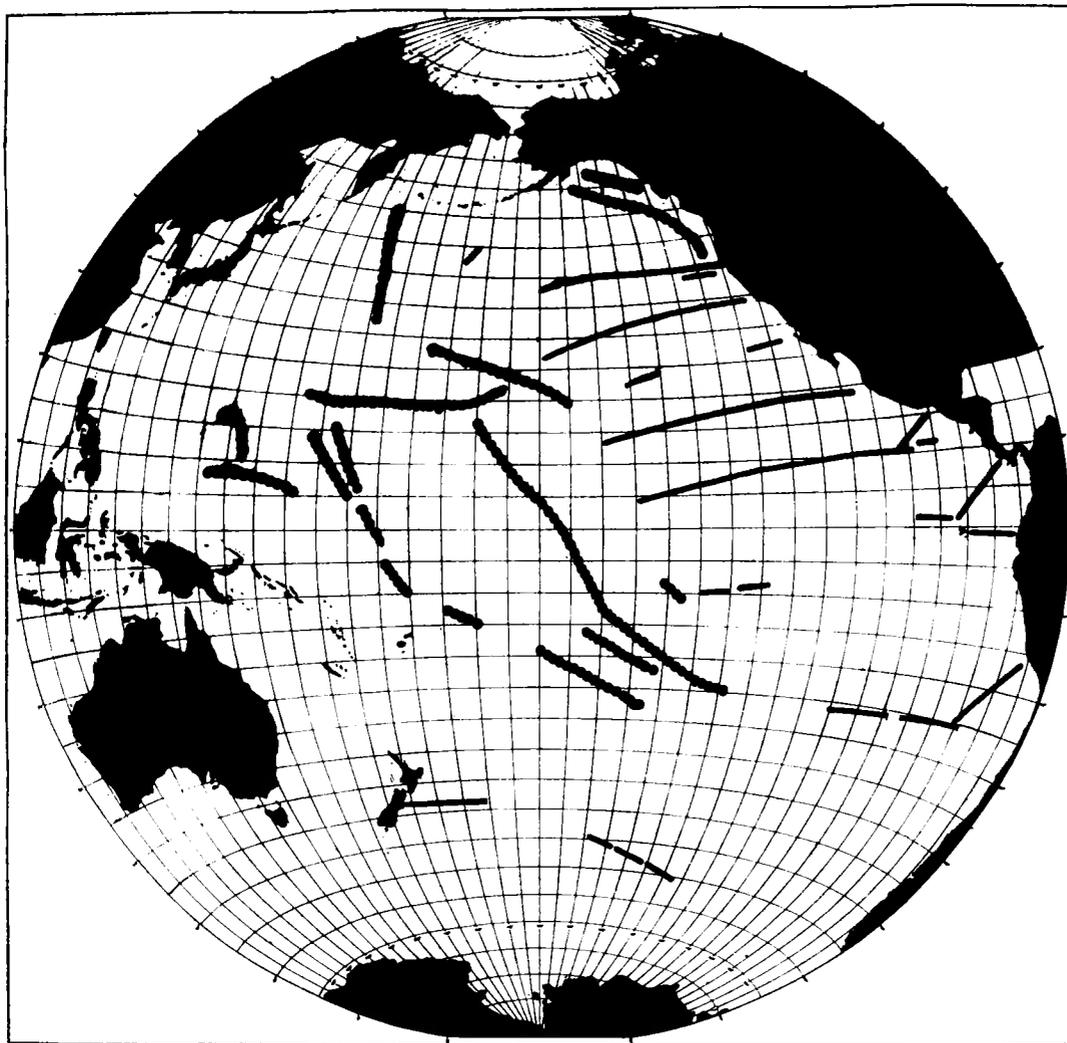


FIG. 6. — Le fond du Pacifique, d'après MENARD.

En traits pleins : zones de fracture ; en petits cercles alignés : archipels linéaires et guyots.

(Reproduit avec l'autorisation de l'auteur).

2. Les crêtes médianes.

L'un des traits les plus marquants par ses caractères propres comme par son extension dans tous les océans est celui des grandes *crêtes médianes*. Dans leur distribution elles semblent constituer un réseau systématiquement ordonné comme on peut le voir par l'examen des cartes dressées par divers auteurs ; parmi

ces cartes, celles de HEEZEN et EWING, de MENARD et de VENING MEINESZ sont les plus parlantes ⁽¹⁾.

La ride la plus caractéristique est, sans contredit celle de l'Atlantique, dont elle suit fidèlement l'allure incurvée des rivages, tout en serrant de très près l'axe de cet océan. Il en est à peu près de même pour le Pacifique bien que la régularité de la ride y soit moins apparente à première vue, notamment à cause de la présence de rides secondaires.

Les crêtes océaniques médianes sont en connection étroite les unes avec les autres. La ride atlantique contourne l'extrémité méridionale du continent africain, et se prolonge dans l'océan Indien où elle passe entre Madagascar et l'île St Paul. A partir de là, une branche se dirige vers le golfe d'Aden et constitue la crête médiane de l'Océan Indien ; une autre branche contourne l'Australie par le Sud pour se prolonger par la ride médiane du Pacifique passant à proximité de l'île de Pâques, pour se diriger ensuite vers les côtes de Californie.

A ce sujet, TUZO WILSON ⁽²⁾ rappelle que l'ensemble des rides médianes océaniques constitue la chaîne montagneuse la plus importante du Monde, si l'on tient compte de son extension ou longueur en même temps que de sa largeur de plusieurs centaines de kilomètres et de sa hauteur qui atteint plusieurs kilomètres.

Une particularité mérite de retenir l'attention : La crête médiane de l'Atlantique arrivée à hauteur de l'extrémité sud du continent africain tourne assez brusquement vers l'est pour passer à mi-distance entre celui-ci et l'Antarctique et se diriger vers l'Océan Indien. Par contre, elle n'envoie pas vers l'Ouest un embranchement symétriquement disposé par rapport au précédent et qui passerait entre la Terre de Feu et l'Antarctique. L'explication est peut-être la suivante : les chaînes de l'Ouest américain s'incurvent brusquement vers l'est pour dessiner l'arc des Antilles du Sud et se raccorder ainsi aux chaînes récentes de l'Antarctique Occidentale. Il y a là un obstacle au passage de la crête médiane, obstacle qui se voit clairement sur une carte du relief du fond marin dans cette partie du globe.

Ajoutons encore qu'à partir de l'Islande, la crête médiane atlantique se prolonge vers le nord, passe un peu à l'ouest du Spitzberg et, se poursuivant parallèlement à la crête Lomonosov, touche la côte sibérienne près de la presqu'île de Taymir.

Nous croyons devoir insister ici sur une observation à caractère très général relative au tracé des crêtes médianes océaniques. Ces rides sont propres au domaine de l'Océan ; elles s'arrêtent dès qu'elles atteignent le Continent, voire même un seuil sous-marin quelque peu marqué ; nous avons souligné notamment la différence existant à cet égard entre l'extrémité sud de l'Afrique d'une part, et celle de l'Amérique méridionale d'autre part ; un autre fait d'observation vient à l'appui de notre interprétation. Nous avons signalé que la crête médiane de l'Atlantique arrivée à hauteur de la Terre de Feu s'incurve vers l'est, et se prolonge dans

⁽¹⁾ F.A. VENING MEINESZ, *The Earth's Crust and Mantle*, Elsevier Publishing Cy, Amsterdam, 1964, page 53.

⁽²⁾ J. TUZO WILSON, *Are the continents drifting ?* The Unesco Courier, octobre 1963.

Nous reproduisons ici le tracé de HEEZEN et EWING.

l'Océan Indien en épousant grossièrement la forme du continent africain. Nous avons dit antérieurement (page 47) que BROCK a déjà fait mention de cette particularité remarquable ; elle porte, en effet, à croire qu'il s'agit d'un seul et même accident qui a pris naissance au même moment sur toute sa longueur ; il suit de très près l'allure générale des côtes de l'Afrique à l'Ouest, au Sud et à l'Est pour aller se perdre vers le Nord dans le golfe d'Aden, voire même par une étroite zone de roches basiques coïncidant avec l'axe de la mer Rouge, pour disparaître à l'approche du golfe de Suez.

A hauteur de l'île St Paul, une branche s'en détache et se dirige vers l'Est-Sud-Ouest et contourne l'Australie par le Sud, où elle prend une grande largeur. La crête médiane ne s'est pas prolongée entre l'arc des Iles de la Sonde et l'Australie, comme il eut semblé plus rationnel. C'est vraisemblablement parce que cet intervalle correspond à des haut-fonds de nature sialique et non pas à de grandes profondeurs océaniques de nature basique (1).

On se trouve ainsi en présence d'une situation comparable à celle signalée entre l'Amérique méridionale et l'Antarctique : la présence de haut-fonds, de caractère continental a arrêté la ride médiane de nature essentiellement océanique.

BRUCE C. HEEZEN et Marie THARP, dans la notice explicative du diagramme physiographique de l'Océan Indien, attirent l'attention sur cette disposition curieuse de la dite crête médiane qu'ils comparent à un Y renversé. Il est à remarquer que les deux branches de l'Y paraissent avoir été orientées par la forme du plateau continental de l'Antarctique et son annexe le plateau sous-marin des Kerguelen, qui prolongent loin sous les eaux de l'Océan le massif ancien de l'Antarctique. Rappelons que d'après les observations du professeur BELLAIR aux îles Kerguelen, on pourrait trouver quelques indices de la nature sialique de cette partie du fond océanique.

On trouvera dans cette disposition de la ride médiane de l'Océan Indien une confirmation de la règle énoncée ci-avant à savoir que de telles crêtes sont propres uniquement aux grands fonds à composition de Sima et s'arrêtent à l'approche des massifs de nature continentale c'est-à-dire formés de matière sialique qu'ils soient en relief sous forme de continents géographiques ou qu'ils soient couverts par les eaux de l'Océan.

Quelle est la signification de ce réseau de rides si régulièrement disposé sur le fond des océans ? Rappelons ici que GRUSSOV, dont nous avons déjà cité un important travail, croit voir dans ces lignes de relief, tout au moins pour l'Atlantique, l'équivalent d'une chaîne de montagnes du domaine continental, les Rocheuses par exemple. Compte tenu du matériau constituant, une telle interprétation ne paraît pas devoir être retenue. Il est à noter tout d'abord que ces crêtes sont formées en majeure partie de roches basiques ; elles sont, d'autre part, jalonnées de volcans qui rejettent du basalte, mais parfois aussi du trachyte et de

(1) On consultera à ce sujet le diagramme physiographique de Bruce C. Heezen et Marie Tharp dont il a été question précédemment.

l'andésite. En outre, si leur structure est parfois complexe, elle consiste le plus généralement en une large ride compliquée d'une dépression suivant sa ligne axiale ⁽¹⁾.

Nous devons ajouter que, d'après MENARD, les rides océaniques médianes sont de divers types : a) les unes sont larges et leurs flancs peu inclinés ; elles sont jalonnées par de nombreux volcans et monts sous-marins, sans qu'il y ait de guyots ; b) d'autres sont moins larges, à flancs plus inclinés ; elles supportent des îles volcaniques et des guyots côte à côte ; c) enfin une troisième catégorie correspond à des rides étroites à flancs abrupts ; elles sont inactives du point de vue séismique, ne sont pas marquées par des îles volcaniques, mais bien au contraire par des guyots et des atolls. D'après MENARD, il pourrait y avoir passage progressif du premier type au troisième l'activité volcanique allant en s'atténuant progressivement au fur et à mesure que la ride se stabilise ; la présence de nombreux atolls et guyots le long des rides de la troisième catégorie est aussi en faveur de sa formation plus ancienne et de son évolution plus avancée.

Il a été observé d'autre part que le flux de chaleur est plus considérable à l'endroit de l'axe des rides océaniques médianes qu'en tous autres lieux des océans.

Par ces divers caractères les rides océaniques s'écartent considérablement des orogènes connus sur les continents ; il serait difficile d'établir une équivalence entre ces deux types de déformations.

P. TERMIER n'avait pas manqué, il y a un demi-siècle, d'insister sur l'intérêt de la découverte d'un échantillon de lave vitreuse à 900 kilomètres au nord des Açores, précisément sur le trajet de la crête médiane ; ce fait permet d'admettre qu'il fut un moment où cette partie de l'océan émergeait ⁽²⁾.

Les rides océaniques sont, d'autre part marquées par la présence, suivant leur tracé, de foyers de tremblements de terre. Aussi par ces divers caractères : séismicité, nature des matériaux, flux anormal de chaleur, est-on tenté de les considérer comme des fractures en voie d'élargissement progressif. Les observations faites en Islande sont peut-être en faveur de cette manière de voir ⁽³⁾.

Ces faits établis, il n'est pas inutile de rappeler la citation de MENARD reproduite ci-avant (page 73). Les crêtes océaniques sont faites d'un autre matériau que les orogènes des continents ; ce sont là des phénomènes distincte dans l'évolution de la croûte terrestre. Si l'on accepte qu'il en fut toujours ainsi c'est admettre la permanence des océans à fond basaltique. Aussi, nous nous plaisons à citer un passage d'une étude de J. EWING et M. EWING ⁽⁴⁾ :

⁽¹⁾ Menard ne pense pas que la présence de cette dépression suivant la crête ait un caractère de généralité comme on l'a cru tout d'abord. Bull. Geol. Soc. America, vol. 69, n° 9, 1958.

⁽²⁾ P. TERMIER, *A la gloire de la Terre*, 1^{re} édition, Paris, 1924, pp. 117-146. L'Atlantide conférence faite en 1912.

⁽³⁾ M.G. RUTTEN and H. WENSIK, *Structure of the Central graben of Iceland*, Rep. of the Twenty-first session. intern. geol. Congress. part. XVIII. Copenhagen, 1960.

⁽⁴⁾ J. EWING and M. EWING, *Seismic refraction measurements in the Atlantic Ocean Basins in the Mediterranean Sea, on the middle Atlantic Ridge and in the Norwegian Sea*. Bull. Geol. Soc. Amer., vol. 70, 1959, p. 291.

“ The mid-ocean ridge system is worldwide in extent (EWING and HEEZEN, 1956) and generally follow a course midway between continental masses suggesting that it is as old as the continents themselves. A narrow median rift is apparently a characteristic feature. The seismic epicenter belt and the recent volcanoes follow the median rift very closely...

“ All these conditions would result from convection with rising currents under the mid-ocean ridges. These currents are now supplying magma and exerting extensional forces on the ridges. Apparently this is the convection system which determined the location of the continents ”.

Les rides médianes apportent de toute manière, un argument en faveur de la thèse des courants de convection. A ce propos, VENING MEINESZ écrit cependant ⁽¹⁾ :

“ The constitution of the crust in the mid-ocean rises is not yet clear. Whether the mantle currents, which probably rise below these ridges, have affected the constitution of the crust is a question which can not yet be finally answered. Seismic velocities often show figures between those of granite and basalt, and they have not yet been clearly interpreted ”.

La question de l'origine des crêtes océaniques médianes est troublante. D'après certains caractères qui viennent d'être rappelés, on est tenté de leur trouver quelque analogie avec les grandes fractures radiales dont il a été question à propos des continents et qui seront à prendre en considération dans les océans comme nous le ferons dans un instant. Cependant la forme même du réseau des crêtes médianes diffère nettement du réseau des fractures radiales proprement dites. Leur étude conduit à penser qu'il faut y voir le résultat d'un phénomène encore inexpliqué, provoquant la fissuration de la croûte terrestre, permettant ainsi la montée de matériaux du manteau sur le fond des océans, chose inconnue dans le domaine continental, apportant en quelque sorte la preuve de l'existence de courants de convection dans le manteau.

On ne s'étonne pas alors de lire dans l'ouvrage récent de VENING MEINESZ dont mention vient encore d'être faite à plusieurs reprises, la déclaration suivante que nous nous plaisons à reproduire :

“ So we may assume that in the oceans the plastic down-buckling process leads to a much greater shortening of the crust than in the continents. If we neglect the small content of basalt and sediments, we might even suppose that the crustal shortening in these oceanic geosynclines is unlimited.

” We then arrive at a conclusion of immense importance in the geophysical history of the earth, i.e., the possibility that the mantle currents can transport the continents over the earth's surface without their undergoing much deformation. We likewise see that this conclusion is right, notwithstanding the rigid character of the earth's crust below the oceans, which is shown by many straight fault planes through this crust, of which evidence is given by the MENARD

⁽¹⁾ F.A. VENING MEINESZ, *The Earth's Crust and mantle*, p. 9.

escarpments and by a considerable number of straight rows of volcanic islands and atolls in the Western and Middle Pacific. Because of the numerous arguments in favour of continental drift, given by TAYLOR (1910), WEGENER (1929) and more recently by RUNCORN (1963) this is a welcome conclusion. ”

Il nous a paru utile de mettre dès maintenant le lecteur en présence de la conception de l'éminent géophysicien hollandais.

Les recherches effectuées dans le domaine de l'Atlantique ⁽¹⁾ ont donné des résultats remarquables en ce qui concerne la connaissance de la structure des des crêtes médianes océaniques. La zone axiale, de haut relief, de la crête atlantique est formée, en surface, d'un matériau où la vitesse de propagation des ondes sismiques est de l'ordre de 5 Km/sec. Sous celle-ci il existerait une zone où la vitesse des ondes sismiques atteint 7,3 à 7,5 Km/sec. ; elle atteint son épaisseur maximale sous la ligne axiale, à plus haut relief, de la crête, tandis que sa puissance diminue progressivement vers ses bords passant ainsi à la zone où la vitesse des ondes est de 6,7 Km/sec. c'est-à-dire la vitesse normale dans la partie superficielle des fonds océaniques ; elle se présente ainsi avec l'allure d'une dépression allongée suivant la crête médiane, s'enfonçant dans le matériau sous-jacent plus dense, le sima où la vitesse de propagation des ondes atteint 8.1 Km/sec.

Ces notions sont importantes parce qu'elles permettront peut-être de fixer l'origine et l'ancienneté des crêtes médianes océaniques.

Quel est l'âge de ce vaste réseau de crêtes océaniques médianes ? Il est certes difficile de répondre à cette question. La thèse la plus probable eu égard notamment à l'ancienneté du Pacifique est de les faire remonter très loin dans l'histoire géologique de la Terre. Nous reprendrons l'examen de cette question dans un autre chapitre.

D. LA LIGNE ANDÉSITIQUE DU PACIFIQUE ET SES FOSSES MARGINALES.

Nous avons déjà fait mention de cette particularité ; nous croyons utile de donner à son sujet quelques détails complémentaires.

Les géologues ont reconnu dans la région bordière de l'Océan Pacifique l'existence d'une zone très étroite caractérisée par la présence de volcans éteints ou actifs à laves du type des andésites, trachytes, rhyolites, avec une certaine proportion de matériau basaltique ; par leur composition, ces matériaux diffèrent grandement des laves rejetées par les volcans situés dans la majeure partie de cet océan, qui sont de nature basaltique et péridotique à de rares exceptions près.

Cette zone a été désignée sous le nom de *ligne andésitique*. Nous reproduisons une figure tirée de l'ouvrage de HOLMES ⁽²⁾ où certains traits du fond du

⁽¹⁾ Maurice EWING, John J. EWING, Manik TALWANI, *Sediment distribution in the Oceans. The mid-Atlantic Ridge*, Bull. geol. Soc. America, janvier 1964.

⁽²⁾ A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, New edition, 1965, fig. 742, page 1014.

Pacifique sont également indiqués (fig. 8). On peut la suivre aisément dans l'ouest du Pacifique où elle passe un peu à l'écart de l'île Chatham venant vraisemblablement d'une partie plus méridionale encore ; elle se continue vers le nord en

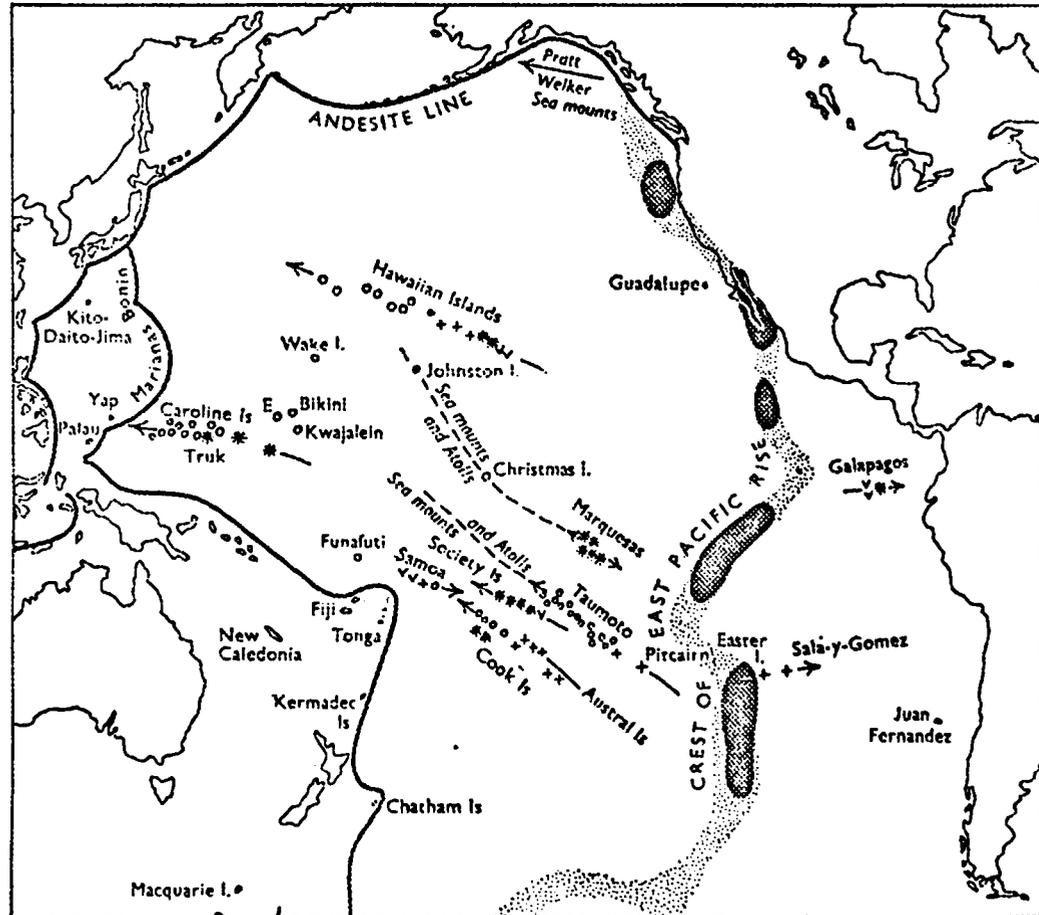


FIG. 8. — Le fond du Pacifique et la ligne andésitique, d'après HOLMES.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).

passant à proximité de l'île septentrionale de la Nouvelle-Zélande. coïncide approximativement avec la fosse des Tonga à l'est des îles Fiji, s'incurve ensuite brusquement vers l'ouest, pour border, du côté nord, l'archipel des Salomon, longe l'arc des îles Mariannes, se poursuit immédiatement à l'est du Japon, borde au sud l'arc des Aléontiennes et atteint ainsi la côte de l'Amérique septentrionale qu'elle suit, sur le continent même, à peu de distance de l'Océan et cela jusqu'aux centres volcaniques de l'Amérique méridionale.

La ligne andésitique entoure donc tout le Pacifique ; elle marque la séparation entre deux domaines bien différents l'un de l'autre en ce qui concerne l'activité volcanique ; à l'intérieur de la ligne les produits émis par les volcans sont apparentés au sima, la ligne andésitique est jalonnée d'appareils éruptifs qui rejettent

des produits de nature sialique, accompagnés cependant de matériaux s'apparentant davantage au sima ou au salsima, notamment du basalte. On pourrait supposer que les dits appareils volcaniques ont pris naissance dans une zone quelque peu intermédiaire entre le domaine continental et le domaine océanique profond, par exemple là où les massifs sialiques originels se terminent en biseau à l'approche de l'océan.

C'est une réflexion que nous avons déjà faite antérieurement à propos de la distribution des arcs insulaires et des volcans dans la partie sud-ouest de l'Océan Pacifique.

Nous avons maintenant à souligner un autre fait intéressant : en bordure de la ligne andésitique, se confondant avec elle, ou la longeant de très près s'étirent des fosses profondes qui suivent ainsi l'alignement des arcs insulaires dans l'Ouest du Pacifique. L'une des plus caractéristiques est la grande fosse située immédiatement à l'est des îles Tonga et Fiji.

On en connaît de semblables en bordure des Mariannes, de l'arc des Philippines, le long des îles Hondo et Yeso du Japon, avec son prolongement en bordure des Kouriles ; une autre encore épouse fidèlement la forme de l'arc des Aléoutiennes en longeant sa bordure méridionale.

Il est à noter que ce caractère si spécial est propre à la bordure ouest et nord de l'Océan. Le long des rivages des deux Amériques, on n'en connaît pas d'équivalent, à part une fosse très étroite, un peu plus profonde que l'Océan voisin, qui s'étire sur une certaine longueur parallèlement à la côte du Pérou et à celle du Chili.

On remarquera que cette dissemblance entre les deux rives de l'Océan Pacifique coïncide avec celle que nous avons signalée ci-avant dans le tracé de la ligne andésitique suivant que l'on considère l'ouest ou l'est du Grand Océan.

Elle s'accorde aussi avec une autre dissemblance bien connue des géographes entre la zone marginale du Pacifique le long de la côte américaine d'une part, de la côte australo-asiatique d'autre part : les guirlandes insulaires n'existent qu'à l'Ouest, où elles sont séparées du continent voisin par des mers relativement peu profondes, de type épicontinental.

D'ailleurs, la carte des côtes du Pacifique dressée par R.A. DALY est très parlante à cet égard. Du côté est, ces chaînes appartiennent uniquement au continent américain ; à l'ouest au contraire, elles sont presque entièrement situées sur les arcs insulaires et de part et d'autre de la presqu'île du Kamchatka que l'on peut considérer comme le prolongement normal de ces arcs ; c'est seulement à l'approche du détroit de Behring, avec l'arc des Aléoutiennes que s'opère le passage d'un type à l'autre.

Un tel ensemble de faits obéissant à une règle unique indique forcément que l'Océan Pacifique et ses bordures se sont comportés comme un vaste bloc affecté de larges mouvements d'ensemble. On pourrait dire à ce propos que ce domaine du Pacifique a enregistré les effets d'un mouvement de bascule abaissant la partie ouest, soulevant au contraire la partie orientale, donnant ainsi l'impression d'une disposition dissymétrique, alors que la distribution des unités structurales met

en évidence une évolution parfaitement symétrique par rapport à l'axe de cet océan (1).

Nous pourrions épiloguer longuement sur cette question ; ce serait cependant hors de propos pour l'instant. Nous nous contentons de souligner cette particularité.

A propos des grandes fosses situées en bordure de la ligne andésitique dans l'Ouest du Pacifique, il y a lieu de rapporter un fait d'importance capitale : D'après les mesures effectuées par VENING MEINESZ, les grandes fosses marginales du Pacifique sont caractérisées par un déficit de gravité. Pour qu'un tel état puisse se maintenir il y a lieu de faire appel soit à l'action d'un courant de convection obligeant la croûte superficielle à s'incurver vers le bas au contact de la masse continentale. Ou bien il faut supposer qu'un effort de compression agissant symétriquement vers l'axe de la fosse, avec ou sans fracturation de la croûte, maintienne une anomalie de structure en opposition avec la notion d'isostasie.

Une disposition de ce genre s'oppose de toute façon à une extension du fond de l'Océan comme ce devrait être le cas, semble-t-il dans la théorie de l'expansion.

Ces divers caractères soulignent le fait d'une évolution générale du vaste domaine du Pacifique différente de celle des autres grands bassins océaniques.

E. LES FAILLES RADIALES.

Depuis quelques années, l'exploration des fonds océaniques a révélé l'existence de grandes fractures désignées par les Anglo-Saxons sous le nom de " Wrench faults " ou de " *strike-slip faults* " c'est-à-dire des décrochements horizontaux, se marquant par des escarpements plus ou moins accusés.

Dans l'Océan Atlantique une importante zone de fractures de ce genre a été décelée entre les Antilles et le Golfe de Guinée. D'après les observations de B.C. HEEZEN et Marie THARP (2) ces failles déplacent la crête médiane de l'Atlantique de façon systématique, le bloc méridional étant déporté vers l'est par rapport au bloc septentrional.

On peut en conclure que la crête médiane existait au moment de la production de ces accidents tectoniques. C'est là un point important pour la compréhension de l'évolution géologique de cette partie de la surface de la Terre. Nous y reviendrons dans la deuxième partie de l'ouvrage, lorsque nous aurons à discuter de la valeur des arguments mis en avant pour ou contre la théorie de la dérive des Continents.

(1) Voir à ce sujet : P. FOURMARIER, *Principe de géologie*, 3^e édition, tome II, 1950. Consulter spécialement les pages 992 et suivantes.

(2) BRUCE C. HEEZEN and MARIE THARP, *Oceanic Ridges, Transcurrent Faults and Continental Displacement*, Résumé des travaux présentés à l'Assemblée générale de 1960 de la Geol. Soc. of America.

La fracture la plus importante a un déplacement latéral de l'ordre d'un millier de kilomètres ; pour l'ensemble du réseau constitué par plusieurs failles proches les unes des autres, il est de l'ordre de 3000 kilomètres.

Dans un article récent, DALE C. KRAUSE a donné quelques renseignements complémentaires sur les grandes fractures de l'Atlantique dont il a relevé la présence en face du Golfe de Guinée, entre 7 et 11 degrés de latitude nord ⁽¹⁾. Leur disposition est comparable en tous points à celle relevée par HEEZEN et THARP. Le rejet horizontal gauche est de l'ordre de 700 kilomètres. D'après KRAUSE, la zone de fractures pourrait se prolonger dans le Continent africain, soit directement, soit par une disposition en relais ⁽²⁾.

Des failles de même nature ont été reconnues dans le Pacifique, non seulement en bordure de cet océan comme la faille de San Andreas de Californie ou la faille alpine de la Nouvelle Zélande, mais aussi sur le fond même de l'océan. Les cartes dressées à ce jour portent du nord au sud, les noms suivants :

Faille Mendocino

Faille Clarion

Faille Pioneer

Faille Clipperton

Faille Murray

et d'autres encore non dénommées ⁽³⁾.

Leur orientation est sensiblement ouest-est ; la faille Mendocino est la plus importante quant à la valeur de son rejet horizontal, qui est de l'ordre de 1160 kilomètres, le déplacement étant lévogyre ⁽⁴⁾.

Il est à noter que la faille Clipperton est figurée comme traversant l'Amérique centrale pour se prolonger par les failles de l'Atlantique signalées ci-avant.

Sur la carte annexée à son mémoire, L. GLANGEAUD a figuré une série d'autres failles en plein océan, tantôt de direction NW-SE tantôt SW-NE. On peut supposer qu'il s'agit d'un vaste réseau à trois directions conjuguées assez systématiquement ordonné couvrant tout le Pacifique c'est-à-dire près d'un tiers de la surface de la Terre. A travers l'Amérique centrale, ce réseau est en relation avec celui de l'Atlantique, notamment par le " Bartlett Trench " traversant le Guatemala et passant au nord de la Jamaïque ⁽⁵⁾.

Ces fractures, d'après HESS, ne sont pas strictement rectilignes ; elles décrivent une courbe à très grand rayon de courbure, concave vers le sud.

⁽¹⁾ DALE C. KRAUSE, *Guinea Fracture Zone in the Equatorial Atlantic*, Science, vol. 146, n° 3640, octobre 1964.

⁽²⁾ Voir à ce sujet la carte annexée à la note de G. BARDET, *Contrôle géotectonique de la répartition des venues diamantifères dans le Monde*. Chronique des Mines et de la Recherche minière, 32^e année, n° 328-329, mars-avril, 1964, Paris.

⁽³⁾ BRUCE C. HEEZEN, *The Deep-Sea Floor in Continental Drift*, Edited by S.K. Runcorn, Academic Press: New York and London, 1962.

Voir aussi la carte annexée au mémoire : L. GLANGEAUD, *Le transfert d'échelle en Géologie et Géophysique*, Bull. Soc. géol. France, 7^e sér., t. IV, n° 7, p. 912, 1962 (paru en décembre 1963).

⁽⁴⁾ D'après les renseignements tirés de la nouvelle édition de l'ouvrage de HOLMES, *Principles of physical geology*, la faille Murray a un rejet horizontal de 154 kilomètres et celle nommée Pioneer 265 kilomètres ; pour l'ensemble des trois grandes fractures, le déplacement total serait de l'ordre de plus de 1500 kilomètres.

⁽⁵⁾ Carte de l'Amérique Centrale d'après BORN (1932) reproduite par VÉNING MEINESZ dans son ouvrage : *The Earth's Crust and Mantle*, fig. V, 3, p. 85.

Le fond de l'Océan Indien n'échappe pas à cette règle : Dans un travail récent, BRUCE C. HEEZEN et Marie THARP ⁽¹⁾ y signalent la présence de « micro-continent » linéaires, principalement dans sa partie méridionale. D'autre part, le fond de cet Océan est caractérisé par la présence de « linear trends » de direction nord-sud ; de grandes zones de fractures ont été décelées entre le golfe d'Oman et le Cercle Antarctique, parallèlement à la côte orientale de Madagascar, à la côte ouest des Seychelles et au Murray Ridge.

Au Sud-Ouest de l'Australie, des zones de fractures sont orientées grossièrement d'ouest en est, tandis qu'au nord-ouest de ce continent, des failles du même type ont la direction sud-ouest — nord-est. A noter que la ride médiane est déplacée par les failles radiales ou décrochements horizontaux. C'est une disposition très semblable à celle observée sur le fond de l'Atlantique.

On voit par là qu'à ce point de vue l'Océan Indien a évolué de la même manière que les autres océans ; il est marqué par le grand réseau de failles radiales couvrant toute la surface du Globe.

Rappelons encore que BROUWER a attribué la forme de certains arcs insulaires de l'Océanie à la poussée de masses résistantes provoquant la déchirure de la croûte terrestre suivant des failles radiales qui sont des décrochements horizontaux. C'est ainsi que les plis de la Nouvelle Guinée esquissant en direction une forme en S seraient la conséquence du jeu de semblables accidents.

Nous avons insisté à diverses reprises sur le fait que les failles radiales et les décrochements horizontaux sont disposés de façon assez systématique, esquissant un vaste réseau couvrant toute la surface du globe. Les décrochements sont tantôt dextrogyres, tantôt lévogyres, les premiers étant généralement de direction NE-SW, tandis que les seconds sont d'ordinaire orientés du N-W au S-E.

Il ne semble pas cependant que ce soit là une règle absolue. G. DUBOURDIEU ⁽²⁾ a insisté sur le fait que par la présence d'une série de failles de décrochement, la région marocaine s'est déplacée vers le N.E. par rapport à la Tunisie. Le même auteur a rappelé à propos du séisme d'Agadir de 1962 que de la Tunisie au Maroc il existe de nombreuses anomalies tectoniques de direction NE-SW, qui sont des zones de décrochement ; le mouvement serait toujours lévogyre ⁽³⁾.

Ces décrochements de la zone bordière septentrionale de l'Afrique dessinent avec d'autres accidents bien connus sur ce continent comme en Europe, un réseau assez bien ordonné à deux ou parfois trois directions conjuguées.

Il y a là la preuve du mouvement relatif de blocs de la croûte terrestre dont l'importance peut être considérable. Il est prudent cependant d'éviter d'estimer le déplacement de l'Afrique par rapport à Europe en totalisant le rejet horizontal de tous ces décrochements ; une disposition en relais de ces accidents est sans doute plus conforme à la réalité.

⁽¹⁾ BRUCE C. HEEZEN and MARIE THARP, *Physiographic diagram of the Indian Ocean*, Résumé dans : *Program 1964*, Annual Meetings Geological Society of America, p. 88. Voir les cartes publiées en 1965.

⁽²⁾ G. DUBOURDIEU, *Réactions wégenériennes en Afrique du Nord*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. 251, n° 25, 19.12.1960.

⁽³⁾ G. DUBOURDIEU, *La leçon du séisme d'Agadir*, C. R. Acad. Sc. Paris, vol. 256, n° 3, 14 janvier 1963.

Dans la nouvelle édition de son important ouvrage : *Principles of physical Geology*, page 1030, A. HOLMES écrit :

“ The recognition of continuing movements along great transcurrent or wrench faults such as those described on pp. 226-30, leaves no doubt that crustal displacements already amounting to hundreds of miles are still actively in progress. Besides the San Andreas fault of California and the Alpine fault of New Zealand, there are others less familiar but not less dangerously active. A notable example is the slicing of NW Africa by a series of ENE-WSW faults the cumulative effect of which to date has been to displace Morocco and northern Algeria well over 100 miles relative to Tunisia. ”

D'autre part, BRUCE C. HEEZEN et Marie THARP ⁽¹⁾ ont insisté sur ce fait remarquable que les rides médianes des océans sont coupées en maints endroits par les failles transversales, aussi bien dans l'Océan Indien que dans le Pacifique et l'Atlantique.

A première vue, les rides médianes sont, pour cette raison, plus anciennes que les failles qui les déplacent. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que ces grandes fractures, d'un rejet dépassant parfois le millier de kilomètres, ne se sont pas faites en une fois, mais par à-coups successifs pendant un temps extrêmement long. Il en est vraisemblablement de même pour les rides médianes, qui se sont certainement accentuées à maintes reprises. En réalité il y a là le jeu connexe de deux éléments tectoniques de nature différente.

Ajoutons encore que, d'après HEEZEN et THARP, ces lignes de fractures transversales sont aséismiques, sauf là où elles coupent l'axe de la ride médiane.

Par contre les rides médianes sont le siège de tremblements de terre et de manifestations volcaniques, mais leurs flancs paraissent être aséismiques.

Ajoutons encore que les grandes failles E-W du Pacifique s'arrêtent à la côte américaine. On peut émettre l'hypothèse qu'elles sont antérieures aux plissements très récents qui suivent la zone littorale.

En conclusion, les fonds océaniques ont un relief beaucoup plus accusé et plus varié qu'on ne l'imaginait autrefois ; il faut ajouter que ce relief est, d'une façon générale, tout autre que celui des continents. S'il se caractérise par endroits, comme ce dernier, par des pics volcaniques servant ou non de support à des constructions coralliennes, les escarpements dus aux grandes failles radiales sont bien mieux conservés que sur les continents. La distinction qui semble la plus frappante est l'absence de rides comparables aux orogènes des masses continentales dont ils sont l'un des constituants essentiels. Contrairement à ce que pense GRUSSOV (page 26) il ne peut y avoir de comparaison possible entre ces deux types de relief : crêtes médianes océaniques d'une part, orogènes des continents d'autre part.

⁽¹⁾ BRUCE C. HEEZEN and MARIE THARP, *Oceanic Ridges, Transcurrent faults and Continental Displacement* in Résumés des travaux présentés à l'Assemblée générale de 1963 de la Geological Society of America.

A ce point de vue, les vastes étendues océaniques ont subi une évolution tout autre que les continents ; il s'agit, en l'occurrence, de deux domaines distincts. On est même tenté d'affirmer qu'une telle situation a toujours existé depuis que se sont séparés les blocs de sial, première ébauche des continents.

La connaissance des grandes failles radiales affectant le fond des océans est importante à un autre point de vue. Elle indique que la croûte terrestre, quant à sa résistance, se présente dans des conditions très semblables qu'il s'agisse du domaine océanique ou continental. A ce propos, rappelons une phrase d'un article de CAREY (1) :

“ This crust might be expected to have strength of the same order as the continental crust. I have therefore excluded from my postulates any suggestion that continents can move freely through oceanic crust ”.

Observation. La présence de failles radiales ou décrochements horizontaux sur le fond des océans paraît bien démontrée aujourd'hui, puisqu'on a pu mesurer les déplacements des rides océaniques là où elles sont coupées par ces fractures.

La situation est donc sensiblement la même, en apparence tout au moins, dans les deux domaines continental et océanique de la croûte terrestre.

Nous croyons cependant devoir faire ici une réserve : Nous avons signalé les conclusions auxquelles est arrivé le groupe de géologues réunis en un symposium à Nairobi pour l'Est Africain. On garde l'impression qu'au point de vue de la formation des grandes cassures radiales, avec déplacement horizontal important, les fonds océaniques ou les régions voisines des grands océans ou en bordure de ceux-ci se présentent dans des conditions plus favorables. Ce serait une question à étudier avec beaucoup d'attention.

Il n'empêche que la croûte terrestre est affectée sur toute sa surface par un réseau plus ou moins régulier de fractures radiales qui sont souvent à rapporter à des décrochements horizontaux.

Quelle en est la raison ? Nous trouverons peut-être une réponse à cette question dans un article publié par J.P. MOODY et H.J. HILL (2). D'après ces auteurs, les Wrench fault sont subverticales ; elles descendent en profondeur jusque la base de la “ Outer Crust ” ; elles divisent la croûte en blocs polygonaux et sont ainsi un élément capital dans son comportement. Elles sont produites à l'intervention d'efforts de compression orientés suivant le méridien et doivent avoir été en action dans la même direction pendant la majeure partie de l'évolution de l'écorce terrestre. Elles dessinent toutes ensemble un réseau couvrant la surface entière de la Terre ; on peut distinguer jusque 8 directions dans ce réseau.

(1) S. WARREN CAREY, *The tectonic approach to continental Drift* in : *Continental Drift*. A symposium, p. 177. Hobart (Tasmanie) Geol. Departm. of the University of Tasmania, 1958.

(2) J.D. MOODY and H.J. HILL, *Wrench Fault Tectonics*, Bull. Geol. Soc. America, vol. 67, 1956, p. 1207.

Remarque au sujet des failles bordières du Pacifique.

Dans un paragraphe précédent, nous avons donné quelques indications sur les fractures radiales reconnues en bordure des continents entourant le Grand Océan, tant à l'Ouest qu'à l'Est. Ces failles sont évidemment bien connues grâce aux observations faites sur la terre ferme. On peut admettre néanmoins qu'elles ne s'arrêtent pas là où elles atteignent le rivage, mais qu'elles se prolongent sur le fond marin jusqu'à une distance plus ou moins grande de la côte.

En envisageant le vaste réseau de failles radiales reconnues en bordure du Pacifique, ALLEN ⁽¹⁾ arrive à la conclusion que les données de la géodésie et de la géologie confirment le déplacement continu le long de ces fractures, et cela conformément aux résultats obtenus par CROWELL à propos de la faille San Andreas de Californie.

Toutefois, ALLEN ajoute que ces accidents de la bordure du Pacifique n'apportent aucune preuve pour ou contre la dérive parce qu'elles sont sensiblement parallèles à la bordure du continent et ne permettent pas de préciser les conditions de l'orogénèse. Elles n'en soulignent pas moins la généralité du phénomène et sa longue durée ; c'est là un point important.

La présence d'un tel réseau paraissant systématiquement ordonné par rapport à l'Océan Pacifique a fait penser à une relation entre ces dislocations et un mouvement d'ensemble de ce grand bassin, vraisemblablement l'un des traits les plus anciens de la surface du Globe.

C'est ainsi qu'en 1959, ST AMAND ⁽²⁾ d'une part, BENIOFF ⁽³⁾ d'autre part, émirent l'opinion que le Pacifique tout entier était animé d'un mouvement de rotation par rapport aux continents qui l'entourent ; les failles ou décrochements horizontaux marquant le contact entre les blocs en mouvement.

Dans un travail plus récent ⁽⁴⁾ BENIOFF semble renoncer à cette explication eu égard aux nombreuses difficultés qu'elle soulève.

L'idée a cependant été reprise par Arthur HOLMES dans la nouvelle édition de son ouvrage : *Physical Geology* ; que nous avons cité déjà à diverses reprises. Ce savant suppose que le fond du Pacifique est animé d'un lent mouvement de rotation en sens inverse de la marche des aiguilles d'une montre. Cette hypothèse est évidemment des plus ingénieuse. On peut se demander cependant si le mouvement dextrogyre le long des failles bordières du Pacifique ne pourrait pas être

⁽¹⁾ C.R. ALLEN, *Circumpacific faulting in* Résumé des communications à présenter à l'Assemblée générale annuelle de la Geological Society of America, 1963.

⁽²⁾ PIERRE ST AMAND, *Circumpacific Orography*, Public. of the Dominion Observatory, vol. XX, n° 2, 1959.

⁽³⁾ HUGO BENIOFF, *Circumpacific Tectonics*, *Ibidem*, 1959.

⁽⁴⁾ H. BENIOFF, *Movements on Major Transcurrent Faults*, in *Continental Drift*, edited by S.K. Runcorn, Academic Press, New York and London, 1962.

envisagé sous un autre aspect. La question nous entraînerait par trop en dehors du cadre de notre travail et nous ne voulons pas nous y arrêter davantage. Ces considérations montrent cependant que les déplacements de la croûte terrestre peuvent être très complexes ; une grande prudence s'impose lorsqu'on veut tenter d'expliquer les mouvements relatifs que le géologue décèle à tous les moments de l'histoire de la Terre.

Nous devons, de toute manière, constater que les grandes fractures reconnues en plein Océan Pacifique sont sensiblement rectilignes. Elles sont vraisemblablement très anciennes au même titre que les failles situées en bordure de cet océan. Si le fond du Pacifique était vraiment animé du mouvement de rotation supposé, pourrait-on concevoir que ces fractures situées dans sa partie centrale n'aient pas été déformées. Cette observation nous paraît d'autant plus pertinente que nous avons cru pouvoir admettre une continuité au moins approximative entre les failles est-ouest du Pacifique et celles de même direction reconnues sur le fond de l'Atlantique où elles déplacent de façon notable la ride médiane de cet océan. Or, d'après les chiffres que nous avons cité, il s'agit de glissements de grande ampleur le long de ces grandes cassures, ce qui permet de croire que l'on se trouve, dans l'Atlantique, comme dans le Pacifique, en présence de traits structuraux très anciens.

Remarque. — D'après des mesures récentes de la vitesse de propagation des ondes sismiques entre la Provence et la Corse, la structure du fond de la mer Ligure peut être assimilée à une structure continentale, à cette réserve près que la discontinuité de MOHOROVICIC s'y trouverait à une profondeur beaucoup moindre ⁽¹⁾.

On peut en conclure que la région occupée par la Mésogée tout en étant de caractère épicontinental marque une tendance vers les conditions structurales des grands fonds océaniques : Si de telles conclusions avaient un caractère général tout le long de la Téthys, on pourrait en déduire que l'histoire de cette zone à plis récents a certaines attaches avec celle des grands bassins océaniques.

F. LA SÉDIMENTATION SUR LES FONDS OCÉANIQUES.

Le fond des Océans est recouvert sur une épaisseur très variable de sédiments de provenances diverses.

Les matériaux de nature détritique sont arrachés aux rivages par l'action des vagues, ou bien ils proviennent de l'intérieur des continents d'où ils sont transportés à la mer par les fleuves. D'autre part les dépôts organogènes résultent

⁽¹⁾ P. MURAOUR, X. CECIALDI, J. DUCROT et J.P. MARCHAND, *Sur la structure profonde entre la Provence et la Corse*, C. R. sommaire Séance Soc. Géol. France, séance du 6 décembre 1965, page 314.

de la construction de récifs tels ceux édifiés par les coraux, par les algues, etc., ou bien de l'accumulation de petites coquilles de nature calcaire (vase à globigerines par exemple) ou siliceux (vase à diatomées) ; enfin il y a encore l'accumulation d'infimes particules de nature argileuse telle l'argile rouge des abîmes.

Nous ne croyons pas devoir nous arrêter à l'examen de cette question ; nous renvoyons à cet effet, à tous les traités de Géologie. Le point qui est plus particulièrement de nature à nous intéresser est celui de l'âge de ces formations, partout où l'on a pu préciser la nature du substratum sur lequel elles reposent.

De toute façon, l'épaisseur maximale de ces dépôts se trouve en bordure du continent ; ils n'y sont guère affectés par des dislocations si ce n'est une légère augmentation de l'inclinaison des strates (1).

Il est bon de rappeler qu'il peut y avoir une différence notable entre deux bassins océaniques ou même entre deux parties d'un même bassin suivant qu'il y débouche de grands fleuves ou seulement des cours d'eau de minime importance.

Du point de vue de l'évolution générale de la croûte terrestre, l'âge des dépôts reconnus sur les fonds océaniques présente un grand intérêt.

Dans les profondeurs de l'Océan Pacifique, des dépôts fossilifères ont été observés en maints endroits, notamment là où le fond marin est exhaussé grâce à la présence de reliefs volcaniques, ou des guyots. Nous avons rappelé que, sur une longue distance dans une direction parallèle à l'équateur, on a signalé des dépôts fossilifères, coralliens, remontant au Crétacé.

Dans le même océan, des sondages entrepris entre 45° lat. Nord et 45° lat. Sud, et entre 151 degrés longitude est et 73 degrés longitude ouest ont fourni des échantillons de sédiments dont l'âge va de l'Éocène au Miocène et au Quaternaire. Il en sera question au chapitre de la paléoclimatologie dans la deuxième partie du rapport.

D'après un article récent de D. KRUMMENACHER et J. NOETZLIN (*C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 263, sér. D. n° 1, 4 juillet 1966, p. 20) le volcanisme en Polynésie française a commencé pour le moins au Jurassique moyen et a pris fin récemment.

Depuis le Jurassique moyen, Tahiti serait un centre éruptif actif. Si les plus anciens fossiles dragués sur les guyots sont d'âge crétacé moyen, le volcanisme conduit à reculer de manière appréciable la date de l'existence des grands fonds du Pacifique.

L'exploration de la partie sud-ouest de l'Océan Indien a fourni des indications intéressantes : Des échantillons provenant de sept sondages renferment des fossiles allant du Crétacé supérieur au Miocène moyen. Ils semblent en relation avec des rides du fond de l'océan (2).

(1) M. EWING et J. EWING, *Sediment distribution in the Oceans*, Programs 1964 Annual Meetings of the Geol. Soc. of America (Résumé).

(2) SAITO TSUNEMARA and CHARLES FRAY, *Cretaceous and Tertiary sediments from the South-Western Indian Ocean*, Program 1964. Annual Meetings of the geol. Soc. of America (Résumé).

En ce qui concerne le sud ouest de l'Océan Indien, on peut se demander s'il ne s'agit pas simplement du pro-

Il est à remarquer qu'ici comme dans le Pacifique, les sédiments les plus anciens connus dans les grandes profondeurs océaniques ne paraissent guère remonter au delà du Crétacé.

D'autre part, nous avons signalé déjà (page 70) que des sondages pratiqués dans l'Atlantique Nord ont ramené des échantillons allant du Pliocène au Crétacé inférieur. Nous avons mentionné spécialement aussi que au Nord Ouest des Bermudes un sondage a traversé des sédiments sur 1425 (?) mètres avant d'atteindre le soubassement basaltique. Les couches inférieures de cette série sédimentaire sont aussi à rapporter au Crétacé.

A l'heure présente, il paraît bien établi que les sédiments non métamorphiques couvrant en partie le fond du Pacifique, de l'Atlantique et de l'Océan Indien ne sont pas plus anciens que le Crétacé inférieur.

Cette observation pose une énigme. Faut-il, en effet, en déduire que les grands océans tels que nous les connaissons actuellement, ne remontent pas au delà de 150 ou 200 millions d'années ? Les données de la géologie ne s'accordent certainement pas avec une telle hypothèse, spécialement en ce qui concerne le Pacifique.

On ne conçoit pas qu'il ait pu en être ainsi même dans le concept de l'expansion de la Terre. Car semblable augmentation de volume aurait dû manifester son action depuis le début de l'évolution géologique du globe. D'autre part, dans la théorie de la permanence, au moins relative, des océans, que seraient devenus les sédiments déposés sur le fond de sima avant le Crétacé ?

Il est bon d'ajouter toutefois que bien rares sont les sondages qui ont pu atteindre le soubassement des dépôts sédimentaires à l'endroit des grands fonds océaniques. Lorsque ces sédiments recouvrent des reliefs d'origine volcanique comme c'est le cas en bien des endroits du Pacifique, ils précisent simplement l'âge de la fin de la montée éruptive sans préjuger en rien de l'ancienneté du fond sur lequel se sont édifiés les volcans.

En ce qui concerne le Pacifique, nous trouvons des indications précieuses à ce sujet dans l'ouvrage récent d'Arthur HOLMES auquel nous nous sommes déjà référés plus d'une fois ⁽¹⁾. Le savant britannique a émis l'hypothèse que le fond de cet océan se déplace vers ses bords dans toutes les directions ; entraînée sous les masses continentales, la couche basaltique se renouvelle ainsi constamment. La présence de nombreuses crêtes de nature volcanique, de guyots, comme l'activité éruptive aux îles Hawaï sont en faveur d'un apport continu de matériau basaltique ; on peut trouver là l'explication de ce renouvellement continu du fond océanique.

HOLMES écrit à ce sujet :

“ Nevertheless, the inference that the Pacific floor has been renewed within the last few hundred million years seems to be justified by the apparent deficiency

longement, sous l'Océan, des formations crétacées et cénozoïques connues en affleurement sur la côte africaine, de part et d'autre de Lonrenço-Marques, qui sont en discordance sur le Précambrien.

⁽¹⁾ A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, new edition, 1965. Voir p. 946.

of sediments on the deep-sea floor. The oceanic sediments have no more than one tenth of the thickness that would have been expected if the original floor of the Pacific had been a permanent feature of the earth's crust as has commonly been presumed. Moreover these oceanic sediments are no thicker than those that have accumulated on the floors of the Atlantic and Indian Oceans. Yet the latter are commonly regarded as having formed while the continents were separating and " drifting " into their present positions, i.e. during the 200 million years or so that have elapsed since the early Mesozoic. If the Pacific Ocean has indeed had a longer life than the other oceans of today, its floor must have been more or less continuously renewed as suggested above " .

Nous n'entendons pas prendre position à propos de la thèse défendue par HOLMES. Toutefois, pour le sujet qui nous occupe, une observation s'impose : Il est à remarquer, en effet, que les sédiments bien datés reconnus dans le Pacifique ne paraissent pas remonter au delà du Mésozoïque ; il en est de même dans l'Océan Indien et dans l'Atlantique. Pour ces derniers, HOLMES l'explique par le phénomène de la dérive continentale qui remonterait à cette époque. Cette explication ne pourrait cependant pas être acceptée pour le Pacifique. Si donc l'âge relativement récent des dépôts sédimentaires de cet océan doit être expliqué par le renouvellement du fond marin suivant le processus rappelé ci-dessus, pourquoi ne pas appliquer la même explication aux Océans Atlantique et Indien ?

G. LE DOMAINE DE LA TÉTHYS.

Édouard SUESS a donné le nom de Téthys à la grande dépression qui s'étendait, depuis le Cambrien jusqu'au Tertiaire, entre les massifs résistants de l'Eurasie au Nord et ceux de l'Afrique, de l'Arabie et de l'Inde au Sud. Il s'agit, en réalité, d'une large zone complexe à prédominance des conditions marines ; elle coïncide, pour une bonne part, avec les aires géosynclinales d'où sont nées les grandes chaînes montagneuses des bords de la Méditerranée, et celles du domaine himalayen qui en sont le prolongement.

Au-delà de l'Atlantique, on en trouve un équivalent approximatif dans les zones plissées récentes des Antilles et du Vénézuéla.

Cette longue zone à tendance de sédimentation marine séparait ainsi les territoires à tendance continentale de la Laurasia d'une part, de Gondwana d'autre part.

La Téthys apparaît ainsi comme un trait permanent de la surface du globe. Toutefois malgré le caractère marin de la plupart des sédiments qui s'y sont accumulés au cours des temps, la Téthys ne peut pas être mise en parallèle avec les bassins océaniques profonds situés à l'intérieur du talus continental. La région mésogéenne a, de tous temps, été une mer de type épicontinental, qui n'a rien à voir avec les grands fonds océaniques tels que nous les avons considérés dans

les pages précédentes. Il y a certes des exceptions locales, telle la mer Noire, qui ne changent en rien la règle générale qui vient d'être rappelée.

Il ne nous est pas possible d'exposer ici avec quelque détail l'évolution géologique de la Téthys ; nous renvoyons à ce sujet aux ouvrages généraux (1).

Les cartes paléogéographiques annexées à l'ouvrage de H. et G. TERMIER sont caractéristiques à cet égard ; si approximatives qu'elles puissent être par la force des choses, elles n'en montrent pas moins une tendance à la permanence des conditions marines à l'endroit de la Téthys.

La région antillaise par sa position entre les massifs anciens de l'Amérique du Nord et du Brésil-Guyanne, par ses déformations tectoniques récentes, se présente dans des conditions comparables à celles de la Téthys comprise entre les massifs anciens de l'Eurasie d'une part, de l'Afrique-Arabie-Inde d'autre part. A première vue, ces deux parties du monde, situées approximativement dans le prolongement l'une de l'autre paraissent avoir la même signification malgré une énorme différence dans leur étendue en longueur. Les tracés paléogéographiques de H. et G. TERMIER incitent cependant à une certaine prudence. Il semble que l'analogie ne soit réelle qu'à partir du Mésozoïque.

Il n'empêche que, dans ses grandes lignes, la zone mésogéenne apparaît comme un trait important dans l'évolution de la croûte terrestre, avec notamment la tendance à la permanence des conditions de sédimentation marine en opposition souvent avec celles reconnues dans les régions situées au nord et au sud.

A ce propos, nous aimons nous reporter à ce qu'a écrit le professeur BORDET dans son livre sur l'Himalaya (2). Nous croyons utile pour notre travail de rappeler les faits suivants tirés de cet ouvrage :

Sur un soubassement précambrien très métamorphique repose une série sédimentaire débutant au Cambrien. Cette série de couverture se poursuit sans interruption majeure au moins jusqu'au Crétacé. « Ceci est vérifié, écrit BORDET, pour la série du Tibet au Nord de la zone axiale, et pour les séries du Cachemire et du Kumaou au Sud de celle-ci.

« Plus à l'Est, la couverture devient métamorphique, mais il paraît tout à fait probable que la même règle s'applique encore... »

« L'épaisseur des formations sédimentaires de couverture, ajoute BORDET, est toujours considérable et se chiffre par milliers, voire dizaine de milliers de mètres. Ce caractère paraît lié aux conditions de sédimentation à la bordure nord du continent de Gondwana. Il est peu probable qu'il en soit autrement sinon localement et pour une partie seulement de l'échelle stratigraphique ; il y a donc fort peu de chance pour que l'on rencontre de manière générale des séries fortement condensées ».

(1) P. FOURMARIER, *Principes de géologie*, 3^e édition. Paris-Liège, 1950. Voir notamment pp. 872 à 960. H. et G. TERMIER, *Histoire géologique de la biosphère*, Paris, Masson et Cie, 1952.

(2) P. BORDET, *Recherches géologiques dans l'Himalaya du Népal, Région de Makalu*, Édité. Centre Nat. Rech. Scientif., Paris, 1961.

On peut dire que l'Himalaya, avec son arrière pays tibétain à sédimentation essentiellement marine pendant le Primaire, le Secondaire et le début du Tertiaire, représente véritablement le centre à sédimentation maximale de la Téthys. Dans la région méditerranéenne, des interruptions importantes se marquent déjà dans la continuité de la sédimentation, puisqu'on y connaît les plissements hercyniens, avec tout leur développement.

La région des Antilles mérite que nous nous y arrêtions aussi un instant, en cherchant à établir dans quelle mesure il convient d'y voir le prolongement naturel de la Méditerranée au-delà de l'Atlantique.

Nous nous reporterons principalement à ce qu'en dit Jacques BUTTERLIN dans le livre qu'il a consacré à cette partie du Monde ⁽¹⁾. Nous avons également consulté le bel ouvrage de H. et G. TERMIER sur l'histoire de la Biosphère qui contient une série de cartes paléogéographiques aux diverses époques de l'histoire de la terre.

Il semble résulter des données acquises actuellement sur la constitution géologique de cette partie du monde, que l'étendue occupée par la Mer des Antilles ou Mer Caraïbe fut occupée pendant la majeure partie des périodes géologiques, au moins depuis la fin du Paléozoïque, par un massif continental, la Terre Caraïbe, massif sur lequel se seraient modelées les déformations plus récentes reconnues dans les divers éléments de l'arc des Antilles.

Il paraît acquis que les déformations tectoniques se sont propagées d'ouest en est avec déplacement, dans le même sens, de l'activité volcanique si caractéristique de ce trait structural de la région caraïbe.

Nous ne pouvons pas entrer ici dans des détails à propos de la constitution de l'arc des Antilles. A première vue, il rappelle la disposition en ovale de diverses parties des chaînes méditerranéennes, avec notamment le massif effondré des Caraïbes à l'intérieur de la série des îles faites en ordre principal de terrains sédimentaires plissés.

« La sédimentation antillaise, fait remarquer BUTTERLIN, a été caractérisée à toutes les époques par la prédominance des *dépôts magmatiques de type andésitique pacifique* et des *dépôts sédimentaires de types calcaires organogènes*, et cela dans toutes les régions ».

Il convient de souligner la parenté entre les Antilles et les chaînes bordières du Pacifique, à tel point que cet arc insulaire peut être regardé comme une sorte d'intrusion du domaine pacifique dans le domaine atlantique. Nous montrerons plus loin que le même phénomène s'est produit à l'endroit des Antilles du Sud entre l'Amérique méridionale et l'Antarctique.

Si l'arc des Antilles a des relations étroites avec les chaînes bordières du Pacifique, on ne peut pas mettre en doute son étroite connexion paléogéographique avec la Méditerranée. Les affinités des faunes marines à diverses époques ont

⁽¹⁾ JACQUES BUTTERLIN, *La constitution géologique et la structure des Antilles*, Publ. du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1956.

⁽²⁾ H. et G. TERMIER, *Histoire géologique de la biosphère*, Masson et Cie, Paris, 1952.

été signalées par de nombreux auteurs au moins depuis le Mésozoïque. Cependant comme l'écrit BUTTERLIN ⁽¹⁾ :

« Mais les affinités de leurs faunes marines littorales n'impliquent pas obligatoirement que le géosynclinal antillais et celui de la Méditerranée soient les mêmes. On peut imaginer une migration le long des côtes bordant le bouclier des Laurentides et celui du continent de Gondwana, et en particulier le long de ce dernier, une fosse profonde océanique s'étendant sur la région centrale actuelle de l'Atlantique ».

Rappelons encore ici que dans les Bermudes et aux Açores le volcanisme est de nature simique, s'opposant ainsi au volcanisme sialique des Petites Antilles.

D'ailleurs, du point de vue tectonique, les descriptions dues à divers auteurs nous conduisent à penser qu'il y a des différences assez sensibles entre l'arc des Antilles et les Ovale Méditerranéens. Il y a lieu d'en tenir compte si l'on pense à rapprocher l'Eurafrique des continents américains suivant la théorie de la Dérive des Continents.

La note publiée en 1966 par le professeur SCHEINMANN, de Moscou, nous apporte une indication intéressante ⁽²⁾. D'après les observations faites dans le domaine atlantique par le professeur IVANOV de 1961 à 1963, le fond de cet océan suivant une large zone s'étendant entre le Sud de l'Espagne et la partie nord ouest de l'Afrique d'une part, et l'Amérique Centrale d'autre part n'a pas la même composition que le fond océanique s'étendant au nord et au sud de cette zone. Il faut sans doute y voir l'influence du passage du sillon mésogéen.

Nous terminerons cette vue d'ensemble d'une unité remarquable de la croûte terrestre en faisant observer qu'à chacune de ses extrémités, la Téthys, prise dans son sens le plus complet, se raccorde aux chaînes circumpacifiques. Aussi les plissements récents se présentent-ils, suivant une idée exprimée par HOLMES ⁽³⁾, comme deux anneaux gigantesques, subcontinus, l'un entourant les continents du Nord, c'est-à-dire l'Amérique du Nord et l'Eurasie dont l'ensemble constitue la Laurasia, l'autre entourant les masses continentales méridionales : l'Amérique du Sud, l'Afrique avec l'Arabie et l'Inde, l'Australie et l'Antarctique, c'est-à-dire les terres de Gondwana.

H. LES RIVAGES DES OCÉANS.

Avant de clore ce chapitre, nous croyons devoir nous arrêter un instant à la forme et à l'origine des rivages des océans.

Éd. SUSS fut sans doute le premier à attirer l'attention sur le contraste existant entre les côtes de type atlantique et celles de type pacifique. Ces dernières

⁽¹⁾ BUTTERLIN, p. 420.

⁽²⁾ V.M. SCHEINMANN, *Some more about mobility* (traduction du russe). *Geotectonica*, n° 2, mars-avril 1966.

⁽³⁾ A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, new edition, 1965. Thos. Nelson. London.

sont longitudinales, c'est-à-dire orientées par le plissement, qu'il s'agisse de plis en bordure d'un continent ou de guirlandes insulaires. Les côtes atlantiques, par contre, sont, dans l'opinion de SUESS, transversales, c'est-à-dire qu'elles coupent les plis normalement ou obliquement à leur direction ; elles sont marquées par des lignes de fracture suivant lesquelles s'est produit un affaissement du fond océanique.

L'opposition entre côtes atlantiques et côtes pacifiques n'est certes pas douteuse. Elle est peut-être moins absolue que SUESS le supposait.

La définition des côtes pacifiques telle qu'elle vient d'être rappelée peut être acceptée à de très rares exceptions près. La cause du parallélisme entre les lignes de rivage et l'orientation des plis tient évidemment à ce que l'Océan Pacifique est bordé de plis récents qui ont soulevé les marges continentales et, par le fait même, abaissé dans une certaine mesure le fond de l'océan voisin. C'est ainsi que l'on peut voir à Ventura (Californie), tout près de la côte du Pacifique, des formations quaternaires redressées, inclinant vers le Pacifique, alors que, vers l'intérieur du continent, affleurent successivement le Tertiaire et le Crétacé plissés (1).

C'est là évidemment un cas un peu spécial où l'on peut, en quelque sorte saisir sur le vif la relation entre le soulèvement d'un orogène et la disposition du rivage à son contact immédiat.

Il ne faut cependant pas perdre de vue l'influence de l'érosion provenant à la fois de l'attaque du rivage par les vagues de la mer et de l'action des agents atmosphériques vers l'intérieur du continent. Au bout d'un temps relativement court la côte peut avoir reculé et être ainsi constituée par des roches plus anciennes formant le cœur des plis voire le versant d'un anticlinorium tourné vers le continent. Il en résulte que la côte peut alors être orientée plus ou moins obliquement à la direction du plissement ; elle ne correspond plus à celle résultant du soulèvement de l'orogène, bien qu'elle puisse demeurer, dans ses grandes lignes, parallèle à la direction générale du plissement. Tout dépend du temps qui s'est écoulé depuis la surrection de la zone plissée en bordure de l'Océan.

Pour ce qui concerne le Pacifique, l'influence des plissements récents sur l'orientation de ses côtes est encore bien visible, malgré les exceptions locales résultant des actions d'érosion auxquelles il vient d'être fait appel.

Essayons maintenant d'appliquer les mêmes principes à l'Océan Atlantique et passons rapidement en revue la disposition relevée le long de ses rivages.

En bordure des Appalaches, la côte orientale de l'Amérique du Nord est en contact presque immédiat avec l'arrière pays effondré de cette chaîne ; il en est ainsi depuis le début du Mésozoïque puisque le Trias, dont les couches inclinent doucement vers l'océan, repose sur le Précambrien métamorphique de l'axe anticlinorial appalachien.

(1) Voir à ce sujet la coupe insérée dans la note : P. FOURMARIER, *Observations sur le développement de la schistosité dans les séries plissées*, Bull. Cl. Sc. Acad. royale Belg., 5^e sér., t. XVIII, 1932, pp. 1048-1053.

L'affaissement de l'arrière pays de cette chaîne a, sans aucun doute, provoqué ou tout au moins facilité la transgression du Trias de l'est vers l'ouest. Le parallélisme existe ici comme dans le cas de l'Océan Pacifique ; il s'est maintenu malgré l'érosion qui s'est faite jusqu'au moment de l'arrivée de la mer du Trias.

La même réflexion s'impose pour la Scandinavie. Là aussi, en bordure du continent, l'arrière pays de la chaîne calédonienne s'est affaissé. Il n'empêche que la situation est comparable à celle de la région appalachienne. En effet, dans les îles Lofoten, l'érosion a laissé subsister des témoins de Jurassique et de Crétacé, indices de l'existence d'une transgression marine sur l'arrière-pays effondré de la chaîne scandinave.

On peut croire que cette transgression s'est faite de l'ouest vers l'est ; en effet, si sur le soubassement antécambrien des îles Lofoten repose du Jurassique, c'est le Trias qui souligne la transgression mésozoïque au Spitzberg et à l'île des Ours.

Les côtes de Scandinavie sont ainsi la réplique des côtes nord américaines, disposées symétriquement par rapport à l'axe de l'Atlantique. Cette constatation conduit forcément à admettre l'existence d'un bassin océanique entre l'Europe et l'Amérique, remontant pour le moins au début du Mésozoïque.

Une disposition comparable à celle de la Scandinavie est bien connue le long du rivage ouest de l'Afrique, à hauteur de l'embouchure du fleuve Congo. On se trouve là en présence d'une chaîne très ancienne dont l'arrière pays s'est affaissé à l'emplacement de l'Océan Atlantique. A la fin du Jurassique ou tout au début du Crétacé ⁽¹⁾ la mer s'est avancée en transgression et l'on en retrouve les sédiments reposant en discordance de stratification sur le soubassement précambrien, sédiments qui sont restés dans leur allure subhorizontale originelle. Ces dépôts sont disposés en une bande relativement étroite parallèle au rivage, parallèle aussi à l'orientation des plis du substratum ancien.

On peut faire des observations analogues en bordure de la côte du Sénégal et de celle de l'Amérique méridionale.

Les faits qui viennent d'être rapportés sommairement paraissent bien établir que la différence entre les côtes atlantiques et les côtes pacifiques n'est pas aussi absolue qu'Édouard SUESS le supposait.

L'opposition apparente tient en grande partie à ce que les chaînes plissées en bordure de l'Atlantique sont plus anciennes que celles longeant le Pacifique ; avant que des dépôts non tectonisés soient venus les recouvrir en allure transgressive, elles ont été plus profondément érodées que les côtes pacifiques ; si l'on préfère, on peut dire que l'érosion antérieure au Mésozoïque a pénétré plus profondément dans le bâti continental plissé qu'elle ne l'a fait tout le long du Pacifique bordé de chaînes jeunes sur lesquelles une couverture discordante ne s'est pas encore avancée de façon systématique.

On peut se demander si la différence entre les deux domaines, atlantique et pacifique, n'est pas due en principe à cette cause.

(1) L. CAHEN, *Géologie du Congo belge*. Imprimerie Vaillant-Carmanne, Liège, 1954. Voir pages 389 et suivantes.

C'est ce qui pourrait expliquer que toutes les côtes de l'Océan Atlantique ne répondent pas strictement à la même règle. Il suffit, en effet, de penser à l'allure qu'elles ont dans les Iles Britanniques et en France, comme parfois aussi en bordure de l'arc des Antilles.

Il y a cependant une cause supplémentaire à prendre en considération : l'Atlantique est traversé par la dépression permanente de la Téthys qui vient troubler quelque peu ses conditions normales.

Les côtes de l'Océan Indien montrent des analogies marquées avec celles de l'Atlantique. Les unes comme la côte orientale de Madagascar sont soulignées par la présence de grandes fractures radiales ; il en est probablement ainsi pour l'Inde péninsulaire. On sait aussi que, le long de ces rivages, des transgressions relativement récentes ont provoqué la formation de bandes étroites de terrains sédimentaires ; ailleurs, comme en bordure de l'Australie, avec ses formes massives, la situation est quelque peu différente ; on peut y voir néanmoins une parenté avec l'Atlantique.

Ne pourrait-on pas trouver dans les faits rapportés ci-avant des arguments pour admettre que les trois Océans Pacifique, Atlantique et Indien ont évolué de manière très semblable et qu'il peut paraître exagéré de les considérer comme étant d'âge très différent ?

Il importe d'ajouter ici quelques indications à propos des côtes de l'Antarctique qui touche à la fois au Pacifique, à l'Atlantique et à l'Océan Indien.

Dans sa partie orientale, la plus vaste, les côtes sont, par leur allure générale apparentées à celles de l'Afrique, et de l'Australie. Au contraire, celles de l'Antarctique occidentale sont exactement la continuation des côtes de l'Amérique du Sud auxquelles elles se rattachent par l'arc des Antilles du Sud.

Nous ne parlerons pas ici de la nature des côtes à l'intérieur de la zone mésogéenne, car elles ne présentent pas le même intérêt pour aborder la solution du problème qui nous occupe. Disons simplement qu'on peut y distinguer des côtes du type pacifique indiscutable et d'autres qui peuvent être rattachées au type atlantique tel que le concevait Éd. SUESS.

CHAPITRE V

L'ARRANGEMENT SYSTÉMATIQUE DES CONTINENTS ET DES OCÉANS

Au début de ce travail, nous avons rappelé l'opposition existant entre l'hémisphère continental et l'hémisphère océanique. Bien qu'il ne faille voir là qu'une approximation assez grossière comme l'ont souligné divers auteurs, cette disposition n'en est pas moins remarquable ; nous avons rappelé (page 25) l'une des explications qui en a été donnée.

En présence de cette asymétrie, on serait tenté de croire qu'il n'y eut jamais d'arrangement systématique des traits les plus saillants de la surface du Globe et que l'évolution des masses continentales s'est faite en toute indépendance les unes par rapport aux autres. Certains faits d'observation nous incitent par contre à penser qu'il n'en fut rien ; il semble, en effet, y avoir une disposition symétrique des unités structurales de la croûte par rapport à certains axes ou cercles de symétrie ; en outre, l'attention du géographe comme celle du géologue ne manque pas d'être frappée par la forme en S si remarquable des axes des masses continentales et des fonds des grands océans.

A. LA SYMÉTRIE DANS L'ORDONNANCE DES STRUCTURES.

Des travaux déjà anciens ont eu pour objet d'établir que les traits les plus marquants de la structure géologique du globe s'ordonnent suivant certains axes qui sont plus exactement des cercles de symétrie. Nous rappellerons ici très brièvement les résultats de ces études ⁽¹⁾.

Prenons comme point de départ l'axe de l'Océan Pacifique : Partant du détroit de Behring, il passe à proximité des îles Hawaï et à l'Ouest de l'île de Pâques pour atteindre le pôle Sud au cœur de l'Antarctide. De l'autre côté du détroit de Behring, il peut être prolongé, traversant le Bassin Canadien et passant à proximité du pôle Nord, il s'en va buter contre le continent eurasiatique. L'axe arctique, au moins jusque la crête Lomonossov, est bien le prolongement de l'axe du Pacifique.

⁽¹⁾ P. FOURMARIER, *Principe de Géologie*, 3^e édition, Paris-Liège, 1950, pp. 989 et suiv.

P. FOURMARIER, *Symétrie et asymétrie dans la répartition des grandes unités structurales de la Terre*, Ann. Soc. Géol. Belgique, t. LXX, Bull. pp. 19-24, 1946.

Il ne s'agit pas d'une simple conception géographique. Les géologues savent que les grandes unités structurales du nord de l'Eurasie ont leurs correspondants, symétriquement disposés, en Amérique septentrionale. De même les unités de l'est de l'Asie et de l'Océanie trouvent leurs équivalents dans celles des deux Amériques. Il en est ainsi jusque dans le détail : de part et d'autre de cette ligne axiale se correspondent non seulement les grandes unités fondamentales, telles les boucliers, mais aussi des massifs précambriens de faible étendue ; le massif tabulaire de l'Arizona trouve son symétrique dans le massif sinien s'étendant dans le nord-est de la Chine et une partie de la Corée. D'un côté comme de l'autre, les terrains depuis le Cambrien sont restés horizontaux alors qu'en bordure s'étirent les chaînes plissées d'âge paléozoïque d'un côté comme de l'autre du Pacifique.

Il est même des points singuliers qui viennent confirmer cet arrangement symétrique ; la disposition particulière des chaînes andines par rapport aux chaînes récentes de l'Amérique Centrale se répète exactement de l'autre côté de l'océan entre les chaînes Nouvelle Zélande — Nouvelle Calédonie et les chaînes complexes de l'Insulinde ; ces deux dispositions singulières sont symétriquement disposées par rapport à l'axe du Pacifique (1).

Il en est ainsi jusqu'aux points singuliers dans le comportement des tremblements de terre sur la bordure du Pacifique qui se répètent symétriquement par rapport à l'axe, comme il ressort de la carte dressée par G.J. LENSEN (2) bien que l'auteur semble être d'un avis opposé.

Ici une remarque s'impose : D'après la forme générale des rivages de l'Océan Pacifique, on serait peut-être porté à croire que tout grand cercle passant par son centre pourrait être un axe de symétrie. Cependant d'après les faits géologiques qui viennent d'être rappelés, un seul axe de symétrie est possible, qui correspond au tracé proposé.

La similitude dans l'évolution de l'Océan Arctique d'une part, de l'Océan Pacifique d'autre part est marquée non seulement par la disposition des boucliers canadien et sibérien de part et d'autre du bassin canadien, compris entre le détroit de Behring et la crête Lomonosov, mais aussi par le fait que les terres les plus proches du Centre de ce bassin sont bordées de plis d'âge crétacé ou tertiaire, que l'on peut rattacher aux chaînes plissées de la bordure du Pacifique nord (3).

La disposition symétrique paraît tout aussi évidente dans la partie méridionale de l'Océan Pacifique. Elle se voit aisément sur toute carte des régions polaires antarctiques ; on peut s'en rendre compte par l'examen de la figure 4 du travail de P. FOURMARIER où il est fait une comparaison entre la structure des régions arctiques et celle de l'Antarctique.

(1) P. FOURMARIER, *La règle de symétrie dans la structure de la croûte superficielle de la Terre*, Bull. Ciel et Terre de la Soc. belge d'Astronomie, 58^e année, n^o 11, 1942.

(2) G.J. LENSEN, Publ. Domin. Observatory Ottawa, t. XXIV, p. 389, 1961.

(3) On consultera à ce sujet : *Geology of the Arctic*, vol. I, University of Toronto Press, 1960.

Voir également : P. FOURMARIER, *La géologie de l'Arctique d'après quelques publications récentes. Comparaison avec l'Antarctique*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belgique, 5^e sér., t. XLIX, n^o 10, 1963.

Il est utile de faire remarquer dès à présent que l'axe de symétrie Pacifique-Arctique ne coïncide pas avec un méridien bien qu'il joigne les deux pôles. Il est incurvé en forme d'S ; nous reviendrons sur cette particularité. Il est à noter que cette allure est plus accusée si l'on tient compte des caractères géologiques plutôt que de la simple configuration des rivages tels qu'ils sont tracés sur un globe terrestre ou sur une planisphère. Il faut en effet, tenir compte des données recueillies sur la nature des îles et de certains fonds sous-marins, dans le sud-ouest de cet océan.

Il est à remarquer aussi que l'axe du Pacifique suit de très près la crête médiane de cet océan, tout au moins dans sa partie méridionale.

L'axe de symétrie du Pacifique intéresse essentiellement l'hémisphère océanique. Une même disposition s'observe dans l'hémisphère continental où l'on peut reconnaître aussi la présence d'un axe de symétrie, lequel n'est, d'ailleurs, que le prolongement de celui du Pacifique dont il vient d'être question.

Venant de l'Antarctique, il suit l'axe du massif ancien de l'Afrique, passant entre la rangée des dépressions Karroo-Kalahari-Congo d'une part et le canal du Mozambique bordé de dépôts postpaléozoïques, d'autre part ; il coupe l'arc alpin, atteint le bouclier baltique pour se diriger vers le pôle nord et se raccorder ainsi à l'axe arctico-pacifique à la traversée de la crête Lomonosov.

Les grandes unités géologiques sont réparties symétriquement par rapport à cet axe eur-africain, dont le tracé dessine une allure en S comme celui du Pacifique.

Sans vouloir nous étendre longuement sur cette question, exposée par le détail dans plusieurs publications, nous ferons seulement remarquer que, de part et d'autre de l'axe eur-africain, les boucliers canadien et sibérien sont symétriquement disposés ; il en est de même des chaînes plissées de divers âges qui les encadrent ⁽¹⁾, malgré la différence notable d'étendue apparente du bouclier canadien et de sa plate-forme comparé à la plate-forme sibérienne avec le petit massif d'Anabar, et aussi de la largeur très inégale des chaînes hercyniennes d'un côté et de l'autre de l'axe.

D'autre part, le massif précambrien du Brésil et des Guyannes est le symétrique du massif australien par rapport à cet axe, comme il l'est forcément par rapport à l'axe du Pacifique.

Il est remarquable aussi de constater que les grandes plaines sibériennes s'étendant au pied de l'Oural, plaines où dominent les sédiments post-paléozoïques épais de près de 4000 mètres, d'après BELOUSSOF (10.000 mètres d'après d'autres auteurs) dans la partie nord de cette grande plaine, pour diminuer progressivement de puissance vers le Sud sont disposés en couches horizontales, dans une dépression entre failles radiales ; elles sont exactement symétriques de l'Atlantique nord.

⁽¹⁾ Cette disposition apparaît clairement sur la carte jointe à la note : P. FOURMARIER, *La géologie de l'Arctique d'après quelques publications récentes*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belg., 5^e sér., t. XLIX, n° 10, 1963.

A ce propos, il est bon d'ajouter un détail : dans l'Atlantique, suivant J.P. ROTHÉ la zone séismique méditerranéenne s'interrompt à l'ouest de la crête médiane, sans rejoindre la zone des Antilles dont la signification géologique paraît cependant être la même à première vue tout au moins. Lorsqu'on examine une carte de la répartition des tremblements de terre, on est frappé de voir, dans les grandes chaînes récentes eur-asiatiques, une zone de moindre séismicité passant par le golfe d'Oman et un peu à l'est de la Caspienne ; cette zone est disposée presque symétriquement par rapport à celle passant à l'est des Antilles. Cette analogie est frappante.

Un autre axe de symétrie tout aussi remarquable est celui correspondant aux Antilles, à la Méditerranée et aux chaînes de l'Asie Centrale ; c'est la zone de la Téthys (Mésogée), se soudant de part et d'autre à la ceinture de plis récents entourant l'Océan Pacifique. Au nord s'étendent les boucliers canadien, baltique et sibérien avec les zones plissées plus jeunes qui les bordent. Au sud, symétriquement disposés, se trouvent les môles brésilien, africain et australien.

Fait important à rappeler une fois encore : Au cours de l'histoire géologique de la Terre, la zone mésogéenne a toujours été marquée par sa grande mobilité ; elle se distingue ainsi des massifs stables qui l'encadrent au nord et au sud. Par ses plissements récents elle s'apparente, au contraire, comme nous l'avons déjà fait observer (page 96) à la ceinture du Pacifique. Elle est caractérisée aussi par ses dépôts de mer épicontinentale édifiés tout au long de son histoire, depuis le début du Paléozoïque jusqu'au Cénozoïque.

La symétrie dans l'architecture de l'écorce terrestre dont nous venons de rappeler les traits essentiels n'est certes pas parfaite. Elle n'en est pas moins un fait dont il convient de tenir compte même si nous en ignorons la raison. Elle semble, en tous cas, venir à l'appui de l'opinion que les masses continentales ne sont pas distribuées au hasard à la surface du globe.

Nous savons que les chaînes plissées récentes sont limitées à la ceinture du Pacifique et à la Mésogée ; elles coïncident ainsi avec la bordure de l'hémisphère continental complétée par une ceinture méditerranéenne. Cette répartition des chaînes récentes cadre avec la notion des axes de symétrie, confirmant l'idée que nous venons de rappeler encore : la disposition réciproque des continents actuels n'est pas l'effet du hasard, mais l'aboutissement de phénomènes, toujours les mêmes, agissant durant toute l'histoire de la Planète.

Nous pourrions encore ajouter que la symétrie si remarquable des vieux massifs précambriens avec leurs plate-formes par rapport à certains axes, comme la distribution des plissements récents, s'accorde parfaitement avec la conception de B.B. BROCK suivant laquelle le môle africain est entouré par les massifs centraux des autres continents régulièrement disposés suivant une étoile à six branches ⁽¹⁾.

(1) B.B. BROCK, *Aspects of Form and the fragmentation of the crust of a Sphere*, Proc. Geol. Soc. of South Africa, vol. LXI, 1958.

Nous nous trouvons ici devant la nécessité d'envisager une objection à la règle de symétrie qui a été présentée par von BUBNOFF (1). Ce regretté savant admettait volontiers une disposition symétrique vis-à-vis des axes méridiens mais, conformément aux idées de KOSSMAT, il se ralliait plus volontiers à la notion d'*Asymétrie équatoriale*. A l'appui, il rappelle que le pôle nord est situé au centre d'un océan, tandis qu'à l'endroit du pôle sud s'étend un vaste continent ; d'un autre côté les boucliers de l'hémisphère nord sont séparés alors que ceux de l'hémisphère sud font partie d'une vaste étendue continentale, l'ancien continent de Gondwana.

Certes, ces objections sont d'importance ; il importe donc de revoir le problème d'une éventuelle symétrie mésogéenne.

Entre les deux Amériques, les Antilles dessinent une courbe en ovale dont le grand axe est d'orientation sensiblement ouest-est ; il s'agit d'une chaîne plissée d'âge tertiaire, qui, vers le nord-ouest, se raccorde par le Yucatan et le Mexique à l'orogène de la côte du Pacifique ; de l'autre côté, elle se prolonge par le Vénézuéla dans les plissements récents du Pérou et des Andes. La chaîne antillaise est jalonnée de volcans comme toute la zone à plis récents formant la bordure du Pacifique ; elle est aussi le siège de tremblements de terre. On a dit qu'elle est un prolongement vers l'est de la chaîne bordière du Pacifique s'infiltrant entre les deux Amériques.

Cette disposition particulière des Antilles se trouve précisément là où l'Amérique du Nord se terminant en pointe vers le sud, est voisine de l'Amérique Méridionale de forme massive dans sa partie nord.

Reportons-nous maintenant à l'extrémité sud de ce continent. Les chaînes andines s'infléchissent vers l'est et se continuent par une rangée d'îles, les Antilles du Sud, dessinant une courbe (2) comparable en tous points à celle qui entoure la mer des Antilles, pour venir longer la bordure ouest du massif ancien de l'Antarctique et y former la zone plissée récente située à l'ouest des mers de Weddell et de Ross (Antarctique occidentale). De toute évidence il s'agit là du prolongement des plissements bordant à l'ouest l'Amérique méridionale. Comme l'écrit WARREN T. HAMILTON (3), l'Antarctique occidentale fait partie de la Ceinture circumpacifique d'orogénèse mésozoïque et cénozoïque.

On notera que les chaînes récentes de l'Antarctique occidentale sont marquées par la présence de volcans et de foyers séismiques tout comme celles de l'Amérique méridionale et l'arc des Antilles du Sud. Au-delà de la mer de Ross l'arc volcanique et séismique pourrait se prolonger sous l'Océan en direction de l'Australie. C'est pourquoi il est permis d'admettre avec quelque vraisemblance que la zone plissée de l'Antarctique de l'Ouest trouve son prolongement dans les chaînes

(1) S. VON BUBNOFF, *Fundamentals of Geology*. Oliver and Boyd, London, 1965.

(2) Le diagramme physiographique dressé par Bruce C. Heezen et Marie Tharp est extrêmement parlant, car il permet de voir clairement le relief de l'arc même là où il disparaît sous l'océan. (Public. Geol. Soc. of America).

(3) W.T. HAMILTON, *Antarctic Tectonics and continental Drift in Polar Wandering and Continental Drift*, edited by Arthur C. Munyan, Soc. of paleontol. and mineral. Special public. n° 10, Tulsa, Oklahoma, 1963.

de la Nouvelle Zélande dont les plis sont sensiblement de même âge et disposés de manière analogue par rapport au massif australien.

Il est à noter que le raccord des plis de l'Antarctique occidentale avec ceux de la Nouvelle Zélande se fait suivant un arc comparable à celui des Antilles du Sud, bien qu'il soit moins accentué. A partir de la Nouvelle Zélande, les plis s'incurvent à nouveau pour contourner l'Australie, comme l'arc des Antilles du Sud s'incurve à partir de la Terre de Feu pour épouser la forme du Continent sud-américain. Il y a là une disposition symétrique remarquable par rapport à l'axe du Pacifique prolongé par l'axe antarctico-africo-européen.

On objectera peut-être qu'il est inadmissible de raccorder sous les eaux de l'océan les plis récents de la Nouvelle Zélande aux plis de même âge de l'Antarctique Occidentale : la première chaîne est séparée de l'Australie par une large étendue marine ; la seconde joint directement les terrains plus anciens de l'Antarctique orientale.

Il est facile de répondre à cette objection car un tel raccord est conforme à une règle générale de la tectonique circumpacifique. On sait, en effet, que tout le long des continents asiatique et australien, c'est-à-dire de la bordure occidentale du Grand Océan, les chaînes plissées les plus récentes sont les guirlandes d'îles séparées du massif continental par une large étendue d'eau. De l'autre côté, à la bordure orientale de cet océan, par contre, les chaînes récentes font directement partie du continent lui-même dont elles soulignent les rivages. Mais elles sont bordées du côté de l'est par des dépressions qui les séparent des boucliers anciens (dépression de Laramie, dépression entre les Andes et le massif ancien du Brésil) dépressions qui, du point de vue évolution générale, correspondent approximativement aux étendues marines situées entre les arcs insulaires et les côtes de l'Asie et de l'Australie de l'autre côté de l'océan.

Celui-ci est fermé au Sud par le continent antarctique ; les plis récents qui l'entourent du côté du Pacifique doivent forcément montrer le passage du type américain au type australo-asiatique.

On pourrait montrer que les plissements jeunes de la Téthys se raccordent aux plis de la bordure du Pacifique de façon analogue à celle que nous venons d'esquisser pour la chaîne récente de l'Antarctique.

Cette longue zone orogénique de la Téthys se rattache aisément en Amérique Centrale aux chaînes circumpacifiques. A son extrémité orientale, la situation apparaît plus complexe. Les plis himalayens vont toucher ceux de Birmanie, lesquels avec les chaînes de Bornéo et des Philippines entourent un massif relativement stable, centré sur l'Indochine ⁽¹⁾, dessinant ainsi un large ovale qui n'est pas sans analogie avec la dépression de la mer des Antilles. La comparaison d'un côté à l'autre du Pacifique est certainement très osée. Cependant, il convient de noter que les arcs montagneux des Philippines, de Birmanie, des îles

(1) Voir notamment : J. FROMAGET, *L'Indochine française. Sa structure géologique, ses roches, ses mines et leurs relations possibles avec la Tectonique*. Imprimerie d'Extrême-Orient. Hanoï, 1941.

de la Sonde sont caractérisées par la présence de volcans ; alors qu'il ne semble pas exister d'appareils éruptifs dans l'île de Bornéo qu'ils entourent et dans l'Himalaya. De même en Amérique Centrale, l'arc des Antilles est jalonné de volcans, comme il en existe tout le long de la côte du Pacifique entre l'Amérique du Sud et la Californie. La symétrie est remarquable à cet égard, tout approximative qu'elle soit.

On voit par cet exposé que la notion de symétrie par rapport à un axe disposé suivant un parallèle n'est pas aussi simple qu'il apparaissait dans les premières études publiées sur cette question. Nous ne croyons pas cependant qu'il faille l'abandonner.

Il est à remarquer, en effet, que la zone mésogéenne prise dans son ensemble ne coïncide pas avec l'équateur ; en Eurasie notamment, elle se trouve à plus de 30 degrés de latitude nord ; dans les Antilles elle est encore à près de 15 degrés de latitude nord. Dans ces conditions, on ne doit pas s'étonner s'il y a une certaine dissemblance entre les deux parties de la croûte terrestre qu'elle sépare.

On peut, d'autre part, faire une hypothèse complémentaire : Du fait de ce développement plus grand de la surface du globe au Sud de la Mésogée, l'arrangement des masses continentales a pu se reproduire symétriquement par rapport à une zone de même signification que la Mésogée, c'est-à-dire suivant une zone allant des Antilles du Sud à la Nouvelle Zélande, séparant le massif ancien de l'Antarctique des massifs anciens de l'Amérique du Sud, de l'Afrique et de l'Australie.

Cette dualité de zones de type mésogéen permettrait d'expliquer l'opposition si frappante entre les deux régions polaires : Arctique à caractère océanique, Antarctique de nature essentiellement continentale.

Nous ne croyons pas pouvoir nous avancer davantage dans ce domaine de l'hypothèse. Il y a néanmoins là un ensemble de faits dont il y a lieu de tenir compte si l'on veut tenter de comprendre l'évolution de la croûte terrestre au cours des âges.

B. LA FORME EN S DES AXES DES OCÉANS ET DES CONTINENTS.

Il est un caractère de la structure de la croûte terrestre qui mérite quelque attention au même titre que la disposition symétrique des masses ; c'est la forme en S si caractéristique des axes des Océans et des Continents.

L'attention a déjà été attirée sur cette particularité à propos du tracé des axes de l'Océan Pacifique, d'une part, du continent eurafricain d'autre part.

Cette disposition est surtout frappante si l'on tient compte des données de la géologie et notamment de celles fournies par les îles disséminées à l'est et au nord-est du continent australien. L'axe du fond de nature basique du Grand Océan présente cette courbure de façon plus accusée encore que son axe géographique.

Cette forme en S, orientée de même manière, est aussi celle de l'axe des deux Amériques si l'on joint les zones centrales des môles canadien et brésilien en tenant compte de l'allure des plate-formes et des chaînes plissées. L'axe de l'Océan Atlantique, dont le passage est souligné par une crête sous-marine, a la même allure et suit fidèlement la forme de l'axe des deux Amériques (1).

La même réflexion s'impose pour l'axe de l'Eurafrique joignant le massif ancien de la Baltique et le grand massif africain-indien ; elle s'applique aussi à une ligne reliant le môle sibérien et sa plate-forme au bouclier de l'Australie.

Une telle disposition ne peut être l'effet du hasard ; elle trouve sa raison d'être dans l'évolution de la Terre probablement depuis ses origines ; il est à remarquer que ces courbes en S joignent approximativement les deux pôles ; la partie moyenne des courbes passe à peu près par la Téthys qui fut de tous temps une zone faible de l'écorce terrestre ; de telles coïncidences ne peuvent être fortuites.

On notera que, de ce fait, la Téthys est toujours sensiblement perpendiculaire aux axes en forme d'S des continents et des océans. On y trouvera sans doute la preuve d'une contemporanéité entre la genèse de la Mésogée et l'origine de la déformation des axes des bassins océaniques.

Le géologue n'est pas armé pour en trouver la cause profonde ; il doit céder le pas au géophysicien et à l'astronome. Rappelons après R.A. DALY, la conception de JARDETZSKY (2).

D'après ce savant, dans l'état initial fluide de la planète, ou mieux tout au début de la solidification de la croûte, les corps solides flottant sur le magma étaient animés d'une vitesse de translation allant en croissant des pôles à l'équateur. Les corps les plus volumineux absorbent progressivement les autres à cause de leur vitesse plus grande ; toute la masse sialique finit ainsi par être rassemblée en un continent unique. Cette thèse de JARDETZSKY n'est pas en opposition avec le principe de VON ZEIPPEL cité antérieurement.

Ce travail de JARDETZSKY nous intéresse parce que l'on peut voir dans les vitesses différentielles la possibilité d'une explication de la forme en S des grands axes de part et d'autre desquels se répartissent les unités structurales de la croûte terrestre.

Il faut faire remarquer, en effet, que les aires centrales des môles brésilien, africain et australien sont plus proches de l'équateur que leurs homologues de l'hémisphère nord. Ce fait n'est-il pas la conséquence de ces vitesses différentielles dans la masse encore fluide ou au premier stade de solidification des matériaux sialiques de la croûte ? N'est-ce pas en relation avec la Mésogée qui se trouve entièrement au nord de l'équateur ?

De telles vitesses différentielles pourraient expliquer que les premiers amas de sial solidifié se sont déplacés les uns par rapport aux autres ; les plus rapprochés de

(1) On considérera à ce sujet les cartes dressées par R.W. Menard. Voir notamment son article intitulé : *Development of Median Elevations in Ocean Basins*, Bull. Geol. Soc., America, vol. 69, n° 9, sept. 1958, p. 1179.

(2) W.S. JARDETZSKY, *On the dynamics of the Earth's crust*, Bull. Soc. Amis des Sciences de Poznan. Liv. IX, B ; pp. 3-23, 1948.

l'équateur se mouvant plus vite, tandis que leurs symétriques restaient en arrière. L'axe joignant deux de ces blocs ne pouvait être un méridien ; il devait forcément prendre une courbure qui répond à ce que l'on observe dans la structure actuelle de la croûte terrestre ⁽¹⁾.

Si cette conception a quelque apparence de vérité, les déformations dues aux différences de vitesse dans la couche toute superficielle du globe n'ont pu se produire que dans un état encore très primitif de la Terre, au plus tard alors que commençaient à s'individualiser les blocs de sial relativement très mobiles encore sur leur substratum, visqueux. On peut y voir un argument à l'appui de la thèse que la répartition générale des concentrations du sial remonte très loin dans l'histoire du globe, que l'emplacement des continents et leur agencement réciproque sont restés sensiblement identiques depuis une période antérieure au début de l'ère géologique.

Après cet exposé, nous croyons utile de nous référer à l'article publié récemment par DEARNLEY à propos de la dérive des continents ⁽²⁾. Cet auteur accepte qu'à une époque très ancienne, et jusqu'au Mésozoïque, les continents étaient bien plus rapprochés qu'ils ne le sont aujourd'hui. Sa reconstitution de la structure de la croûte terrestre rappelle la thèse de WEGENER en ce sens que les deux Amériques sont pratiquement en contact avec l'Eurafrique.

Sur les reconstitutions ainsi établies, il a tracé l'allure des plissements depuis le Précambrien. Il remarque que leur direction est systématiquement ordonnée en ce sens qu'ils convergent vers les pôles en même temps qu'ils dessinent une courbe en S très remarquable à hauteur du 30^{me} parallèle nord.

On peut voir dans ce tracé une analogie avec la forme en S dont nous avons fait mention ci-avant. Il suffit d'ailleurs de reporter sur une sphère actuelle les tracés de DEARNLEY pour noter cette même convergence polaire et cette même inflexion. On peut penser qu'il s'agit, en l'occurrence d'un trait très ancien et permanent de la structure de la croûte terrestre.

Les faits brièvement exposés permettent de croire que la distribution actuelle n'est pas due au hasard, mais qu'elle est la conséquence d'une cause profonde qui a agi pendant toute la durée des temps géologiques.

La même réflexion s'impose si l'on veut bien se reporter à l'exposé sommaire de la thèse de B.B. BROCK (voir p. 103) sur la situation de l'Afrique par rapport aux continents qui l'entourent. Dans cette conception, nous trouvons aussi l'idée d'un arrangement systématique des masses continentales par rapport à la plus massive d'entre elles, qui est en même temps celle dont l'évolution s'est figée depuis le plus longtemps, à part ses plissements de bordure et son réseau de fractures radiales.

⁽¹⁾ Arnold HEIM a tenté d'expliquer la déformation de la croûte suivant un méridien en faisant intervenir des efforts de compression et d'extension résultant de variations dans la vitesse de rotation de la Terre dues à des causes extérieures. A. HEIM, *Energy sources of the Earth's crustal Movements*, Publ. Congr. Geol. Intern., 16^e session, Washington, 1933, p. 907.

⁽²⁾ R. DEARNLEY, *Orogenic fold belts and continental Drift*, Nature, vol. 206, n° 4989, 1965.
Orogenic fold belts, convection and expansion, Nature, vol. 206, n° 4991, 1965.

Pour compléter ces données sur l'arrangement systématique des éléments structuraux de la croûte terrestre, nous rappellerons l'exposé relatif aux rides médianes des Océans. Nous avons insisté sur ce fait important que ces crêtes médianes sont disposées en réseau intéressant seulement les grands fonds océaniques, indépendant du domaine continental proprement dit. Ces rides suivent ainsi en grande partie le tracé des axes des océans, épousant notamment la forme en S si remarquable de ceux-ci. Or nous venons d'exposer les raisons qui nous portent à admettre l'origine très ancienne de ce caractère si remarquable, en relation étroite, d'ailleurs, avec la forme même du sillon de la Téthys, autre trait très ancien de la surface du globe. Aussi, sommes-nous portés à croire à la très grande ancienneté des crêtes médianes océaniques dont le réseau s'ébauchait peut-être déjà lors de l'arrangement originel des continents et des océans, caractère essentiel de la face de la Terre.

C'est là sans doute une hypothèse qu'il conviendra d'étayer par des études nouvelles.

En conclusion, les géologues qui n'ont pas d'idées préconçues admettront sans peine que les déformations de la croûte terrestre répondent à des règles harmonieuses. La forme en S des axes des grands océans comme des axes des masses continentales, forme qui guide aussi celle du sillon mésogéen, laisse à penser qu'il en fut ainsi depuis le début des temps géologiques. On ne manquera pas non plus d'établir une liaison étroite entre cette particularité structurale d'ensemble et la disposition symétrique des grandes masses continentales qui, sans être parfaite, n'en est pas moins remarquable.



DEUXIÈME PARTIE

LES MOYENS D'INVESTIGATION L'EXAMEN CRITIQUE DES DONNÉES DU PROBLÈME

La première partie de ce rapport a eu comme objectif le rappel d'un certain nombre de faits devant servir de base à toute étude sur le problème de la Dérive des Continents. Notre attention a porté principalement sur la composition de la croûte terrestre, sur la discontinuité du sial, c'est-à-dire du matériau essentiel des masses continentales, sur la structure de ces dernières, sur les caractères des fonds océaniques, sur l'arrangement des continents et des océans, à la surface de la Terre.

La deuxième partie sera consacrée à l'examen critique des arguments apportés en faveur comme en défaveur de la Dérive des Continents. Nous passerons successivement en revue les arguments tirés de la géographie et de la géologie stratigraphique, de la géophysique (paléomagnétisme) de la paléoclimatologie, de la géologie structurale ; nous tiendrons compte aussi, dans la mesure du possible des données des sciences biologiques.

Nous nous efforcerons de faire un exposé aussi objectif que possible de ces divers arguments. Nous nous employerons avant tout à mettre le lecteur en présence du plus grand nombre possible de faits et d'interprétations, de montrer dans quelle direction il convient d'orienter les recherches pour mieux atteindre à la Vérité.

CHAPITRE I

LES ENSEIGNEMENTS DE LA GÉOGRAPHIE PHYSIQUE ET DE LA GÉOLOGIE STRATIGRAPHIQUE

Comme nous l'avons rappelé dès le début de ce rapport, la conception d'une dérive des continents part de l'hypothèse que les masses continentales actuelles furent unies en une vaste terre, la Pangeæ pendant une grande partie des temps géologiques, tout au moins jusqu'au début de l'ère mésozoïque. Dès ce moment, il se produisit une dislocation de cet ensemble dont chacun des fragments s'en alla à la dérive pour atteindre progressivement son emplacement actuel.

L'une des bases de cette hypothèse est d'ordre géographique. WEGENER et ses continuateurs n'ont pas manqué d'insister sur l'analogie remarquable entre la forme de la côte orientale de l'Amérique du Sud et celle de la côte atlantique de l'Afrique depuis le golfe de Guinée jusqu'au Cap de Bonne-Espérance ⁽¹⁾. Cette analogie de forme paraît si parfaite qu'en faisant glisser l'un de ces continents vers l'autre il y a coïncidence presque parfaite jusque dans les moindres détails.

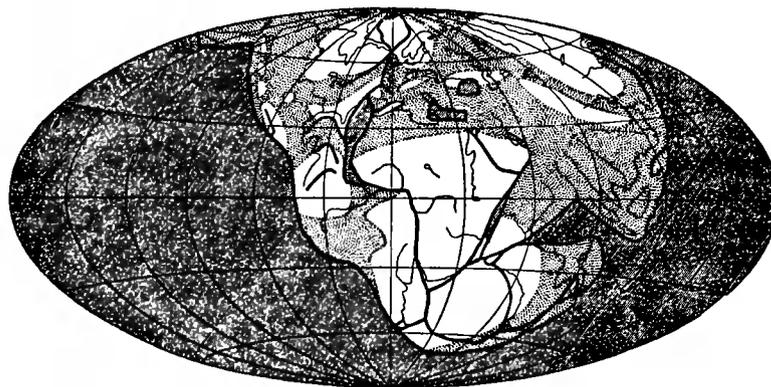
D'après WEGENER une telle similitude ne peut être fortuite ; il fut probablement un temps où les deux continents étaient jointifs ; c'est par un mouvement de dérive qu'ils se sont écartés progressivement l'un de l'autre et que l'Atlantique sud a pu se former peu à peu jusqu'à son extension actuelle (voir figure 9).

La présence de dépôts d'âge crétacé sur les deux rives opposées permet, d'après WEGENER, de préciser le moment où s'est faite la séparation. La crevasse originelle s'est élargie petit à petit, d'abord dans le sud de l'Atlantique puis progressivement vers le nord de telle manière que l'Europe et l'Amérique septentrionale ne se sont séparées définitivement que durant l'ère cénozoïque.

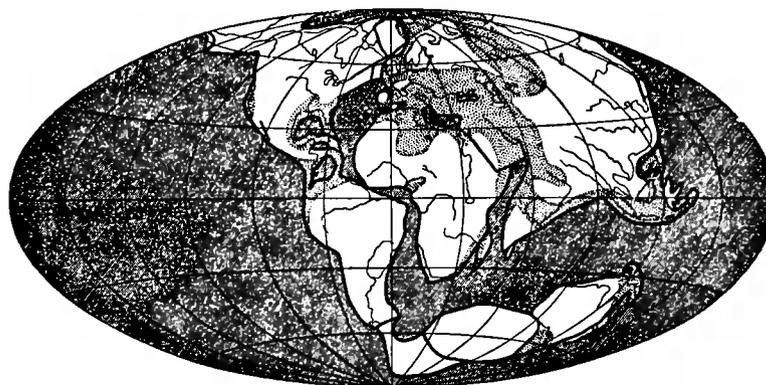
Cette manière de concevoir la dérive entre les Amériques et l'Eur-Afrique a été reprise tout récemment par SIR Edw. BULLARD ⁽²⁾ ; cependant ce savant insiste sur le fait que la similitude morphologique est plus frappante encore si l'on met en contact non pas les rivages actuels, mais les bords des plate-formes continentales.

⁽¹⁾ Une telle coïncidence avait attiré l'attention depuis longtemps. Dans la nouvelle édition de son ouvrage « Physical Geology », Arthur Holmes rappelle à ce sujet quelques données historiques (page 1197) ; dès 1620 Francis Bacon remarqua l'analogie, et en 1668 P. Placet admettait la jonction des deux continents jusqu'au moment du Déluge.

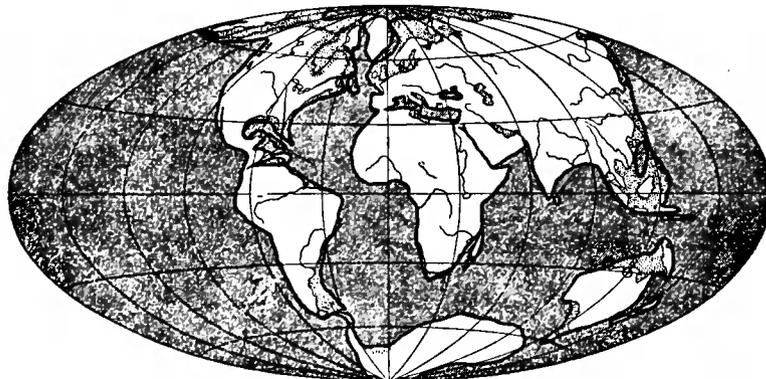
⁽²⁾ Sir Edw. BULLARD, *Continental Drift*, Quarterly Journal Geological Society of London, vol. 120, 1964, pp. 1-33, 1964.



Carbonifère supérieure



Eocène



Quaternaire ancien

FIG. 9. — L'évolution de la Pangée, d'après WEGENER.

(Clichés communiqués par l'Imprimerie Vaillant-Carmanne, de Liège).

Malgré cet amendement à la thèse originelle, celle-ci n'a pas entraîné l'adhésion unanime.

Rappelons à ce propos l'opinion de SIR H. JEFFREYS au sujet de cette similitude des formes entre l'Amérique du Sud et l'Afrique. Nous citerons un passage de l'un de ses derniers travaux ⁽¹⁾ :

“ In the first place the old statement that the angle of South America fits well into that of Africa continues to be repeated. A moment's look at a globe shows that there is a misfit of at least 10°. In view of claims made on the metrical correspondance I have made measures on a 5-inch globe, which should be accurate to about 1°. I find that the nearest great circles to the coasts up to about 20° from the angles, would make angles of about 93° for S America and 104° for Africa. The bends in the coasts about 20° would make the discordance greater if either shorter or longer arcs were used. Also the great bay in the coast of Africa about Loanda has no counterpart in America. I conclude that any displacement would leave discordances of the order of 400 km. Possibly a closer test could be made by taking photographs from a fixed distance from the centre, on the radii to the two angles, or by making perspex models. One writer said that opponents call the agreement a coincidence ; I simply deny that there is an agreement. Another said that the fit would be better if the boundaries were taken at the 1.000 fathom line instead of at the coast ; but this would only alter the angles by a few degrees, in the same direction, and leave the disagreement much as it was. The continued insistence that the agreement is good makes one wonder whether advocates of continental drift have doubts about the rest of their case. In any case the rest of the supposed fits are far worse. ”

En réponse à cette affirmation, S.W. CAREY ⁽²⁾ écrit :

“ JEFFREYS statement that there is a 15° misfit is therefore untrue. *Whether the continental drift hypothesis be true or false this argument should never be used against it again.* In fact the reverse is true since the probability of the degree of morphological coincidence revealed by Fig. 21 being pure chance must be low and is reduced substantially further when objective structural and stratigraphic similarities are simultaneously taken into account ”.

Certes, la coïncidence remarquable dans la forme des rivages ou du bord de la plate-forme continentale frappe l'imagination (Fig. 10). Mais l'argument résiste-t-il à un examen critique des faits d'observation ?

Déjà dans son article “ Some comments on the hypotheses of Continental Drift ” présenté au symposium de Tasmanie, ALAN H. VOISEY met le lecteur en garde ; il montre notamment la difficulté de faire coïncider les côtes nord-américaines et européennes de part et d'autre de l'Atlantique.

⁽¹⁾ SIR HAROLD JEFFREYS, *How Soft is the Earth ?* Royal Soc. of London, First Harold Jeffreys Lecture, 25 octobre 1963.

⁽²⁾ S.W. CAREY, *The tectonic approach to continental Drift*, in *Continental Drift, a symposium*, Geology Département University of Tasmania, Hobart, 1958 et 1959, page 224.

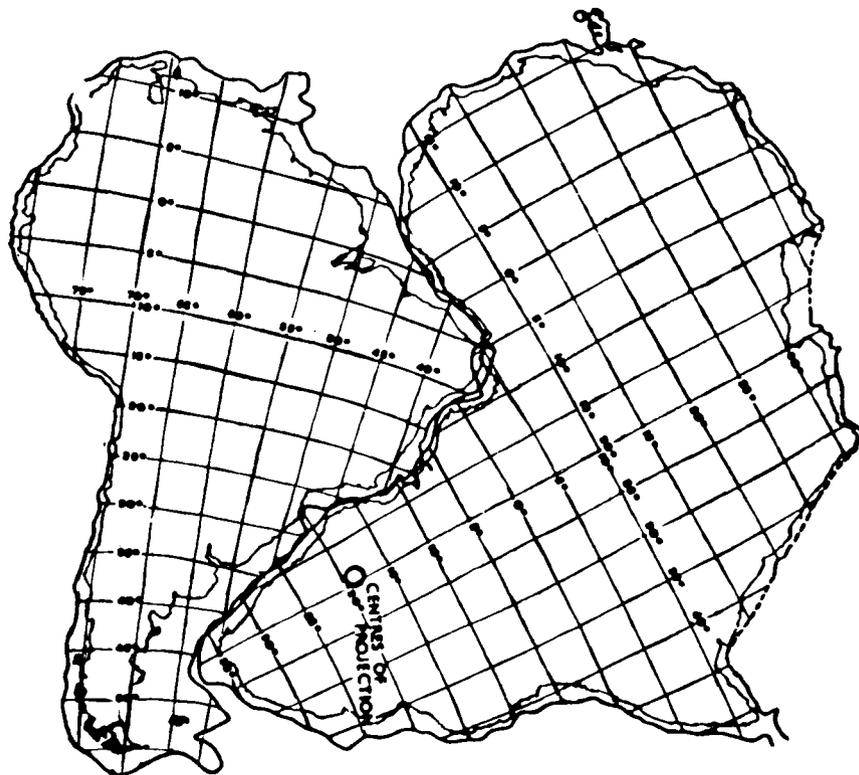
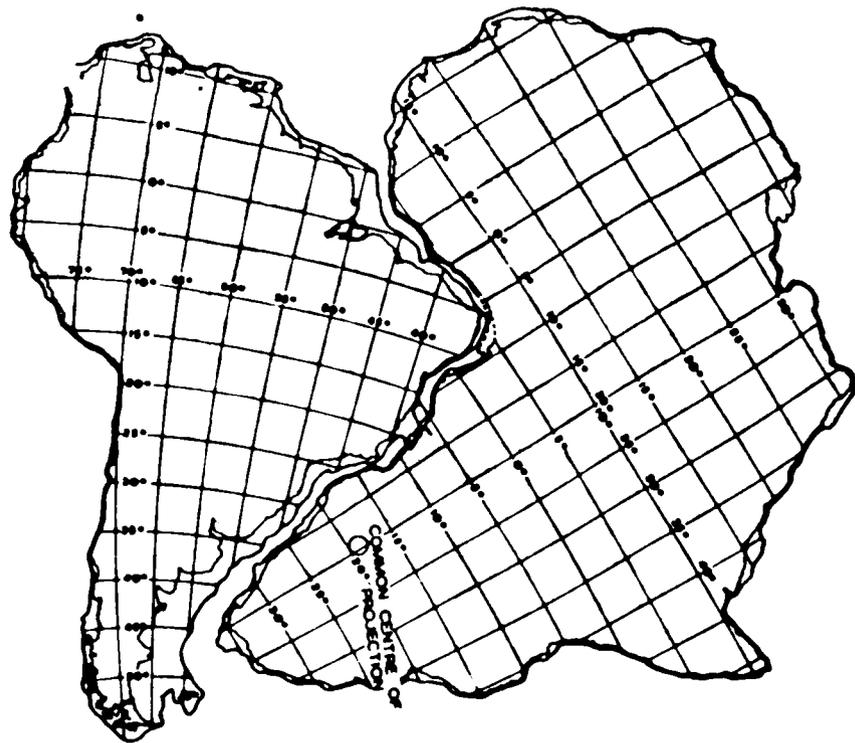


FIG. 10. — La concordance des rivages de l'Amérique du Sud et de l'Afrique, d'après CAREY.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

Plusieurs objections peuvent, en effet, être présentées ; nous allons les passer rapidement en revue.

a) L'analogie si frappante observée dans la forme des côtes actuelles de l'Amérique du Sud et de l'Afrique ne semble pas constituer un argument décisif. En effet, les partisans de la dérive veulent montrer qu'au début de l'ère secondaire les deux continents n'étaient pas séparés par un océan. La carte géologique de l'Afrique publiée par les soins du Bureau d'Études géologiques et minières coloniales de Paris indique le long de la côte occidentale une étroite bande de Crétacé marin s'étendant entre le 15^e degré de latitude Sud et le 5^e degré de latitude Nord. Sur une grande partie de sa longueur le Crétacé est recouvert par du Tertiaire marin. Toutefois, le Tertiaire s'avance plus loin vers le Sud que le Crétacé ; on peut le suivre, de façon discontinue jusque dans la région du Cap.

A hauteur du fleuve Congo et en Angola, sous les sédiments crétacés à faune marine, s'étend une formation spéciale dite des « grès sublittoraux », que l'on peut assimiler à l'assise inférieure des " Uitenhage series " de l'Afrique Australe ⁽¹⁾.

On peut croire que ces grès sublittoraux sont à rapporter au Crétacé tout à fait inférieur, voire même au sommet du Jurassique, si l'on tient compte notamment du fait qu'ils ont subi les effets de dislocations qui en ont, par endroits, fortement redressé les couches ; les dépôts crétacés plus récents inclinent au contraire, très faiblement vers l'Océan.

Au-delà du Golfe de Guinée dans la direction du nord-est, le Crétacé couvre une grande surface au Nigéria ; il prend alors le facies continental tandis qu'il est d'origine marine en bordure de l'océan. Si l'érosion n'était pas intervenue, il est probable qu'à l'est de la bande de Crétacé marin affleurant le long du rivage atlantique, il existerait des dépôts de même âge, mais de caractère continental jusque dans le Sud du continent, soulignant en quelque sorte la forme actuelle de l'Afrique.

Le même raisonnement peut s'appliquer au Tertiaire, car au sud du fleuve Congo, la carte géologique indique la présence d'une large étendue de formations continentales allant de l'Oligocène au Pliocène.

Le rivage actuel tel qu'il est figuré sur les cartes n'est pas un trait morphologique antérieur au Mésozoïque. Il est donc bien aventureux de le considérer comme résultant d'une fracture produite au début de l'ère secondaire, fracture suivant laquelle l'Amérique méridionale et l'Afrique se seraient séparées l'une de l'autre, alors qu'existait l'hypothétique Paugée.

Sur la rive opposée de l'Atlantique, les géologues brésiliens ont noté la présence de Crétacé marin, passant latéralement au facies continental vers l'intérieur du continent sud-américain ; il est surmonté par du Tertiaire continental.

La situation est, par conséquent, sensiblement la même des deux côtés de l'Océan. De part et d'autre on est frappé par la disposition transgressive suivie

(1) Voir à ce sujet : L. CAHEN, *Géologie du Congo belge*, Vaillant-Carmanne, Liège, 1954. Voir page 390 et suivantes.

d'une phase de régression durant toute la durée des temps secondaires et tertiaires. On doit en conclure qu'à ces époques il existait un océan entre l'Afrique et l'Amérique méridionale, océan dont la forme rappelle celle de l'Atlantique d'aujourd'hui puisque la répartition des facies du Crétacé et du Tertiaire souligne la forme actuelle des deux continents qui l'encadrent.

Les rivages et même le bord des plate-formes continentales que l'on croit pouvoir accoler pour prouver la dérive sont le résultat d'une évolution bien plus récente que l'âge attribué par les partisans de la thèse de WEGENER à la disjonction de la Pangée.

Nous pouvons même ajouter que l'accolement des rivages actuels aurait pour résultat de mettre, par endroits, les facies marins du Crétacé et du Tertiaire de la côte africaine en contact avec les facies continentaux de ces mêmes terrains affleurant le long de la côte orientale de l'Amérique du Sud.

La situation actuelle est la conséquence de la disposition transgressive de ces formations dans la direction de l'Afrique, transgression suivie par un soulèvement minime du continent pour permettre l'exondation de sédiments marins d'âge crétacé et tertiaire le long du rivage, tandis que la masse principale de ces dépôts est cachée actuellement sous les eaux de l'Océan.

La même disposition existe du côté de l'Amérique du Sud, mais elle y est beaucoup moins apparente, parce que ce dernier continent ne s'est pas soulevé comme l'Afrique à la fin du Tertiaire. Eu égard à la distribution des facies, on pourrait même supposer que l'Amérique a eu une tendance à s'affaisser plutôt qu'à se soulever.

De toute manière, les faits plaident en faveur de l'existence d'un océan atlantique au Sud du Golfe de Guinée dans des conditions comparables à celles d'aujourd'hui, dès avant le Crétacé et peut être même le Jurassique. Nous aurons l'occasion de compléter les arguments en faveur de cette thèse au chapitre de la paléogéographie.

b) Si l'on adopte la thèse de WEGENER, on doit admettre aussi que depuis la séparation des deux blocs continentaux, les rivages sont restés immuables. Une telle affirmation est contraire aux enseignements de la géologie. Pourrait-on négliger à ce point l'attaque des côtes par les vagues et l'apport de sédiments par les fleuves imposants qui conduisent à l'océan les eaux des deux continents ?

Il nous paraît bon de rappeler ici un renseignement qui nous a été rapporté par le professeur L. CAHEN : Au Sud du Golfe de Guinée, des sondages récents ont mis en évidence la formation d'une zone à caractère géosynclinal en bordure de la côte.

La plate-forme continentale ne doit donc pas être considérée uniquement du point de vue de sa forme géographique mais aussi de sa signification géologique.

L'identité morphologique si remarquable des côtes et des plate-formes actuelles ne peut pas valoir pour les temps antérieurs au Crétacé ; depuis cette époque cent millions d'années se sont écoulées.

c) M. le professeur LAHAYE n'a pas manqué d'attirer notre attention sur le fait suivant : du point de vue de la séismologie, l'Afrique occidentale et la partie orientale de l'Amérique du Sud sont des domaines particulièrement stables, là où WEGENER et ses partisans ont cru voir la preuve la plus marquante de la théorie de la dérive des continents.

d) L'examen des rives de l'Atlantique au nord du Golfe de Guinée ne peut que confirmer la conclusion que nous venons d'exposer.

En effet, au Sud de Dakar, la série mésozoïque est transgressive de l'ouest vers l'est sur le socle paléozoïque. A sa base se trouve du Jurassique marin surmonté de Crétacé et de Tertiaire. Aux Iles du Cap Vert, on connaît également le Crétacé inférieur marin. Par contre, on sait que, dans les régions sahariennes, le Jurassique et le Crétacé ont le facies continental. Nous devons admettre, par conséquent que, dès le Jurassique pour le moins, la forme du continent africain était esquissée comme nous l'avons montré par la répartition des facies du Crétacé et du Tertiaire au Sud du Golfe de Guinée. En conséquence, on peut supposer avec beaucoup de probabilité que l'Atlantique austral existait au moins dès le Jurassique. Ceci est confirmé par les observations faites en Amérique du Sud. La présence du Jurassique a été signalée avec doute dans l'État de Sao-Paulo au Brésil. Il existe sous un facies littoral assez grossier, le long de la côte, au Sud du Cap San Roque ⁽¹⁾. Il semble, par conséquent, que notre raisonnement à propos du Crétacé et du Cénozoïque s'applique également au cas du Jurassique sur les deux rives de l'Atlantique. Il n'est pas interdit de croire qu'au début de la période mésozoïque, il existait un océan entre l'Amérique du Sud et l'Afrique, océan d'où partaient les transgressions marines vers chacun de ces deux continents.

Ici une réflexion s'impose : Le Jurassique est bien connu encore dans l'île de la Trinité, c'est-à-dire dans la région des Antilles ; il est largement représenté en Afrique du Nord, dans le domaine de la Téthys. Aussi est-on autorisé à accepter l'existence de cette mer épicontinentale, trait permanent de la surface du globe à l'époque du Mésozoïque, de part et d'autre de l'Atlantique, ainsi que le raccord de ses sédiments avec ceux déposés sur la plate-forme continentale de l'Océan atlantique d'un côté comme de l'autre de cette grande dépression océanique.

e) Dans le domaine de la Géographie physique, nous croyons utile de rappeler un article publié en 1957 par le professeur LESTER C. KING ⁽²⁾, dans lequel cet auteur tente une comparaison du point de vue géomorphologique entre le Brésil oriental et la partie centrale et méridionale de l'Afrique. Ces deux vastes régions n'ont subi pratiquement aucune déformation orogénique depuis la fin du Paléozoïque. Il est intéressant de constater qu'après cette époque, ces deux continents

⁽¹⁾ Voir à ce sujet les reconstitutions paléographiques dessinées par HENRI et GENEVIÈVE TERMIER dans leur ouvrage : *Histoire géologique de la Biosphère*, Masson et Cie, Paris, 1952.

⁽²⁾ L.C. KING, *A geomorphological comparison between Eastern Brazil and Africa (Central and Southern)*, Quart. Journ. Geol. Soc. of London, n° 448, vol. CXII, part. 4, 1956, p. 445.

ont été affectés de façon périodique par des soulèvements qui paraissent bien être synchroniques de part et d'autre ; dans son résumé l'auteur écrit :

“ Similar erosional processes operating upon similar terraces in both regions have produced series of denudational and depositional land-forms that are closely comparable upon both the continental and local scales ”.

Un tableau annexé à la note permet de juger aisément de la similitude remarquable dans l'évolution épeirogénique et morphologique de ces deux territoires.

L.C. KING rappelle que A. DU TOIT expliquait les ressemblances stratigraphiques pendant le Paléozoïque et le Mésozoïque comme étant dues à ce que les deux continents étaient originellement jointifs et ne se séparèrent que par une action de dérive.

En admettant même que cette explication ait quelque valeur pour l'époque du Paléozoïque et du Mésozoïque inférieur, elle ne peut plus être prise en considération pour expliquer la concordance si remarquable des phases de dénudation et de sédimentation d'âge plus récent, c'est-à-dire du milieu du Mésozoïque au Quaternaire.

Dans de telles conditions, peut-on en faire état pour les temps plus anciens ? Est-on en droit de voir dans de telles analogies un indice favorable à la thèse de la Dérive des Continents ?

Dans la discussion qui a suivi la présentation du travail de L.C. KING, nous relevons la déclaration suivante du Dr. F. DIXEY :

“ Professor KING showed that the southern African and southern American continents during the late Palaeozoic and the early Mesozoic, wherever situated with respect to one another presented a remarkable parallelism in denudational and aggradational phases, and in synchronism, but that during this period they certainly moved up and down in concert ; but that while the stratigraphical resemblances of these early continents might be due to drift, as suggested by DU TOIT, such an explanation could not hold for the denudational, aggradational and epeirogenese resemblances from mid-Mesozoic to the present time. These considerations raised the question as to whether it was now necessary to advance the hypothesis of continental drift to account for the resemblances of the earlier period. ”

Al. DU TOIT fut l'un des plus ardents défenseurs de la théorie de la dérive des continents telle que la concevait Alfred WEGENER. Il s'est efforcé de mettre en évidence la similitude si frappante dans la constitution de l'Amérique méridionale et de l'Afrique de part et d'autre de l'Atlantique.

Reprenant cette thèse, H. MARTIN, en 1961, établit de façon très détaillée une comparaison entre le Brésil et le Sud-Ouest Africain. Il conclut en ces termes ⁽¹⁾ :

⁽¹⁾ H. MARTIN, *The hypothesis of Continental Drift in the Light of Recent Advances of Geological Knowledge in Brazil and in South West Africa*. Alexander L. du Toit Memorial Lecture, N° 7, Trans. of the Geol. Soc. of South Africa. Ann. to vol. 64, pp. 1-47, 1961.

“ There is not the slightest doubt that from the Silurian to the Cretaceous every correction of the stratigraphy and lithologic columns has increased the similarities. The stratigraphic and lithologic columns for this period of some 200 m.y. have become almost identical. I do not think that, for a comparable length of time, a similar likeness between parts of any two continents can be found ”.

L'argument présenté par H. MARTIN paraît évidemment décisif. Peut-être convient-il de lui donner la priorité sur l'argument géographique que nous avons exposé tout d'abord.

f) Bien que cela nous conduise déjà hors du cadre géographique, nous croyons bien faire en ajoutant quelques données à propos de l'Atlantique nord et des océans en général ; nous aurons d'ailleurs l'occasion d'y revenir dans d'autres chapitres consacrés notamment à la paléogéographie et à la géologie structurale.

Dans sa très belle étude des Phénomènes Géodynamiques ⁽¹⁾ le professeur VAN BEMMELEN écrit ce qui suit :

« Au cours d'une conférence à La Haye (le 2 mars 1964), T.S. WESTOLL a démontré qu'on pouvait rassembler les fragments de la Laurasia (Norvège, Groenland, Écosse, Canada) de telle manière que les côtes se correspondent et que le décrochement sinistral du Great Glen se poursuive vers le Nord-Est dans la faille bordière de la côte norvégienne. La région obtenue est caractérisée par une stratigraphie et une évolution structurale très homogènes jusqu'au Dévonien et ce n'est que pendant l'Old Red que s'y manifestent les premiers signes stratigraphiques de l'ouverture de l'Atlantique entre le Groenland et la Norvège ».

A première vue, une telle conclusion est bien faite pour frapper l'imagination ; elle paraît, de toute manière en contradiction avec la thèse de WEGENER qui fait débiter aux premiers temps du Cénozoïque la séparation de l'Amérique et de l'Europe.

Toutefois, à la lecture du travail du professeur VAN BEMMELEN on sent que son auteur cherche à concilier la dérive Wegénérienne avec les vues de T.S. WESTOLL. Il dit, en effet : « Cette première fissure atlantique était grossièrement comparable à la Mer Rouge actuelle. Elle s'est peu modifiée au cours de l'orogénèse hercynienne, mais après le Crétacé, ce détroit s'est élargi, l'étirement correspondant étant accompagné par la formation de faisceaux de dykes et d'intrusions pluto-niques d'âge cénozoïque ⁽²⁾ ».

Le professeur VAN BEMMELEN conclut en disant que « Les observations stratigraphiques, tectoniques, volcaniques et paléomagnétiques confirment la jeunesse de tout l'Atlantique ».

Il ajoute : « La désagrégation de l'ensemble de la croûte continentale (Laurasia et Gondwana) paraît avoir débuté dès le Paléozoïque et s'être poursuivie de

⁽¹⁾ Mém. in 8° Soc. belge géol., paléont. et hydrologie, n° 8, 1964.

⁽²⁾ Voir à ce sujet : J.E. RICHY, *The dykes of Scotland*, Trans. Edinburgh Geol. Soc., vol. 13, n° 4, 1939.

manière spasmodique jusqu'à présent ». Et il appuie aussi ses conclusions sur l'analogie remarquable des côtes et surtout des isobathes de 2000 mètres de l'Afrique et de l'Amérique méridionale. Il termine ce paragraphe de son étude par les mots suivants :

« On peut considérer que *le grand problème de la géologie est le contexte entre la jeunesse des Océans et la vieillesse des continents.* »

Nous croyons devoir faire observer ici qu'une telle conclusion nous paraît sans fondement. Peut-on imaginer que *tous* les océans soient des éléments *jeunes* de la surface de la Terre. On peut soutenir avec WEGENER qu'il en est ainsi pour l'Atlantique et aussi pour l'Océan Indien. On admettrait difficilement qu'il en fut de même pour le Pacifique. Certes, il y a eu, au cours des temps, de grandes transgressions marines, mais il serait bien délicat de prétendre que toute la masse des eaux océaniques ait pu se répartir dans des mers épicontinentales, telles la Téthys, alors que l'Océan Pacifique à lui seul, avec ses grandes profondeurs, couvre près de la moitié de la surface du globe.

D'autre part, nous avons souligné que si l'identité des côtes africaine et sud-américaine est un fait, il y a des objections sérieuses à présenter à la thèse de leur accollement jusqu'au milieu du Mésozoïque.

D'autre part, pour ce qui concerne l'Atlantique nord, il nous paraît bien hasardeux d'adopter les conclusions de T.S. WESTOLL sans prendre en considération les enseignements fournis par la géologie du Spitzberg, sans tenir compte aussi du grand champ de fractures radiales si typique de la vallée du Rhin, qui passe entre l'Écosse et la Scandinavie pour atteindre la côte du Groenland. Nous aurons l'occasion de reprendre la question au chapitre de la géologie structurale.

En résumé, les faits géographiques et stratigraphiques s'accordent peut-être mieux avec la thèse de la permanence qu'avec celle de la dérive.

Nous nous contenterons de rappeler ici la note de Y.H. SCHEINMANN que nous avons citée dans la première partie du rapport. Son auteur admet l'existence d'un continent dans le Nord Atlantique jusqu'à une époque récente ce qui paraît en contradiction avec la thèse de la dérive.

C'est dans l'Atlantique que l'on a cherché les arguments les plus solides pour démontrer la réalité de la dérive continentale, Avant de passer à d'autres parties de la surface du Globe, nous croyons bien faire en citant une phrase de S. VON BUBNOFF ⁽¹⁾ :

Après avoir rappelé les analogies qui paraissent exister entre les rivages opposés de l'Atlantique, il écrit :

“ But these resemblances though admittedly striking, are not absolute proof that America has drifted away from the Old World, for the structures on opposite side of the Atlantic do not agree fully in either age or strike. Furthermore, there are many differences in facies between the two land masses. ”

⁽¹⁾ S. VON BUBNOFF, *Fundamentals of Geology*. Translated and edited by W.T. Harry, Oliver and Boyd, London, 1963. Voir page 239.

g) Nous croyons intéressant de rapporter également un passage tiré de l'ouvrage de A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, new edition, p. 1223. Notre éminent confrère y expose un essai de AHMAD datant de 1951. Son auteur s'efforce de montrer la probabilité d'une connexion entre l'Inde péninsulaire et l'Australie à l'époque du Permien (voir figure 11). Il n'est pas douteux que ces tracés méritent de retenir l'attention. Toutefois on pourrait objecter que l'épaississement progressif des sédiments vers le Sud-Est, en Inde et vers le nord ouest en Australie ne démontre pas nécessairement la proximité relative des deux continents telle que la représente son auteur. On peut imaginer sans peine que, dans leur situation respective actuelle, il pourrait exister une disposition analogue avec deux chenaux simples ou complexes, situés dans le prolongement l'un de l'autre et s'ouvrant tous deux vers un large océan.

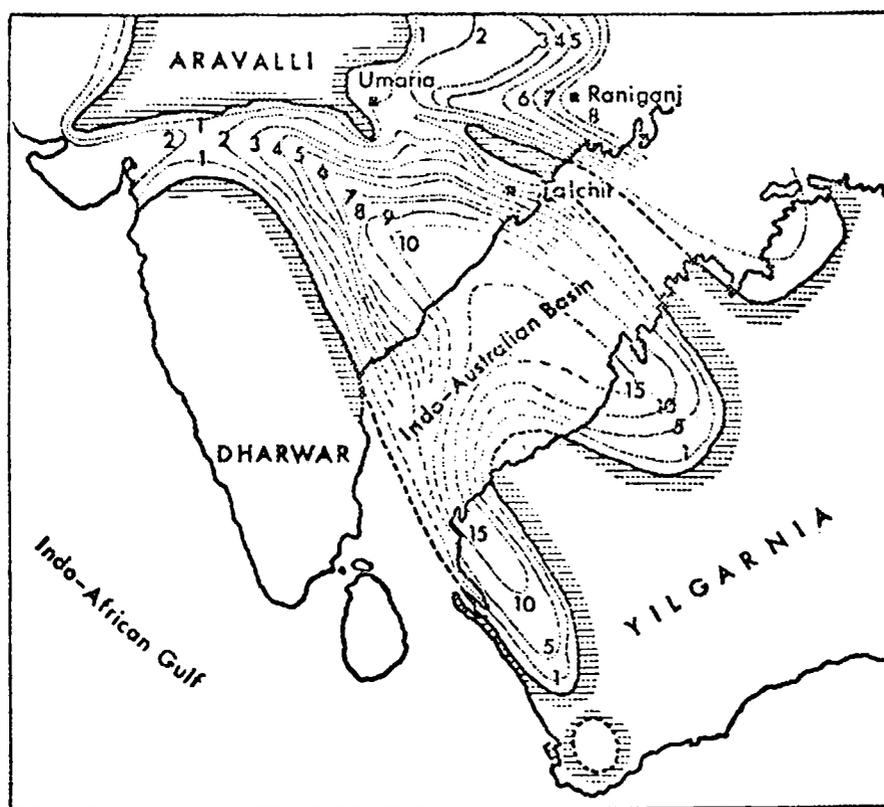


FIG. 11. — L'Australie et l'Inde, d'après AHMAD (*in* HOLMES).

(Reproduit avec l'autorisation de l'Éditeur).

Les données de la paléogéographie dont il sera question plus loin, nous permettront de compléter cet exposé.

h) Dans la première partie de ce rapport, nous avons consacré quelques pages à l'exposé de ce que l'on sait aujourd'hui de la répartition des sédiments plus ou moins récents s'étendant sur le fond basaltique des océans.

De cet exposé, il résulte une constatation bien curieuse et, faut-il le dire, fort énigmatique. Dans *tous les océans*, les dépôts les plus anciens ne remontent guère au-delà du Crétacé. A ce sujet, nous relevons dans un article du professeur J. TUZO WILSON une phrase qui doit retenir toute notre attention ⁽¹⁾ ; nous la reproduisons ici :

“ If the continents have always been fixed, so have the ocean basins, and both should be the same age, but if the ocean floors are the exposed surface of a convecting mantle upon which the continents are born like rafts, then the present ocean floors should be much younger than the continents. The evidence favour the latter view. Rocks older than Upper Jurassic (100.000.000 years) have only been found on the islands of Madagascar, Falklands and Seychelles. No older rocks have been dredged or drilled from the sea floor. The continents are thirty times older and the exceptionnal islands appear to be continental fragments. The Seychelles Islands, for example, have rocks and crust unlike those of other islands but similar to Africa. Their flora and insect fauna resemble degenerate continental ecologies rather than the typical ocean island assemblages ».

Les remarques que nous venons de rapporter sont parfaitement judicieuses. Toutefois, une observation est de mise. L'absence de sédiments anté-crétacés sur les îles de l'Atlantique et de l'Océan Indien constituerait peut-être un argument de première force en faveur de la thèse de la Dérive. Mais la situation est la même dans le Pacifique. Or l'histoire géologique de sa bordure nous porte à admettre que cet océan existe depuis une époque extrêmement reculée, à moins de supposer que toute son étendue fut occupée jusqu'au Crétacé par une masse continentale au même titre que l'Atlantique et l'Océan Indien, ce qui revient à admettre l'existence d'une Pangaea couvrant toute la Terre. Les géologues notamment se rallieraient difficilement à pareille hypothèse.

L'argument invoqué par notre savant confrère est donc loin d'être démonstratif. Certes la notion de la permanence n'arrive pas à expliquer l'âge relativement jeune des dépôts sédimentaires s'étendant sur le fond basique des océans. Sans doute arrivera-t-on à résoudre cette énigme.

Dans la première partie de ce rapport, nous avons cité l'opinion de A. HOLMES : Le fond du Pacifique se déplacerait vers ses bords dans toutes les directions ; la couche basaltique serait ainsi entraînée sous les continents, se renouvelant sans cesse, réalimentée grâce à l'activité des volcans, le long des crêtes ; les manifestations éruptives dans l'Archipel des Hawaï seraient à l'appui de cette hypothèse.

Mais l'âge des dépôts relativement récents, non affectés par des actions géodynamiques, est le même dans l'Atlantique, l'Océan Indien et le Pacifique. Ne convient-il pas de faire le même raisonnement pour tous ces grands fonds océaniques plutôt que d'admettre la thèse de la dérive pour les deux premiers et

⁽¹⁾ J. TUZO WILSON, *The movement of continents*, I.C.S.U., Review of World Science, vol. 6, n° 2, avril 1964, p. 84. — Voir aussi du même auteur : *The structure and origin of continents*, *Ibidem*, vol. 4, n° 4, octobre 1962.

la thèse du renouvellement du fond basaltique pour la troisième. Dans ces conditions, c'est la thèse de la Permanence qui paraît devoir s'imposer plutôt que celle de la Dérive continentale.

Reprenons pour un instant l'hypothèse que le fond du Pacifique peut être animé d'un mouvement de type rayonnant, soit que les continents s'avancent sur le fond océanique suivant l'hypothèse de BENIOFF ⁽¹⁾, soit que le fond de l'Océan s'enfonce sous les continents par un glissement centrifuge suivant l'hypothèse de HOLMES rappelée précédemment. Beaucoup de géologues ne manqueront pas de faire toute réserve à ce sujet. En effet la rigidité des fonds océaniques est attestée, semble-t-il, par la présence des grandes failles radiales qui se sont accentuées progressivement pendant une très longue durée des temps géologiques.

i) Parmi les travaux présentés au "Symposium on Continental Drift" organisé par la Royal Society of London, le professeur WESTOLL a examiné avec beaucoup de soin les arguments que peuvent apporter les observations géologiques. Il fait observer que beaucoup de celles-ci n'apportent pas d'arguments décisifs; toutefois en tenant compte de l'ensemble de ces données la balance penche plutôt en faveur de la dérive.

Un passage de cet ouvrage a retenu notre attention: L'auteur remarque, en effet, qu'une stratigraphie comparée au Paléozoïque inférieur en bordure de l'Atlantique nord est difficile à expliquer dans la forme actuelle de cet océan. Pendant le Paléozoïque inférieur, fait observer WESTOLL, il y a une analogie remarquable entre les sédiments de New-England-St Lawrence par exemple comparés à ceux de Grande-Bretagne et de Scandinavie, avec leurs formations calcaires du Cambrien supérieur et de l'Ordovicien tandis que le facies devient détritique dans la direction du sud-est; une telle analogie ne peut s'expliquer que si ces parties de continents étaient jointives à l'époque de la formation de ces dépôts.

L'argument paraît péremptoire à première vue. Cependant comme on l'a fait observer dans un travail récent ⁽²⁾, si les formations de cet âge se présentent sous un facies identique au Groneland, au Spitzberg, en Scandinavie; on en retrouve l'équivalent exact en Sibérie occidentale. S'il est possible de supprimer l'Atlantique pour joindre le Groneland ou la Nouvelle Angleterre à la Scandinavie, il paraîtra bien difficile d'établir leur jonction directe avec la Sibérie occidentale.

Il convient donc d'être très circonspect lorsqu'on pense à faire intervenir des actions de dérive pour expliquer des analogies stratigraphiques ou paléontologiques.

⁽¹⁾ H. BENIOFF, *Orogenesis and Deep Crustal Structure additional evidence of seismology*, Bull. Geol. Soc. of America, vol. 66, pp. 385 à 400, 1954.

H. BENIOFF, *Circumpacific Tectonics*, Publ. of the Dominion Observatory, vol. XX, n° 2, Ottawa, 1958.

⁽²⁾ P. FOURMARIER, *La géologie de l'Arctique d'après quelques publications récentes*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belg., 5^e sér., t. XLIX, 1963, n° 10.

j) En ce qui concerne ce problème de la permanence des traits essentiels de la croûte terrestre, nous relevons quelques indications intéressantes dans un article publié en 1959 par H.W. MENARD ⁽¹⁾.

Rappelant la différence profonde existant entre la constitution des bassins océaniques et celle des continents, il ne pense pas pouvoir admettre qu'un continent ait pu s'affaisser pour devenir un océan profond. Dans ces conditions, la séparation de deux continents peut provenir de leur déplacement à la manière de navires sur la mer. Toutefois, il ne semble pas établi que ces continents entourant le Pacifique aient jamais été plus proches les uns des autres qu'ils ne le sont aujourd'hui.

La présence des guyots et atolls sur le fond du Pacifique, permet de comprendre, par suite de mouvements alternatifs d'exhaussement et d'affaissement qu'il y ait eu à certains moments un passage facile à travers toute la largeur de cet océan. Des soulèvements et des affaissements des fonds marins peuvent être dûs à l'expansion du manteau, de telle manière que des reliefs sous-marins se transforment en îles, et que des îles disparaissent sous le niveau de la mer.

C'est là une tout autre affaire qu'une action de dérive des masses continentales.

⁽¹⁾ H.W. MENARD, *Geology of the Pacific Sea Floor*, Experientia, vol. XV, fasc. 6, 15.VI.1959.

CHAPITRE II

LE PALÉOMAGNÉTISME ET LE DÉPLACEMENT DES PÔLES

Il ne nous appartient pas de rappeler ici le principe et les méthodes des études basées sur le magnétisme rémanent des roches. Ce moyen d'investigation connaît un grand succès depuis plusieurs années. Il a déjà conduit à des résultats de toute première importance que nous utiliserons largement. Le professeur S.K. RUNCORN, dans un remarquable ouvrage ⁽¹⁾ a exposé les principaux résultats acquis à ce jour.

Il est peut-être utile, avant d'aborder l'examen critique de ces résultats, de faire part de quelques réserves présentées à propos de l'application de la méthode, notamment par le professeur THEILLIER, de Paris ⁽²⁾. Il est à noter, tout d'abord, que toutes les roches de la nature ancienne ne se prêtent pas à des mesures de magnétisme sémanent. Les grès rouges et les laves sont de très loin les constituants de la croûte terrestre susceptibles de donner des résultats satisfaisants. Cependant, il ne faut pas oublier que les roches volcaniques sont par elles-mêmes très magnétiques et créent de ce fait, dans leur voisinage, une perturbation du champ terrestre ; il en résulte des erreurs possibles dont l'ordre de grandeur peut atteindre 10°.

Tout réchauffement des roches a pour effet de détruire, au moins partiellement, l'aimantation originelle. On doit en déduire que le métamorphisme a, selon toute probabilité, des effets considérables, pouvant aller jusqu'à la destruction de l'aimantation originelle.

THEILLIER écrit à ce sujet :

« Il est vraiment impensable que l'on ait pu faire état, comme témoins du champ terrestre originel, d'aimantations portées par des roches très anciennes ayant été enfouies puis progressivement découvertes et ayant subi d'évidentes et profondes transformations. L'aimantation naturelle d'une roche métamorphique n'a certainement plus rien à voir avec le champ de l'époque de sa formation (et même de sa métamorphisation) ; c'est tellement vrai qu'on trouve généralement cette rémanence dirigée au voisinage du plan de litage de la roche. Et l'on

⁽¹⁾ S.K. RUNCORN — *Paleomagnetic Evidence for Continental Drift and its geophysical Cause.*

Ce travail constitue le chapitre premier de l'ouvrage *Continental Drift*, édité par S.K. RUNCORN, 1962, Academic Press. New York et Londres.

⁽²⁾ E. THEILLIER, *Manteau supérieur et paléomagnétisme.* XIII^e Assemblée générale à l'U.G.G.I. Berkeley. 1963. Symposium sur le Manteau Supérieur.

ne peut que suivre P.M.S. BLACKETT qui refuse toute signification paléomagnétique aux roches précambriennes ; mais cette sévérité ne devrait-elle pas s'étendre aussi à toutes les roches plus récentes fortement modifiées ? Un cri d'alarme, en ce sens, avait été lancé déjà dans l'Annual Report of the Director of the Department of Terrestrial Magnetism (Carnegie Institution) 1957-1958 ».

Enfin le professeur THELLIER met en garde contre la valeur du principe de base sur lequel sont étayées toutes les conclusions tirées des observations sur le magnétisme rémanent.

Tout cela est troublant et porte à réfléchir : Il faudra attendre quelque temps encore avant de pouvoir affirmer que les déplacements du pôle durant les temps géologiques sont établis en toute certitude et que les géologues peuvent en faire usage pour expliquer l'évolution de la face de la Terre au cours des temps.

Notre confrère M.E. LAHAYE nous incite lui aussi à la prudence. « Il convient de noter que dans la représentation du champ magnétique terrestre actuel, une partie importante du champ, de l'ordre de 80 %, peut être assimilée au champ d'un dipole centré au centre du globe, l'axe de ce dipole coupant la surface en deux points diamétralement opposés, qui sont les pôles géomagnétiques. Ceux-ci ne coïncident pas avec les pôles magnétiques ; en effet, dans la représentation obtenue pour 1945 par VESTINE et LANGE, le pôle nord géomagnétique est distant de 800 Km environ du pôle N magnétique, tandis que la distance des pôles sud magnétique et géomagnétique est environ 1600 Km. En conséquence, si l'on utilisait actuellement pour définir la direction du dipole, la direction du champ magnétique observée en une station, on obtiendrait, pour des stations distribuées sur le globe, une dispersion notable des pôles géomagnétiques ainsi définis ».

D'autre part, fait encore observer M. LAHAYE, on a tendance à lier l'axe de rotation de la Terre au dipole mais savons-nous comment il évolue quand il s'agit de dizaines ou de centaines de millions d'années ?

A ce propos, on relève dans une note de Sir Edw. C. BULLARD ⁽¹⁾ quelques indications intéressantes. L'auteur part de l'idée que la position du pôle est calculée dans l'hypothèse où le champ magnétique terrestre ressemble à celui d'un dipole dont l'axe coïncide avec l'axe de rotation. Actuellement, ces deux axes font un angle de 11 degrés et demi. Or la question est précisément de savoir si l'axe du dipole a toujours été lié à l'axe de rotation. Au Tertiaire, par exemple, le pôle magnétique semble placé au hasard par rapport au pôle géographique, dans un espace de 15 degrés de latitude environ, avec possibilité que le déplacement ait pu atteindre 20 degrés pour le moins.

Dans ces conditions, peut-on affirmer que, pendant toute la durée des périodes géologiques, la coïncidence existait entre l'axe du dipole et l'axe de rotation ? Il paraît bien difficile de répondre à cette question.

Par contre dans l'article déjà cité à diverses reprises, GRUSSOV insiste sur la valeur des données fournies par les mesures du magnétisme rémanent dans les

(1) Edw. C. BULLARD, *Continental Drift*. Quart. Journal of the Geol. Soc. of London, vol. 120, 1964, pp. 1-33.

formations des diverses périodes géologiques. Deux arguments, à son avis, en soulignent l'importance : *a)* toutes les mesures faites sur des sédiments et des roches volcaniques proches de l'époque actuelle, sur tous les continents, sont en accord avec la position du pôle géographique ; *b)* pour les terrains anciens, les mesures faites sur des roches d'un même âge, dans toute l'étendue d'un continent indiquent une position moyenne du pôle comprise dans d'étroites limites géographiques.

L'auteur en déduit : *a)* la position du pôle à la surface de la Terre a varié dans de larges limites au cours des temps ; *b)* la croûte terrestre tout entière s'est déplacée de période en période ; *c)* il a pu se produire des déplacements des continents les uns par rapport aux autres.

Nous ferons remarquer cependant que pour un même continent ou une même partie de continent, l'aire de dispersion est parfois considérable. La géologie structurale nous permettra de donner une opinion intéressante à cet égard.

Dans le doute, il convient néanmoins de faire confiance aux protagonistes de l'utilisation du paléomagnétisme pour élucider le problème d'une dérive éventuelle des continents, tout en émettant cependant quelques réserves.

A ce propos, rappelons que, d'après les mesures effectuées sur les roches rouges de Malmédy, formation d'âge permien bien connue des géologues belges, le professeur I. de MAGNÉE ⁽¹⁾ avec la collaboration de A.E.M. NAIRN a pu établir que le pôle correspondant se trouve précisément à l'emplacement du pôle magnétique résultant des mesures pratiquées en Grande Bretagne sur des roches de même âge. D'un côté comme de l'autre les roches n'ont pas été modifiées par le métamorphisme.

D'autre part, en la matière, il ne faut pas perdre de vue qu'il peut y avoir des renversements du champ terrestre. Enfin il y a des lacunes énormes dans la documentation, car, en dehors des laves et des grès rouges, les roches sédimentaires n'apportent guère de renseignements utiles ; or ce sont précisément là les constituants les plus importants des continents.

Ces observations, tout en conviant à la prudence, n'enlèvent cependant rien à la valeur de certaines déductions tirées des études du magnétisme rémanent.

Rappelons encore ces quelques lignes que Alex DAUVILLIER, a écrites ⁽²⁾ :

« L'étude du paléomagnétisme... a indiqué que l'axe de GAUSS s'est grandement déplacé géographiquement durant les périodes géologiques. Etant donné que l'axe de rotation doit être demeuré quasi immuable comme l'exige la mécanique céleste, ce résultat s'accorde avec la paléoclimatologie pour confirmer la dérive d'ensemble considérable de la croûte superficielle cristalline — qui renferme le ferromagnétisme — par rapport à la masse du globe. »

D'autre part, ce savant met en doute certaines déductions tirées de l'étude du magnétisme rémanent et notamment les dérives partielles et les rotations

⁽¹⁾ I. DE MAGNÉE et A.E.M. NAIRN, *La méthode paléomagnétique. Application au Poundingue de Malmédy*, Bull. Soc. belge géol., t. LXXI, fasc. 3, 1962.

⁽²⁾ AL. DAUVILLIER, *Paléomagnétisme et paléoclimatologie*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. 252, n° 3, 16 janvier 1961.

des masses continentales pouvant atteindre 180° pour des continents étendus comme l'Australie, contrairement, écrit-il, « à la doctrine dûment établie de la permanence des bassins *océaniques* et du plateau continental ».

Ces réserves faites, le moment est venu d'exposer sommairement les principaux résultats obtenus à ce jour.

Nous avons cru utile de signaler ces réserves à l'attention du lecteur. Nous nous faisons un devoir cependant de dire que les nombreuses mesures du magnétisme rémanent dans les différentes parties du monde conduisent actuellement de façon positive au double résultat suivant :

a) L'emplacement des pôles magnétiques a varié dans de larges limites par rapport à la configuration actuelle de la surface de la Terre.

b) La restitution du pôle à une même époque géologique à l'aide de matériaux prélevés sur deux continents voisins donne, en règle générale, des emplacements distincts, ce qui laisse supposer un déplacement relatif de ces deux masses structurales de la croûte terrestre.

De toute évidence, si la face de la Terre était restée inchangée dans ses traits essentiels pendant toute la durée des temps géologiques, les emplacements occupés successivement par le pôle magnétique auraient dû être identiques pour tous les continents. Or, les résultats les plus frappants obtenus par RUNCORN et ses adeptes établissent sans discussion qu'il n'en fut pas ainsi et cela est vrai sur toute la surface de la Terre.

Nous reproduisons à cet effet quelques représentations du cheminement probable du pôle magnétique depuis le Précambrien jusqu'à nos jours (fig. 12 et 13).

Une restriction est peut-être de mise à ce propos : Sur une carte représentant l'emplacement du pôle magnétique à une époque donnée, d'après les mesures du magnétisme rémanent des roches d'un continent ou d'une partie de continent, le pôle est figuré à divers emplacements dans une aire de dispersion d'étendue variable, parfois considérable, couvrant ainsi plusieurs degrés en longitude et en latitude. Aussi est-on en droit de se demander dans quelles limites on peut accepter la validité des déductions auxquelles ont été conduits les auteurs de ces mesures.

Cette réserve faite, nous porterons notre attention sur le tracé des trajectoires du pôle magnétique au cours des périodes géologiques sur la base des mesures du magnétisme rémanent des roches des différentes périodes géologiques.

A titre d'exemple, nous envisagerons les trajectoires établies par RUNCORN d'après les roches de Grande Bretagne et de l'Amérique du Nord. Comme nous venons de le signaler, de telles courbes manquent forcément de précision et il convient de les utiliser avec prudence si l'on veut en tirer des conclusions pour la solution du problème de la dérive des continents.

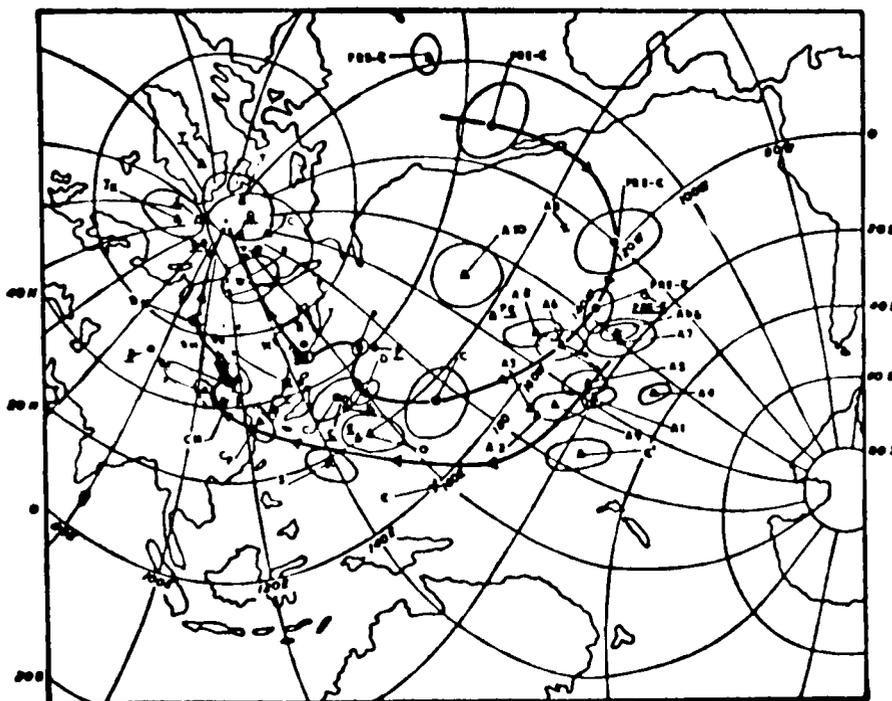


FIG. 12. — Déplacement du pôle magnétique sur la base des mesures effectuées en Europe et en Amérique, d'après RUNCORN.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

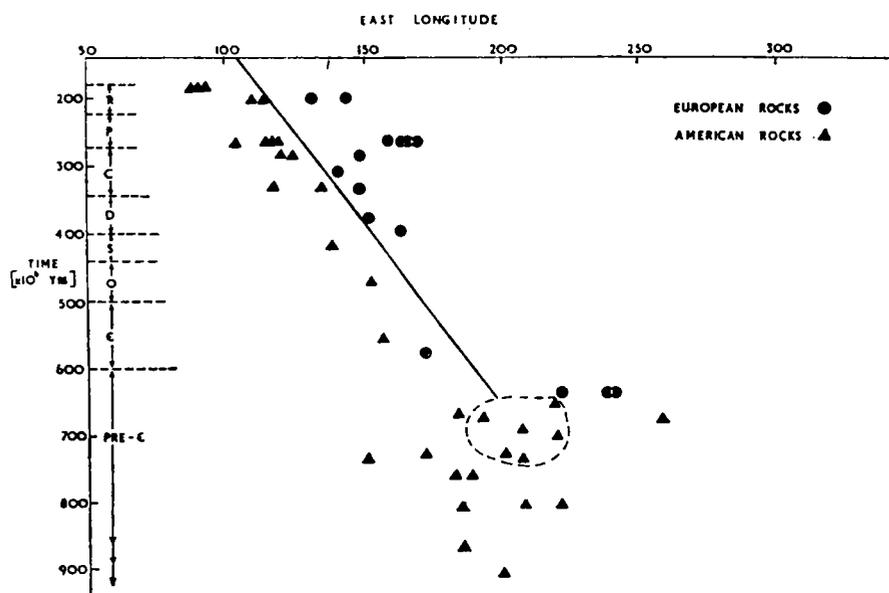


FIG. 13. — Longitudes de la position du pôle magnétique sur la base des mesures faites en Europe (points) et en Amérique (triangles), d'après RUNCORN.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

Les trajectoires tracées par RUNCORN pour chacun de ces deux ensembles de roches sont très semblables, mais elles ne se superposent pas à la surface du globe ⁽¹⁾. Il semble y avoir là un argument décisif en faveur de la dérive.

Sur la base des roches de Grande Bretagne, la trajectoire proposée pour le déplacement du pôle magnétique partirait, au Précambrien, de la région du Colorado, s'avancerait vers le sud jusqu'au delà de l'équateur pour remonter ensuite vers le pôle actuel en passant au Sud du Japon au Dévonien, près de Vladivostock au Trias, et gagner progressivement son emplacement actuel.

La trajectoire établie d'après les données fournies par les roches de l'Amérique septentrionale a une forme presque identique, mais, sur toute sa longueur, elle est décalée systématiquement vers l'Ouest. Toutefois l'écart entre les deux courbes atteint sa valeur maximale au Précambrien et au Paléozoïque inférieur pour décroître ensuite progressivement, au point que les deux trajectoires finissent par se confondre dès la fin du Cénozoïque et au Quaternaire.

En établissant ses tracés, le savant professeur DE NEWCASTLE-UPON TYNE s'est efforcé de déterminer, pour chaque époque, le point moyen dans l'aire de dispersion. C'est là une opération particulièrement délicate quoiqu'en dise son auteur. Quand on examine, par exemple la figure 21 de son ouvrage, indiquant les longitudes respectives, pour chacune des époques géologiques depuis le Précambrien jusqu'au Cénozoïque on est frappé de voir que les aires de dispersion Europe d'une part, Amérique d'autre part sont pratiquement jointives. Toutefois, il faut reconnaître que, *depuis le Précambrien*, les positions moyennes du pôle sont distinctes suivant que les mesures sont faites en Europe ou en Amérique du Nord, ces dernières fixent toujours l'emplacement du pôle à l'ouest des lieux résultant des premières.

Des mesures nombreuses et concordantes, sur des roches d'Europe indiquent que le pôle magnétique à l'époque du Permien se situait dans le nord-ouest du Pacifique, par contre, les mesures effectuées sur des roches de même âge prélevées en Amérique du Nord conduisent à placer le pôle correspondant à 20 ou 30 degrés plus à l'ouest par 40° latitude nord, soit environ 1500 kilomètres. Au Carbonifère, le décalage est de l'ordre de 30 degrés par 20° latitude nord ⁽²⁾. C'est, à peu de chose près, la valeur moyenne obtenue pour les périodes antérieures avec cette restriction que les courbes étant alors orientées à peu près parallèlement à l'équateur, il est difficile de procéder à une estimation aussi précise qu'aux temps plus récents où elles s'orientent sensiblement suivant le méridien.

La non-coïncidence constatée ainsi entre les deux courbes depuis les temps anciens jusqu'au Tertiaire conduit à envisager non seulement un déplacement du pôle magnétique par rapport à son emplacement actuel, voire peut-être un glissement d'ensemble de la croûte terrestre accompagné d'une certaine déforma-

⁽¹⁾ Outre l'ouvrage cité précédemment, on consultera S.K. RUNCORN, *Palaeomagnetic comparisons between Europe and North America in A Symposium on Continental Drift*. London, The Royal Society, 1965.

⁽²⁾ Un examen comparatif des figures 19 et 21 du travail précité de Runcorn laisse apparaître certaines contradictions dans les tracés adoptés.

tion de celle-ci, mais surtout un déplacement de l'Amérique par rapport à l'Europe, c'est-à-dire une « dérive » dont l'importance peut être estimée à une trentaine de degrés de longitude, d'après les chiffres rappelés ci-dessus.

De son côté, SIR BULLARD voit dans ces données du paléomagnétisme la preuve d'une proximité plus grande de l'Amérique et de l'Europe, il y a deux cent millions d'années. Il écrit : " America was some 30° nearer Europe 200 millions years ago than it is now ".

Est-ce à dire pour cela que ces deux blocs de sial étaient capables de glisser à la surface du sima dans lequel ils enfoncent leurs racines ? Nous aurons l'occasion d'y revenir plus tard. Ajoutons que l'on consultera avec intérêt les pages consacrées par le professeur Ph. KUENEN au problème de la permanence dans son ouvrage classique : " Marine Geology " (1).

Ajoutons encore que S. WARREN CAREY fait état des résultats obtenus par les mesures du magnétisme rémanent des roches de Grande Bretagne d'une part, d'Amérique septentrionale d'autre part pour mettre en évidence l'existence de l'« orocline » de l'Alaska, et son influence dans l'ouverture de l'Océan Arctique et de l'Atlantique nord (2). (fig. 14)

A l'exemple de KUENEN et de GRUSSOV on peut supposer tout aussi bien qu'il y eut un mouvement d'ensemble de la croûte terrestre, accompagné forcément de dislocations venant troubler l'ordonnance originelle des masses. GRUSSOV écrit à ce propos (3) : " There is no known mechanism capable of shunting continents about on the face of the globe without the oceanic crust moving as well ". Mais ce savant admet aussi qu'un glissement général de la croûte peut être accompagné de déformations et de fracturation.

Les géologues ont tout naturellement tendance à accorder la prépondérance à ces dernières. Aussi peut-on se demander si le simple jeu des plissements et des grandes fractures n'a pas eu une influence prépondérante dans le décalage de l'emplacement du pôle suivant que sa restitution est faite d'après les roches d'un continent ou d'un autre.

Nous aurons à revenir sur cette question au chapitre de la géologie structurale. Nous pouvons cependant rappeler dès à présent que de grandes failles du type des décrochements horizontaux (strike-slip faults) dont l'existence est bien connue dans les océans comme sur les continents ont pu jouer un rôle de première importance à cet égard. A titre d'exemple nous ne citerons que quelques faits, quitte à y revenir dans un chapitre ultérieur.

La carte du fond de l'Atlantique dressée par B.C. HEEZEN, M. THARP et M. EWING, comme nous l'avons rappelé dans la première partie de ce rapport, permet de constater que la crête médiane est déplacée par une série de failles de direction

(1) Publié en 1950 chez John Wiley and Sons, New York et Chapman and Hale, Londres.

(2) S. WARREN CAREY, *The tectonic approach to continental Drift* in « *Continental Drift. A Symposium* », Geol. Departem. Univers. of Tasmania, Hoffart, 1958, p. 177. Voir notamment fig. 13, page 213.

(3) W.C. GRUSSOV, *Metastasy*, in *Polar Wandering and Continental Drift*, edited by Arthur C. Mungan, Soc. of Econ. paleontologists and mineralogists, Special publication N° 10, Tulsa, Oklahoma, July 1963 (voir p. 162).

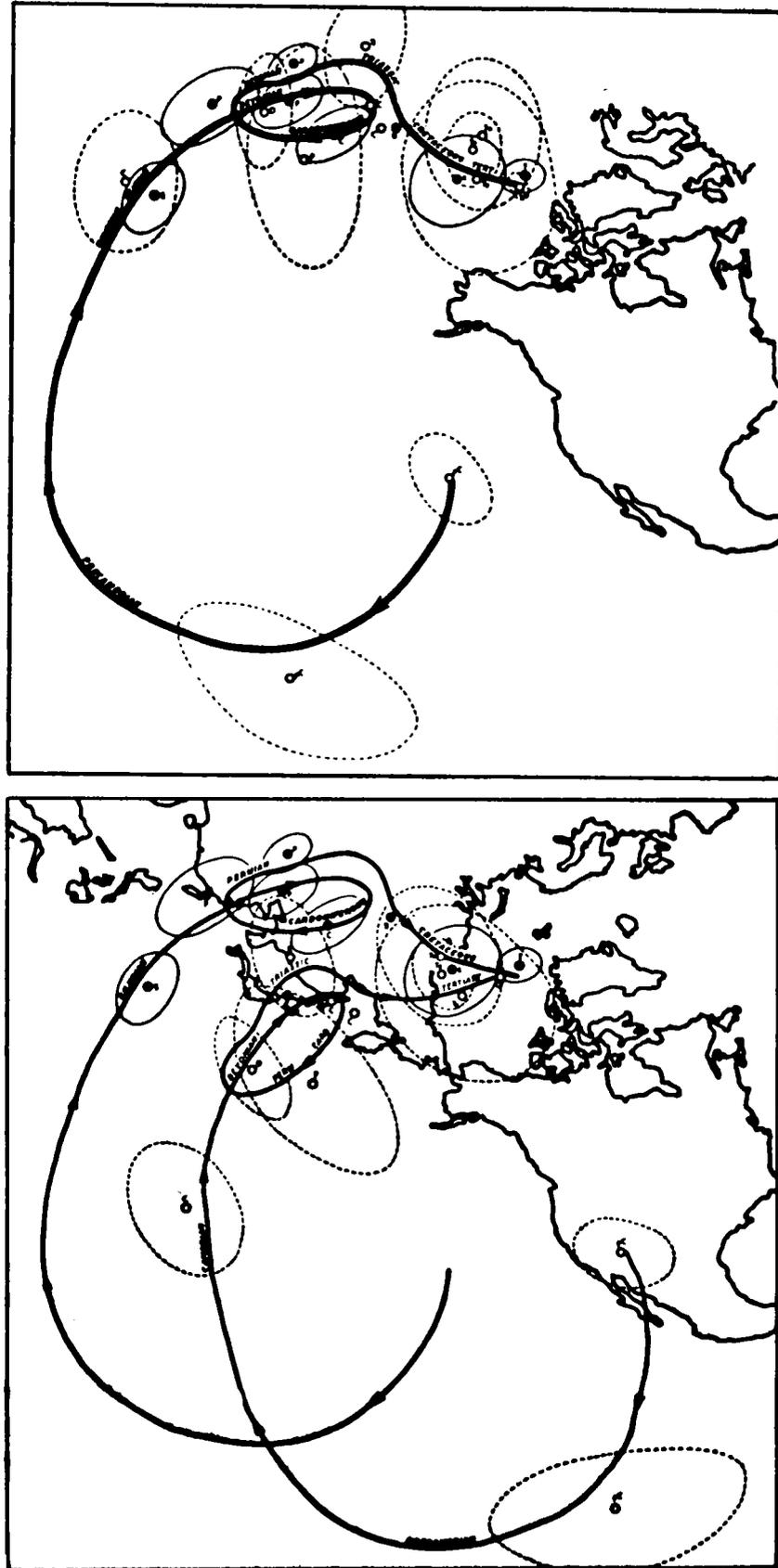


FIG. 14. — La démonstration du déplacement suivant l'Orocline de l'Alaska par la méthode du paléomagnétisme d'après CAREY.
(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

sensiblement ouest-est ; le déplacement total le long de ces fractures peut être évalué à environ 27 degrés de longitude. Des failles du même type et de même direction sont maintenant connues sur le fond du Pacifique ; deux d'entre elles, d'après MENARD ⁽¹⁾ accusent un déplacement de près de 1500 kilomètres dans le même sens que celles de l'Atlantique. Fait non moins frappant, l'inflexion des chaînes de l'Ouest américain, située à peu près dans le prolongement de la faille Mendocino s'étend sur une longueur ouest-est d'importance comparable soit sur environ 1200 kilomètres.

Ces grandes fractures sont d'un intérêt considérable pour le sujet qui nous occupe ; elles permettent tout d'abord de croire que le fond des océans s'est comporté de la même manière que les continents sous l'action des contraintes tendant à déformer la croûte terrestre. On verra sans doute, dans cette observation, une contradiction avec le principe même de la dérive au sens de WEGENER.

D'autre part, ces données du paléomagnétisme établissent :

a) qu'il a pu se produire un mouvement relatif de l'Europe et de l'Amérique du Nord pendant toute la durée des périodes géologiques depuis le Précambrien. Cette constatation s'oppose à la thèse Wegénérienne qui postule le début de la séparation des deux continents à la fin du Mésozoïque, ou au cours du Cénozoïque.

b) L'importance du déplacement est notablement moindre que dans l'hypothèse de la dérive telle qu'elle est généralement acceptée car elle devrait être de l'ordre d'une quarantaine de degrés de longitude au lieu des 20 à 30 degrés qu'indique la comparaison des deux trajectoires tracées par RUNCORN.

Si donc il y a eu réellement dérive elle s'est faite beaucoup plus tôt que ne l'admettent WEGENER et ses continuateurs ; d'autre part, son importance est moindre qu'on ne pouvait le supposer sur la base d'autres arguments.

Dans ces conditions que faut-il penser de l'origine de l'Atlantique, résultant de l'ouverture progressive du Sud vers le Nord d'une grande fissure affectant, suivant le méridien, toute la hauteur d'une Pangée hypothétique ?

Il convient d'envisager cette partie du problème sous un autre aspect. Nous nous sommes reportés à la carte dressée par HELSLEY et reproduite dans un article de ANTON L. HALES ⁽²⁾. L'auteur a établi une comparaison entre l'Europe, l'Est des États-Unis et l'Ouest de ce territoire pour ce qui concerne la position du pôle magnétique à l'époque du Permien. L'examen de sa carte conduit à des résultats remarquables.

a) Pour les trois territoires, l'emplacement du pôle magnétique se situe dans la partie nord occidentale de l'Océan Pacifique entre la mer d'Okotsk, le Japon et l'arc des îles Aléontiennes.

⁽¹⁾ Science, vol. 132, 1960, p. 1744, fig. 6.

⁽²⁾ ANTON L. HALES, *A look at the Manille*, Geotime, juillet-août 1964.

C.E. HELSLEY, *Paleomagnetic results from Lower Permian Dunkard Series of West Virginia*, Journal of Geophysics Research, 1964.

b) L'aire de dispersion des points relevés varie beaucoup en étendue suivant le territoire auquel elle se rapporte.

C'est ainsi que pour l'est des États-Unis, l'aire de dispersion est très réduite, son centre se trouvant approximativement dans le nord de la Corée, non loin de Moukden. Pour l'ouest de ce même pays, l'aire de dispersion est nettement plus grande car elle s'étend suivant une ellipse allongée de Formose à l'Ouest du Lac Baïkal.

Enfin, l'aire de dispersion des positions du pôle magnétique d'après les mesures effectuées sur des roches d'Europe est plus étendue encore car elle s'étire de la mer du Japon au Sud du détroit de Behring, par 50 degrés de latitude nord dans l'Océan Pacifique.

Il paraît probable que des aires de dispersion aussi vastes tiennent en partie à des erreurs, si pas dans la méthode utilisée pour la mesure du magnétisme rémanent, mais dans les soins mis à éliminer certaines causes d'erreurs, dues par exemple à l'intervention de champs parasites ultérieurs.

Il n'empêche que, dans le cas envisagé ici, l'ouest et l'est des États-Unis, et l'Europe donnent des positions moyennes bien distinctes les unes des autres.

S'il est loisible d'envisager un phénomène de dérive à la manière de WEGENER pour expliquer la différence de position du pôle magnétique à l'époque du Permien entre l'Europe et l'est des États-Unis, il paraît difficile d'accepter qu'il en fut de même pour rendre compte de la différence de position d'après les mesures faites à l'est et à l'ouest d'un même bloc continental. Il y a lieu par conséquent d'envisager une autre explication. Rappelons à ce propos que l'aire de dispersion est relativement très réduite pour l'est des États-Unis ; elle s'étale bien davantage pour les mesures prises dans l'Ouest du territoire. Ne faut-il pas en déduire qu'à l'époque du Permien, l'est des États-Unis avait acquis sa stabilité, tandis que la situation était tout opposée dans l'ouest, où après le Permien se sont produits des plissements et de grandes fractures radiales.

Il ne nous est évidemment pas possible, à propos de paléomagnétisme de donner un exposé, même très sommaire de la structure géologique des États-Unis d'Amérique. Nous renvoyons aux ouvrages spéciaux, notamment à celui de Ph. KING ⁽¹⁾. Nous citerons également l'étude de GILLULY sur l'ouest des États-Unis ⁽²⁾. Dans cette vue d'ensemble sur une importante partie du territoire américain, l'auteur met bien en évidence les traits caractéristiques de la tectonique récente avec ses plis, ses failles, ses charriages, les larges soulèvements et les montées de roches éruptives ; il s'agit, en l'occurrence de déformations plus récentes que celles reconnues dans la partie du territoire proche de l'Océan Atlantique.

La différence dans la position du pôle magnétique à une même époque, relevée dans l'ouest et dans l'est des États-Unis d'Amérique, est, sans aucun

⁽¹⁾ Ph. B. KING, *The Evolution of North America*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1959.

⁽²⁾ J. GILLULY, *The tectonic evolution of the Western United States*, The Quart. Journ. Geol. Soc. of London, n° 474, vol. 119, part. 2, 28 June 1963.

doute, l'argument le plus frappant que l'on puisse invoquer contre la théorie de la dérive des continents sur la base du paléomagnétisme.

Sur une carte d'ensemble, la distance entre le centre approximatif de l'aire de dispersion du pôle pour l'Ouest de l'Amérique du Nord et celui de l'aire de dispersion de l'est de ce pays est sensiblement égale à la moitié de la distance entre ce dernier et le centre de l'aire de dispersion d'après les mesures effectuées sur les roches européennes. Si donc on en arrive à écarter l'idée de dérive pour l'Amérique seule, est-il raisonnable de la maintenir dans une comparaison entre l'Est des États-Unis et l'Europe ? Il existe aussi dans cette partie du monde des dislocations diverses, et notamment des failles radiales encore actives.

Ces accidents géologiques n'ont-ils pas joué le rôle essentiel en cette affaire ?

Le déplacement horizontal le long des grands décrochements est considérable. Dans le Pacifique, d'après MENARD, le glissement suivant deux de ces grandes failles est de l'ordre de 1500 kilomètres ; pour la faille San Andreas, il atteint peut-être le millier de kilomètres ; à la Brevard Zone en Caroline du Nord, il dépasse certainement 200 kilomètres ; dans l'Atlantique central des mesures évaluent ce mouvement horizontal à près de 700 kilomètres pour la faille principale.

Il est à remarquer que le glissement suivant ces grandes fractures s'accorde avec les déplacements du pôle révélés par le paléomagnétisme.

En nous reportant à la carte dressée par D. VAN HILTEN, en 1963, reproduite dans un article publié récemment par le professeur M.G. RUTTEN ⁽¹⁾, la position moyenne du pôle magnétique à l'époque permienne pour la « Méso-Europa », se situe dans le Pacifique, à hauteur du Japon, vers 40 degrés de latitude nord et à environ 170 degrés de longitude est ; par contre, pour la zone des plissements alpins, il est fixé dans l'île de Hondo, vers son extrémité septentrionale c'est-à-dire vers 140 degrés de longitude est. (Fig. 15).

Il serait difficile de faire intervenir un mouvement de dérive pour expliquer une telle différence en longitude dans la restitution du pôle permien suivant que l'on considère l'une ou l'autre partie de l'Europe.

Le tracé des isoclines en Europe à l'époque du Permien (Fig. 16) indique que des mouvements différentiels se sont produits et que la situation est tout autre suivant que l'on considère le domaine pyrénéo-alpin ou la partie de l'Europe située au nord de ces plissements récents.

Il ne nous paraît guère possible d'expliquer ces différences par une action de dérive telle qu'elle fut proposée par WEGENER. Par contre, les dislocations subies par ce territoire depuis le Permien jusqu'à nos jours, sous forme de plissements ou par le jeu de décrochements permet de comprendre ces particularités révélées par l'étude du paléomagnétisme, sans qu'il soit nécessaire de renoncer à la notion de la permanence des océans tout au moins dans leur répartition générale à la surface du Globe.

(1) M.G. RUTTEN, *Paleomagnetism and Tethys*, Geologische Rundschau, 1964.

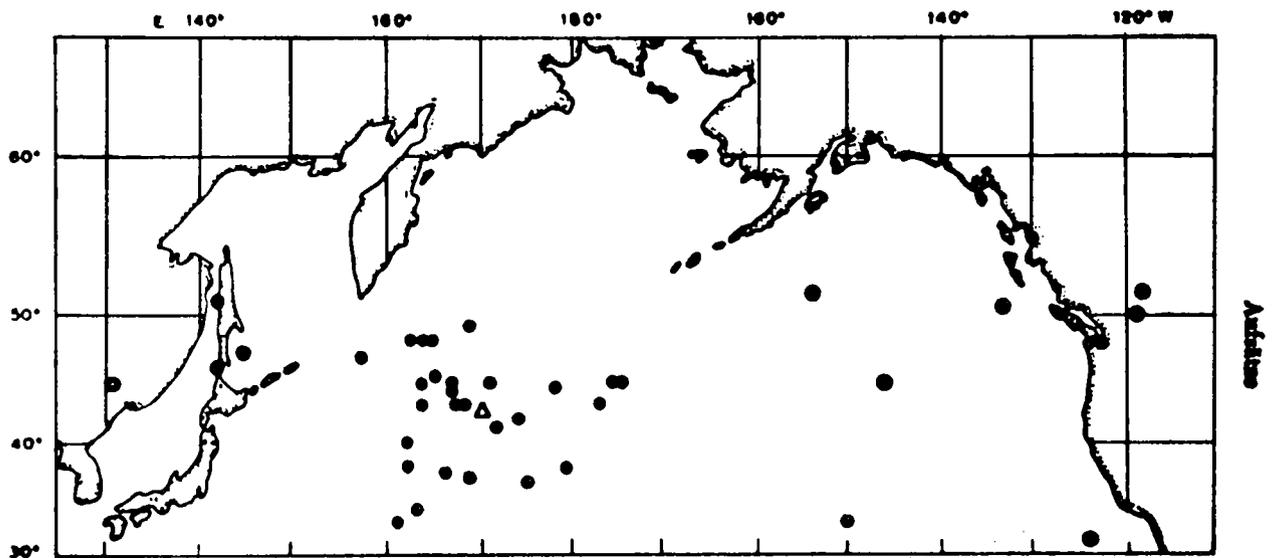


FIG. 15. — Emplacement du pôle au Permien sur la base des mesures en Mesoeurope et dans les chaînes méditerranéennes, d'après RUTTEN.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).



FIG. 16. — Isoclines en Europe, d'après RUTTEN.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

Un déplacement relatif modéré se comprend d'autant mieux si, d'accord avec les idées de A.V. PEIVE, on admet que les fractures de décrochement ne descendent pas très profondément dans la croûte terrestre, mais se perdent vers le bas dans une zone relativement plastique permettant un déplacement facile des blocs de la croûte les uns par rapport aux autres.

D'autres tracés dus à RUNCORN portent également à réfléchir. Les géologues n'hésiteront pas à admettre qu'au début de l'ère secondaire l'Asie et l'Europe étaient étroitement unies en un seul massif de nature sialique, si même elles étaient partiellement recouvertes par une mer épicontinentale. On peut croire, par conséquent, qu'à partir du Trias tout au moins, le continent eurasiatique s'est comporté comme un bloc unique, tout en tenant compte des déformations d'origine tectonique : zones plissées, fractures radiales, grandes aires de subsidence. On peut prétendre qu'il en fut ainsi dans la partie de ce vaste domaine situé au nord de la Téthys. La comparaison des cartes dressées par S.J. RUNCORN montre que les pôles ne coïncident pas suivant que leur position est déterminée en partant de roches d'Europe ou bien de roches d'Asie. La discordance est du même ordre de grandeur que celle observée entre les restitutions du pôle pour l'Europe d'une part, pour l'Amérique septentrionale d'autre part. Puisqu'il ne peut être question de dérive, on est amené à penser à l'intervention des facteurs tectoniques postérieurs au Trias, telles les chaînes plissées d'âge crétacé ou tertiaire, telles aussi les grandes failles bien connues en bordure de la large plaine de la Sibérie occidentale. Par conséquent, il y a lieu d'être prudent lorsqu'on cherche à expliquer par une dérive wegenérienne les non-coïncidences dans l'emplacement des pôles d'après les mesures faites en Europe et en Amérique septentrionale.

Envisageons un autre aspect du problème : Si nous nous reportons au mémoire de S.W. CAREY dont il fut question dans la première partie, nous avons à attirer l'attention sur les figures 13 a et 13 b y intercalées. La première donne avec quelques variantes les trajectoires du pôle telles qu'elles ont été déterminées par les mesures sur les roches américaines d'une part, sur les roches de Grande Bretagne d'autre part. Les deux courbes s'écartent d'autant plus que l'on considère une époque plus ancienne, comme on le voit dans les tracés de RUNCORN. Si au lieu de considérer la répartition actuelle des terres et des mers, on revient à la situation supposée avoir existé avant la production de l'orocline de l'Alaska, les deux courbes sont en parfaite coïncidence. Suivant l'auteur, la divergence observée démontre la réalité du sphenochasm qui a donné naissance à l'Océan Arctique actuel. Cette manière de voir ne nous paraît cependant pas en accord avec la structure géologique générale des régions polaires arctiques ; la crête Lomonossov, passant tout à proximité du pôle nord et limitant le bassin canadien paraît être un trait majeur reliant sans interruption les chaînes mésozoïques de la Nouvelle Sibérie aux plis de même âge de l'Archipel canadien.

En conclusion, les résultats remarquables des recherches sur le paléomagnétisme d'après les roches prélevées sur les continents de l'hémisphère nord,

correspondant dans leur ensemble à la Laurasia, n'apportent pas de preuve décisive en faveur de la thèse d'une dérive des continents suivant les idées de WEGENER. Ils conduiraient plutôt à admettre des mouvements relatifs de blocs de la croûte terrestre délimités par des accidents tectoniques, sorte de dérive mitigée au sens que nous avons donné à ce terme dans la première partie (page 8). Peut-être seraient-ils tout aussi bien en faveur d'un glissement général de la croûte terrestre, avec production des dislocations inséparables d'un pareil transport. Ce n'est là qu'une impression toute provisoire. Auparavant, il y a lieu de considérer les résultats obtenus par le paléomagnétisme au départ des continents de l'hémisphère sud. L'Afrique retiendra tout d'abord notre attention.

Comme nous l'avons indiqué dans la première partie de l'ouvrage, l'Afrique se trouve en quelque sorte dans une situation centrale par rapport aux autres continents ; c'est un fait sur lequel B.B. BROCK a attiré l'attention ; une telle situation n'est peut-être pas fortuite.

Reportons-nous au travail de S.K. RUNCORN déjà cité à maintes reprises. Dans une des figures qui illustrent cet ouvrage, l'auteur a donné, à titre comparatif, la trajectoire du pôle pour les divers continents (1). A l'examen de cette figure (Fig. 17), une particularité frappe immédiatement : la surface délimitée par la dite trajectoire est très minime par rapport à celle figurée pour les autres continents. Faut-il en conclure que le déplacement éventuel du continent africain a été moindre que ceux des masses continentales qui l'encadrent ? En d'autres termes l'Afrique a-t-elle été un massif relativement immuable par rapport au reste de la croûte terrestre ?

De toute manière, si l'on se reporte à la figure 16 (page 20) du même travail, les positions du pôle relevées au moins à partir du Trias, c'est-à-dire avant même la dislocation supposée de la Pangée dans la conception de WEGENER, sont toujours relativement très proches du pôle actuel, bien plus que ne le sont celles obtenues par l'étude des roches de même âge sur les autres continents. Les données analytiques et synthétiques sont ainsi concordantes de façon satisfaisante.

On notera à ce propos que les aires de dispersion des emplacements du pôle au Trias, au Jurassique et au Crétacé paraissent disposées suivant un même arc joignant le Sud du Groenland au détroit de Behring ; cela donne l'impression de déplacements oscillatoires par rapport au pôle arctique. S'agit-il en l'occurrence d'une véritable dérive au sens wegenérien ? On peut penser aussi à l'effet de l'accentuation d'accidents géologiques, par exemple le jeu des grandes cassures radiales si bien développées sur le continent africain comme en Europe, et la surrection des chaînes plissées de la région méditerranéenne.

Dans son travail paru en 1964, NAIRN (2) a tracé (fig. 18) la trajectoire du pôle sur la base du magnétisme rémanent des roches de l'Afrique. La figure 10 y incluse est intéressante. Confirmant ce qui vient d'être rappelé d'après

(1) S.K. RUNCORN, *Continental Drift*, fig. 20, page 24.

(2) A.E.M. NAIRN, *Paleomagnetic measurements on Karroo and postkarroo rocks*. A second Progress Report. Overseas geology and mineral resources, vol. 9, n° 3, London, 1964.

RUNCORN, la courbe de cheminement du pôle décrit une ellipse de peu d'étendue au nord du détroit de Behring. Sur la même figure, l'auteur a reporté, pour la même période, la trajectoire du pôle établie d'après les mesures sur roches d'Europe d'une part, d'Amérique d'autre part. Il est remarquable que ces trois courbes

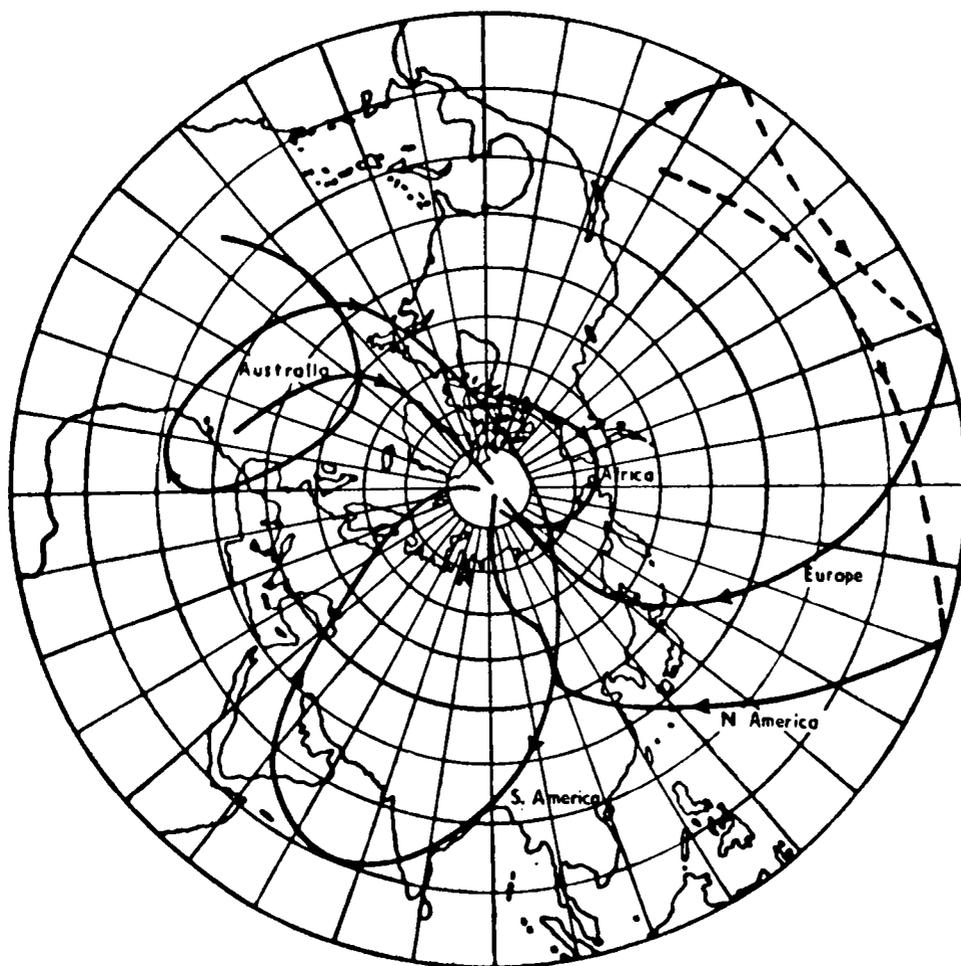


FIG. 17. — Trajectoires du pôle magnétique sur la base des mesures effectuées dans les divers continents, d'après RUNCORN.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

dessinent un mouvement de même allure pour se joindre à l'approche de la période actuelle.

Nous reproduisons ci-dessus la figure mentionnée.

D'après les renseignements qu'a bien voulu donner à l'un de nous M. BE-SAIRE, le savant directeur du Service géologique de Madagascar, le paléomagnétisme des roches de cette île a été étudié par A. ROCHE, de Clermont-Ferrand et par A. NAIRN, de Newcastle : « Seuls les basaltes crétacés ont fourni quelques

résultats assez concordants avec les méthodes de mesure différentes des deux auteurs. Il y a un déplacement des pôles d'environ 1500 kilomètres depuis le Crétacé qui concorde avec les résultats du Tanganyika ». C'est évidemment là un argument en faveur de la dérive. Toutefois cette mesure n'est pas incompatible avec l'importance du déplacement le long de grandes fractures.

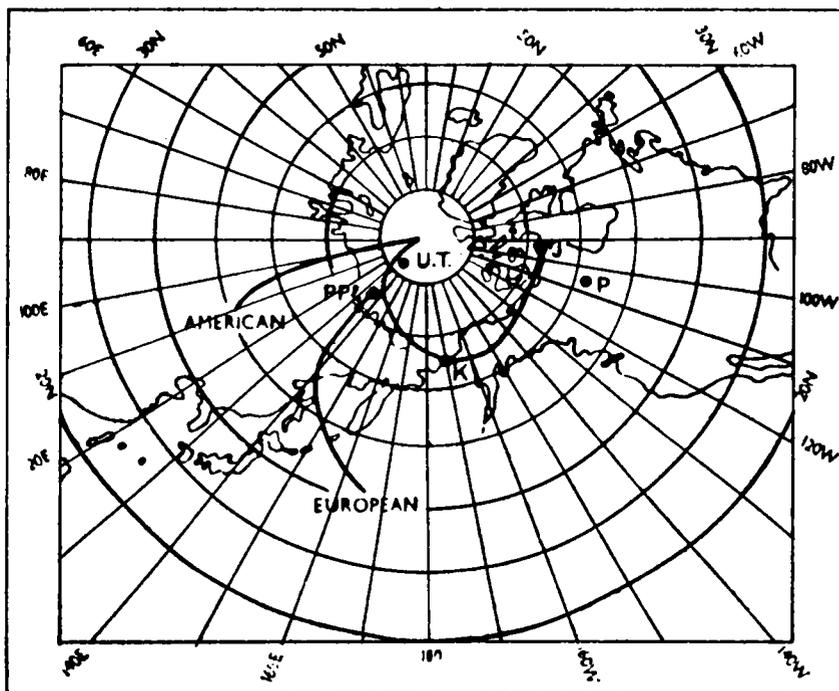


FIG. 18. — Trajectoire du pôle sur la base des mesures en Afrique, d'après NAIRN.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

Il est intéressant de considérer les résultats obtenus sur l'emplacement du pôle par rapport à l'autre extrémité du continent africain. Nous possédons quelques données à ce sujet grâce aux travaux de GOUGH et ses collaborateurs. Nous pouvons à cet effet nous reporter aux tracés reproduits par ANTON L. HALES ⁽¹⁾. A l'époque mésozoïque l'aire de dispersion est centrée sur un point situé à 65 degrés latitude sud et 75 degrés longitude est. Or la position moyenne du pôle mésozoïque dans l'Arctique est de 70° latitude nord et 100° longitude ouest. Ces chiffres concordent de façon satisfaisante.

D'après la même esquisse de GOUGH et collaborateurs, pour l'Antarctique, quelques mesures donnent un emplacement moyen de 60 degrés latitude sud et 40 degrés de longitude ouest. Le mouvement est relativement minime, mais il

(1) Anton L. HALES, *A look at the mantle*, Geotimes, juillet-août 1964, voir fig. 7.

paraît avoir été établi d'après un trop petit nombre de mesures pour qu'il soit possible d'en tirer des conclusions de quelque valeur.

Nous pouvons cependant compléter nos connaissances sur le continent antarctique en nous reportant une fois encore au même travail de RUNCORN (fig. 17, page 141). Nous constatons qu'au Tertiaire et au Quaternaire, l'emplacement du pôle se trouve bien près du pôle arctique actuel ; au Jurassique il est situé vers le centre de la Russie d'Europe ; au Dévonien sa position moyenne est dans la mer Egée. Ces déplacements sont, pour leur ampleur comparables à ceux de l'Afrique.

Par contre, les courbes du cheminement du pôle tracées par RUNCORN pour l'Amérique du Sud et pour l'Australie sont si différentes de celles résultant des mesures sur les roches de l'Antarctique et de l'Afrique, qu'il paraît difficile d'en donner une explication que ce soit sur la base de la dérive ou sur les résultats des observations géologiques.

Pour la région occupée autrefois par l'hypothétique continent de GONDWANA, nous avons trouvé des indications précieuses dans l'article du professeur K.M. CREER contenu dans l'ouvrage publié par la Royal Society of London à l'occasion du symposium organisé par ses soins en 1965 sur le problème de la dérive des continents ⁽¹⁾.

L'auteur de cet article a rassemblé les données acquises actuellement sur le paléomagnétisme par l'étude des roches des diverses parties du « continent de Gondwana » c'est-à-dire l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Inde péninsulaire, l'Australie et l'Antarctique.

Les résultats acquis sont certes remarquables et paraissent à première vue apporter une éclatante confirmation à la théorie de la dérive comme à l'existence d'un continent de Gondwana formant un bloc unique à l'époque du Permo-Carbonifère. Nous remarquons cependant que dans la reconstitution, on admet l'existence d'une large étendue marine entre l'Australie et l'Afrique contrairement à ce qu'indiquent les tracés adoptés généralement par d'autres auteurs, défenseurs de la thèse de la dérive.

Nous croyons bien faire en reproduisant une partie des conclusions de CREER :

- “ I) Gondwanaland in one form or another existed during the Palaeozoic era.
- II) During the Palaeozoic the South Pole wandered across Gondwanaland from North Africa to South Australia.
- III) Gondwanaland started to break up in the Permo-Triassic.
- IV) During the Mesozoic, Australia and India drifted further relative to the pole than Africa. The position of South America relative to the pole has not changed appreciably since the Early Mesozoic. ”

⁽¹⁾ K.M. CREER, *Paleomagnetic data from the Gondwanic Continents. A symposium on continental Drift* édité par la Royal Society of London, 1965.

Nous citerons encore une remarque du professeur CREER : des résultats définitifs ne pourront être obtenus que si l'âge paléomagnétique des roches étudiées est établi en toute certitude.

De notre côté, prenant pour exemple ce que nous avons rapporté pour l'étendue des États-Unis d'Amérique, nous ajouterons que des conclusions probantes ne pourront être établies qu'après une étude soignée des positions successives du pôle magnétique pour chacune des unités structurales entre lesquelles tout continent peut être divisé.

L'origine du géomagnétisme est encore controversée. Comme le suggère SIR BULLARD, le champ est produit et maintenu par un mécanisme d'induction ; l'énergie magnétique est empruntée à l'énergie cinétique du mouvement du fluide dans le noyau ; ce mouvement résulte lui-même de l'existence dans le noyau d'un gradient de température suffisant pour produire une convection thermique.

De son côté, ELSASSER suppose que le champ magnétique est la conséquence des courants thermoélectriques résultant eux-mêmes de la migration des électrons dans la région interne de la Terre constituée principalement de métaux ; ces courants seraient provoqués par les inhomogénéités maintenues grâce à des mouvements convectifs turbulents.

M. le professeur LAHAYE souligne que ces deux hypothèses postulent des mouvements de matières dans les parties profondes du globe. Elles pourraient, en conséquence, entraîner aussi la nécessité du déplacement de l'axe du dipôle, des axes principaux d'inertie et de l'axe de rotation, le déplacement de ce dernier suivant MUNK ne nécessitant pas des énergies élevées, contrairement aux conclusions de G. DARWIN.

Les considérations exposées par E.R. DEUTSCH sont en faveur d'un déplacement des pôles. Il convient de citer ici les conclusions de son article ⁽¹⁾ :

“ The occurrence of continental drift during the Paleozoic and Mesozoic eras is reasonably well supported by facts. Findings which offer sustenance to the case for drift in more recent times and during the Precambrien epoch are still inconclusive, but there exist no contrary evidence convincing enough to require its abandonment ”.

Dans ce même travail, il y a lieu de considérer attentivement la figure 2 donnant la trajectoire du pôle suivant les divers continents. Les tracés sont très curieusement disposés ; tous ont une allure en courbe à concavité tournée vers l'est ; tous convergent évidemment vers le pôle actuel, en rapport avec l'âge des roches considérées ; outre cela, ces courbes se succèdent dans l'ordre suivant à

⁽¹⁾ E.H.DEUTSCH, *Polar wandering and continental Drift. An evaluation of recent evidence in Polar wandering and continental Drift*, edited by Arthur C. Munyan, Soc. of econ. paleontologist and mineralogists Spec. public., n° 10, Tulsa Oklahoma, 1963.

Dans un article plus récent, publié sous le titre “ *The rock magnetic evidence for continental Drift* ” dans Spécial publication n° 9, de la Royal Society of Canada, l'auteur écrit : “ *In Summary, rock magnetism supports the occurrence — of continental Drift since the Precambrien* ”.

Faire remonter la dérive continentale aussi loin dans le temps est évidemment en contradiction avec la thèse Wegenerienne.

partir de l'Europe : Amérique du Nord, Antarctique, Australie, Inde, disposés ainsi comme des rayons d'une roue. (Fig. 19)

Le tracé des trajectoires Europe et Amérique du Nord conduit à la même conclusion que celle tirée des recherches de RUNCORN : si l'Amérique a dérivé vers l'ouest à partir de l'Europe, ce mouvement a commencé pour le moins au Cambrien, et non pas à une époque bien plus récente comme le pensait WEGENER.

A part cela, il paraît malaisé de tirer quelque conclusion d'ensemble des tracés proposés par DEUTSCH.

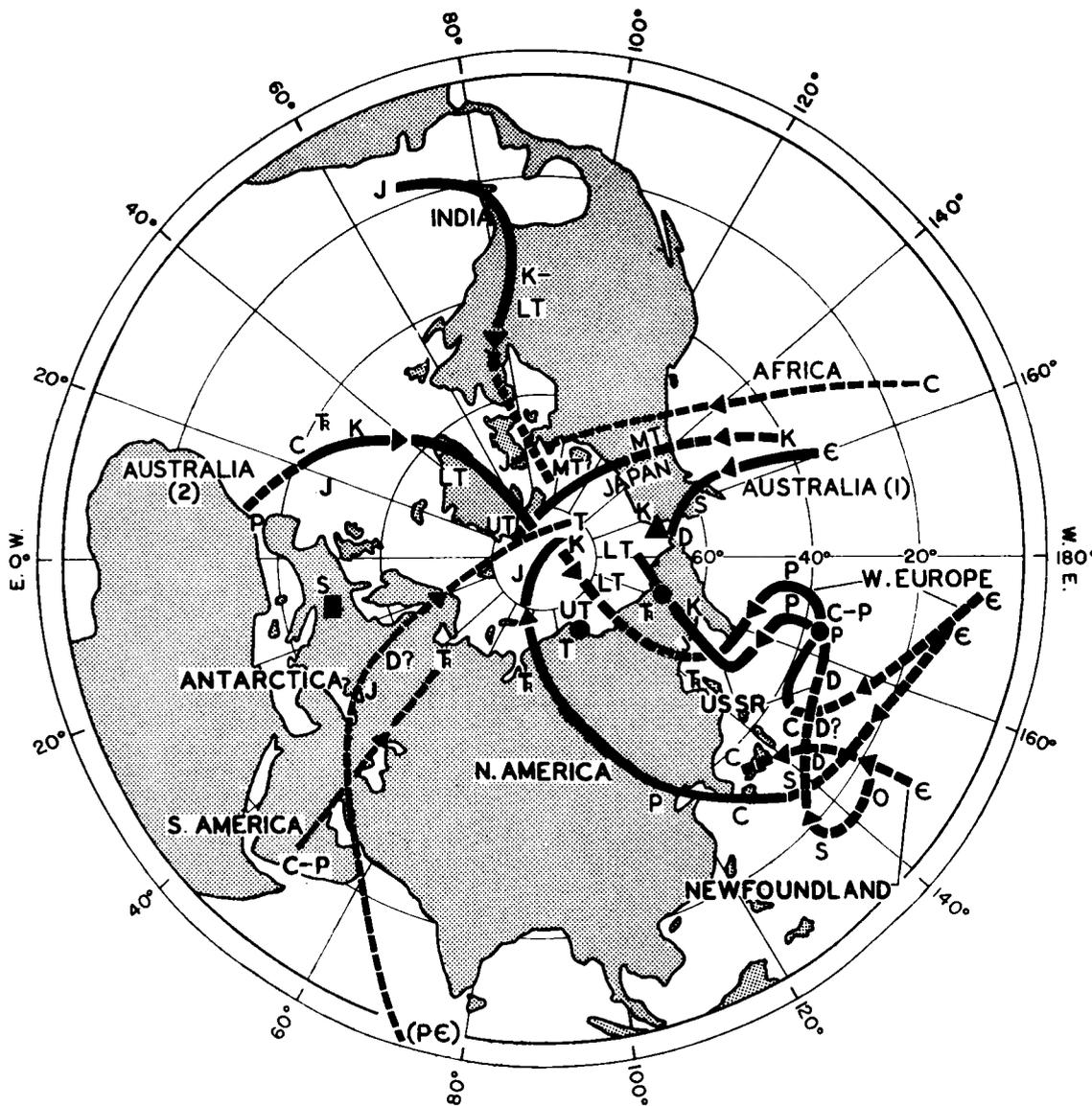


FIG. 19. — La trajectoire du pôle magnétique sur la base des mesures effectuées dans les divers continents, d'après DEUTSCH.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

En résumé, le paléomagnétisme s'avère être un instrument utile pour le géologue à la condition qu'il en soit fait l'application uniquement sur des roches ayant chance d'avoir échappé à une modification quelque peu importante de leur magnétisme rémanent, à la condition aussi d'en faire l'application avec la plus grande circonspection. Nous avons fait ressortir certaines anomalies. Nous sommes enclins à en conclure que toute considération d'ordre général basée sur de telles études devra être soumise à une critique sévère.

Les tracés proposés par RUNCORN et ses adeptes nous portent, sans aucun doute, à admettre, en dernière analyse, un déplacement du pôle magnétique sans donner cependant à celui-ci l'ampleur figurée dans certains essais.

Il ne faut pas perdre de vue que les résultats obtenus se rapportent uniquement au pôle magnétique, en admettant qu'il s'agisse de l'axe d'un dipôle étroitement lié à l'axe de rotation de la Terre. Encore, faudrait-il établir que cette coïncidence existe réellement et que les pôles géographiques ne soient pas restés dans une position immuable par rapport aux continents.

Ajoutons encore que l'ouvrage d'André CAILLEUX sur l'Antarctique ⁽¹⁾ renferme un renseignement qui mérite de retenir l'attention au sujet du déplacement des pôles : Dans le chapitre 14 consacré à la géophysique, l'auteur rapporte que le pôle magnétique austral, de 1909 à 1960, s'est déplacé de 760 kilomètres dans la direction sud-est — nord-ouest. Le pôle géographique se déplace aussi, mais de quelques mètres par an seulement et pas du tout dans la même direction.

Si ce fait est bien démontré que faut-il penser d'une liaison étroite entre l'axe magnétique et l'axe de rotation de la Terre ? Nous y reviendrons dans un instant.

C'est là une question fondamentale. Aussi pensons-nous devoir rappeler ici l'opinion de notre confrère Et. BERNARD, exposée dans une publication récente ⁽²⁾.

L'auteur rappelle tout d'abord les idées de G.H. DARWIN, de SCHIAPARELLI, de MILANKOVITCH, de GOGUEL et il ajoute que SIR H. JEFFREYS dans son magistral ouvrage " *The Earth* " après avoir fait le point et souligné les divers aspects de la question, évite de conclure tout en soulignant les difficultés à résoudre. Abordant ensuite le problème sous un autre angle, Et. BERNARD expose ses arguments en faveur de la stabilité des pôles.

Dans ces conditions, il se croit obligé d'admettre que les variations climatiques relevées par les paléontologues et les géologues, au cours des temps, sont le résultat d'une dérive en latitude des continents. Nous aurons l'occasion d'y revenir au chapitre de la paléoclimatologie.

Si l'on accepte, par contre, la thèse du déplacement en masse de la croûte terrestre sur son substratum (métastase), thèse défendue de façon remarquable par W.C. GRUSSOV, il convient de préciser :

⁽¹⁾ André CAILLEUX, *Géologie de l'Antarctique*, Publié par la Société d'édition d'enseignement supérieur, Paris, 1963.

⁽²⁾ Ét. BERNARD, *Le caractère tropical des paléoclimats à cycles conjoints de 11 et 21.000 ans et ses causes : migration des pôles ou dérive des continents*, Mém. in 8°, Acad. roy. Sc. Outre-mer, N¹^e sér., t. XIII n^o 6.

la surface suivant laquelle a pu s'opérer le déplacement de la croûte sur son substratum ; les forces capables de provoquer un tel mouvement relatif des deux masses en présence : croûte et substratum.

Ces deux questions ont été examinées par W.C. GRUSSOV.

En ce qui concerne la première, cet auteur admet que la surface de glissement se trouvait dans le Sima, parce que, les fractures du soubassement des boucliers ont livré passage à des venues basaltiques comparables au Sima. Il ajoute cependant que d'autres zones, situées par exemple sous la discontinuité de MOHO-ROVICIC peuvent avoir joué le même rôle à titre complémentaire.

Pour le second point, GRUSSOV est d'avis que les déplacements horizontaux de la croûte sont la conséquence de l'érosion sur les parties en relief de la croûte terrestre avec pour corollaire l'accumulation des produits de désagrégation sur la plate-forme continentale où s'édifient les géosynclinaux, premier stade de l'orogénèse.

Le déplacement de toutes ces masses par le jeu de l'érosion et de la sédimentation constitue une force capable de modifier les conditions d'équilibre de la croûte terrestre ; il en résulte un glissement de celle-ci avec tendance vers un nouvel état d'équilibre. En même temps, il se produit des fractures et des déformations dans la masse en mouvement qui doit s'adapter à de nouvelles conditions notamment à l'aplatissement polaire. C'est là le principe même de la métastase, terme nouveau proposé par GRUSSOV.

Un résultat intéressant des études sur le paléomagnétisme est d'avoir établi par le tracé d'isoclines que les masses continentales peuvent, au cours des temps, avoir subi un mouvement de rotation par rapport à l'équateur actuel. A titre d'exemple, pendant le Permien, l'Europe et les Iles Britanniques se trouvaient loin au Sud de leur emplacement actuel par rapport au pôle ; dans leur déplacement ultérieur elles ont subi une rotation dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre ⁽¹⁾.

Le géologue admettra volontiers qu'un mouvement de ce genre puisse se produire par suite du glissement inégal des blocs compris entre décrochements, ou par le fait de la surrection des orogènes. Pour en tirer une conclusion définitive, il faudra attendre que les études soient plus avancées qu'elles ne les ont aujourd'hui. Les déplacements et rotations envisagées par RUNCORN ⁽²⁾ et aussi par CREER pour l'Australie sont malaisément acceptables du point de vue géologique. Nous aurons l'occasion, dans un chapitre suivant de reprendre cette question sur la base des résultats acquis en paléontologie et en paléogéographie, comme en géologie. Ajoutons cependant dès à présent que, d'après les résultats acquis à l'heure actuelle, les déplacements relatifs supposés des masses continentales ne sont pas de même ordre dans les deux hémisphères. Dans l'hémisphère nord ils

⁽¹⁾ Extrait de A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, 1965, p. 1209.

⁽²⁾ S.K. RUNCORN, *Paleomagnetic evidence for continental Drift in Continental Drift*, New York and London, 1962.

auraient été d'amplitude modérée ; par contre il en fut tout autrement dans l'hémisphère opposé, si l'on se reporte notamment aux positions hypothétiques suggérées par divers auteurs pour l'Australie, l'Inde péninsulaire, Madagascar.

Dans le premier cas, les glissements d'ampleur modérée et bien ordonnée peuvent s'expliquer par le simple jeu des dislocations de la croûte terrestre révélées par les observations géologiques. Pour l'hémisphère sud, la même relation n'apparaît pas lorsqu'on examine les reconstitutions de la Pangeae et son mode de dislocation. Il serait bien étrange que ces deux parties de l'écorce terrestre aient évolué de manière aussi dissemblable.

En conclusion, les recherches entreprises sur le paléomagnétisme dans les différents continents conduisent à un résultat d'intérêt capital sauf les réserves exposées en fin de ce chapitre : les emplacements du pôle magnétique ne coïncident pas d'un continent à l'autre, voire d'une partie à une autre d'un même continent ; d'autre part ses emplacements sont d'autant plus éloignés des pôles actuels que l'on remonte plus loin dans l'histoire géologique de la Terre, au point que le pôle magnétique à l'époque du Précambrien paraît s'être trouvé tout à proximité de l'équateur actuel. Reste la question de savoir si le pôle astronomique s'est déplacé de la même quantité et dans le même sens ou bien si ces deux pôles sont restés indépendants l'un de l'autre. D'autres disciplines pourront apporter quelques données pour la solution de ce problème. Ce sera l'objet des chapitres suivants.

Enfin, si l'on peut donner une explication plus ou moins plausible du déplacement des pôles d'un continent à un autre ou d'une partie de continent par rapport à sa partie voisine, à une époque déterminée, il reste encore une énigme qui ne paraît pas près d'être résolue : c'est de connaître la raison même du déplacement des pôles.

Avant de clore ce chapitre, nous croyons devoir reproduire intégralement la note suivante qui nous a été remise par le professeur P. EVRARD, de l'Université de Liège.

Quelques remarques au sujet de la méthode paléomagnétique.

« Les remarques qui font l'objet de cette note concernant la méthode paléomagnétique et son application aux problèmes de la dérive des continents ou du mouvement des pôles, s'inspirent essentiellement d'une conférence faite par M. le Professeur THELLIER, en 1963, à Berkeley.

» C'est l'étude des caractéristiques magnétiques des terres cuites et ensuite des roches volcaniques qui a ouvert le domaine du paléomagnétisme des roches. Au cours de leur refroidissement, ces roches artificielles ou naturelles conservent en principe, la direction du champ magnétique qui existait à l'endroit où elles

ont subi cette évolution thermique, c'est ce que l'on a appelé la « thermorémance ». Les mesures ont porté ensuite sur les roches sédimentaires et sur les roches cristallines.

» On doit noter aussi une différence dans les échelles. En archéomagnétisme, on peut chercher à reconstituer des variations séculaires du champ terrestre sur de très petites périodes et la datation précise des matériaux soumis aux expériences est indispensable.

» Par contre, à l'échelle d'une époque géologique, on pense que les irrégularités de la répartition du champ magnétique sur le globe doivent disparaître et qu'un champ moyen peut être défini. Il aurait pour caractéristique celles d'un champ provoqué par un aimant fictif situé au centre de la Terre et dirigé suivant son axe géographique.

» C'est vers 1950 que ces idées se sont développées en Grande Bretagne où les premières mesures ont été effectuées. On a bientôt multiplié les mesures sur toute la surface du globe.

» Au début, prenant les déterminations des pôles moyens pour diverses époques géologiques en Grande Bretagne, on a constaté des changements progressifs de cette direction moyenne du champ magnétique et on a suggéré un mouvement des pôles magnétiques par rapport à la Grande Bretagne.

» Mais lorsqu'on a voulu appliquer cette conception à une même époque géologique pour toute la surface du globe, on a constaté des divergences dans la position du pôle moyen pour divers continents ou régions.

» On a considéré ces résultats comme une preuve de la dérive des continents.

Première remarque.

» La détermination d'un pôle magnétique par rapport à un continent, à une époque donnée, entraîne la détermination du pôle géographique à la même époque puisque l'on a supposé qu'il y avait coïncidence entre l'axe géographique du globe et un aimant fictif situé au centre de la terre.

» Le point de coordonnées géographiques ainsi calculé tombe dans une région du monde actuel qui n'était pas au pôle géographique (ou magnétique puisqu'il y a coïncidence) à l'époque considérée.

Deuxième remarque.

» Deux éléments magnétiques seulement peuvent être déterminés, sur un échantillon de roche. Ce sont la déclinaison et l'inclinaison par rapport aux directions géographiques actuelles, c'est-à-dire la direction du pôle magnétique par rapport au lieu de prélèvement de l'échantillon et la distance angulaire de ce même endroit au pôle magnétique.

» Il faut répéter que, par hypothèse, les pôles et axe magnétiques coïncident avec les pôles et axe géographiques.

» Or les observations actuelles montrent que cette hypothèse simplificatrice est fondamentalement fautive, et elle ne peut être corrigée ou améliorée. On ne peut faire mieux, en effet, que de supposer cette coïncidence.

» Les changements de déclinaison et d'inclinaison à Londres, depuis 1540, sont reproduits figure 20.

» Il résulte de ce qui précède que les deux éléments déterminés permettent tout au plus de situer, à une époque considérée, un continent en latitude (distance angulaire au pôle) et en orientation (déclinaison magnétique). Mais rien n'autorise l'indication de la position en longitude. Toutes les modifications de position présentées sur des schémas prétendant figurer des déplacements en longitude constituent un abus de confiance.

» Il faut citer quelques résultats synthétisés entre autres par P.M.S. BLACKETT et ses collaborateurs.

» En six cents millions d'années, Denver serait passé de 8° S à 40° N, Paris de 36° S à 49° N. Quant à l'Inde, au cours des 70 derniers millions d'années seulement, elle se serait déplacée de 54° du sud vers le nord et pendant le même laps de temps, aurait tourné sur elle-même de 25° . Ces derniers résultats se passent de commentaires.

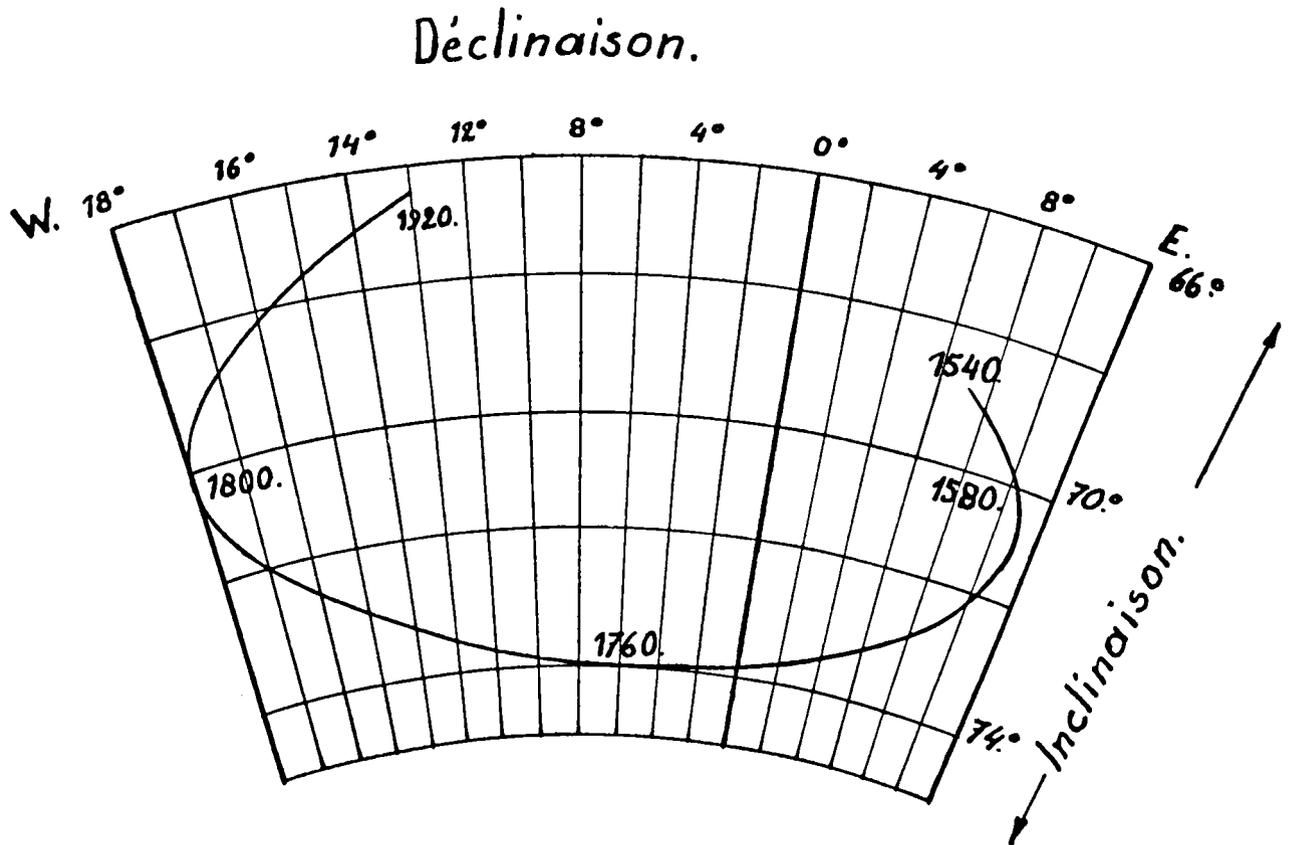


FIG. 20. — Changements de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques à Londres depuis 1540, d'après BAUER.

» Il faudrait avant tout reprendre la discussion des bases mêmes des caractéristiques paléomagnétiques des roches volcaniques, sédimentaires et métamorphiques. Je n'aborderai que très rapidement quelques points qui me paraissent particulièrement significatifs :

1° *Fossilisation originelle du champ.*

» La thermorémanence dans les roches volcaniques ne réalise pas nécessairement le parallélisme avec le champ terrestre. En effet, les laves ont pu se déformer par écoulement plastique en dessous de la température correspondant au point de Curie (500°). Une étude systématique récente, entreprise à mon instigation sur les laves de l'Etna, a montré qu'il faut écarter les échantillons scoriacés pris en périphérie d'une coulée et que, même au sein de celle-ci et à de faibles distances les uns des autres, des échantillons sains peuvent présenter des différences très sensibles. Aussi, pour qu'une mesure ait quelque signification statistique, il faut opérer un grand nombre de prélèvements.

» En outre, les actions des champs de coulées antérieures ou postérieures peuvent modifier les magnétisations originelles. On estime que ces actions secondaires provoquent des modifications pouvant aller au moins jusqu'à 10°.

» Des études faites sur des roches sédimentaires ont montré que la fossilisation du champ est acceptable en déclinaison mais qu'elle est sujette à caution en inclinaison (les erreurs peuvent atteindre jusqu'à 20° d'inclinaison).

» Les résultats obtenus sur la plupart des roches sédimentaires ont été si peu concordants qu'en 1954-55, en Angleterre, on a écarté systématiquement toutes les mesures qui n'étaient pas faites sur des roches volcaniques ou des grès rouges.

» En 1963, le Professeur THELLIER cite ce texte anglais : " In the Cretaceous of North America, there has been one determination (RUNCORN 1956) which is based on only three oriented samples; from the Jurassic of Europe, there are four determinations (HARGRAVES and FISHER 1959, GIRDLER 1960) which do not agree with one another, the poles positions differing by more than 50° ".

» Quel crédit accorder à des théories basées sur de telles données si pauvres en nombre et en qualité.

2° *Conservation des aimantations anciennes.*

» Deux phénomènes au moins interviennent postérieurement à l'acquisition par les roches, d'une certaine aimantation. Ce sont :

- a) des aimantations parasites
- b) les altérations chimiques et physiques des minéraux qui confèrent les caractéristiques elles-mêmes.

a) » Dans la première catégorie, on range « l'aimantation rémanente visqueuse », due à l'action prolongée des champs terrestres sur les roches en place et qui

peut provoquer des changements supérieurs à 10° de la direction de l'aimantation primitive.

« L'aimantation rémanente isotherme » due aux effets de la foudre, dans les environs immédiats de son point de chute, qui peut créer une anomalie locale mais très forte. On s'en libère en opérant suivant des réseaux de mesures serrés, par des prélèvements en sous-sol (puisque son action est essentiellement superficielle) et en appliquant les techniques de « nettoyage magnétique ».

b) » Les actions chimiques et physiques sur les roches de surface et sur les roches qui suivent un cycle orogénique modifient considérablement les rémanences originelles contemporaines du dépôt.

» La naissance de minéraux orientés, au cours du métamorphisme régional, confère même à certaines roches, lorsque ces phénomènes ont lieu sous pression, des caractères anisotropes entre direction des champs et rémanence. Aussi, la plupart des auteurs estiment ne devoir accorder aucune valeur aux mesures faites sur des roches très anciennes ou métamorphisées.

» Quant à l'altération atmosphérique, elle modifie profondément la minéralogie d'une roche et en particulier de ses éléments magnétiques. Aussi, il est inutile d'insister sur le peu de valeur des données obtenues sur les roches de surface.

3^o *Hypothèse du champ dipôle axial centré.*

» Cette hypothèse de base a déjà été discutée plus haut.

» On sait que les pôles magnétique et géographique sont nettement distincts à la surface du globe. D'autre part lorsque, pour certaines époques, Miocène-Pliocène par exemple, on a effectué de très nombreuses mesures au Japon, en France, en U.R.S.S., en Écosse, les pôles magnétiques calculés ont été trouvés distants de dizaines de degrés.

» Dans l'Orégon (U.S.A.), les données obtenues sur des coulées miocènes diffèrent très nettement suivant qu'il s'agit de résultats obtenus sur les parties occidentales ou orientales de ces coulées.

» Au Japon, des roches volcaniques du Pliocène ont montré un glissement continu de la latitude 75° N à la latitude 70° S durant cette époque géologique. Personne n'oserait semble-t-il imaginer un tel déplacement du Japon au Pliocène.

» D'autres données encore sont venues troubler les résultats. C'est l'inversion fréquente des champs magnétiques reconnue dans les roches volcaniques. Des expériences ont montré que cette auto-inversion de la thermorémanence n'est pas propre aux roches volcaniques mais qu'elle peut aussi affecter des sédiments.

* * *

» En conclusion, on retiendra combien il est impérieux de se montrer circonspect dans l'utilisation des données paléomagnétiques.

» La méthode en est encore à ses débuts. Elle évolue et se perfectionne chaque jour. Les contradictions que l'on a pu relever à certains moments ont mis en évidence l'existence de phénomènes inconnus il y a 20 ou même 10 ans. Aussi, les données utilisées dans des synthèses tendant à prouver les déplacements des continents, sont de qualités bien inégales.

» Certaines techniques appliquées aux échantillons prélevés récemment ont permis d'écartier les effets d'actions parasites alors que les échantillons traités antérieurement n'avaient pas été soumis à ces tests jugés actuellement indispensables.

« Il faut admettre qu'au stade actuel des connaissances du paléomagnétisme, les données fournies par cette science ne peuvent apporter qu'une confusion supplémentaire au problème si discuté de la dérive des continents. »

Après avoir pris connaissance de la note de M. EVRARD que nous venons de reproduire, M. le professeur I. DE MAGNÉE a bien voulu nous faire parvenir les observations suivantes :

» Comme le dit M. EVRARD dans sa deuxième remarque, la déclinaison et l'inclinaison paléomagnétique ne peuvent fournir d'indication sur les longitudes à l'époque géologique considérée, mais uniquement sur les latitudes et orientations. Mais il n'est pas permis d'en déduire que le paléomagnétisme ne peut mettre en évidence des changements relatifs de longitude, telle que l'écartement supposé de l'Amérique et de l'Eurafric. Ce serait bien le cas si le pôle magnétique était toujours resté, par rapport à l'ensemble de l'écorce, à peu près dans sa position actuelle.

» Mais les mesures paléomagnétiques prouvent qu'il n'en est pas ainsi, du moins pour les époques antérieures au Crétacé. Mêmes les « fixistes » les plus convaincus sont obligés d'admettre une certaine « migration des pôles » (en entendant par là un déplacement d'ensemble de l'écorce ou de la Terre entière par rapport à l'axe de rotation).

» Supposons qu'à un moment donné le pôle magnétique se trouve au beau milieu du segment qui est maintenant l'Océan Pacifique. A ce moment, le mouvement de séparation de l'Amérique et de l'Eurafric serait principalement un mouvement « en latitude ». C'est à cause de la composante en latitude que les mesures paléomagnétiques peuvent déceler un tel mouvement. La non-coïncidence des pôles pour les deux continents considérés n'est qu'une façon de mettre en évidence le décalage en latitude et en même temps la rotation de l'un par rapport à l'autre.

» Remarquons aussi que la rotation différentielle de deux blocs continentaux adjacents implique évidemment des écartements en longitude, car on ne peut décemment supposer que deux blocs puissent chevaucher l'un sur l'autre.

» L'objection formulée par M. EVRARD porte également sur la forte variation séculaire de la déclinaison et de l'inclinaison, variations dont l'influence sur les déterminations paléomagnétiques a été longuement étudiée par les géomagnéti-

ciens. Le Prof. THELLIER (1952), grâce à l'étude des fonds de fours, est parvenu à étendre les données sur la variation de la déclinaison jusqu'à 500 ans av. J.C.

» Des études sur le paléomagnétisme (coulées de l'Etna, dépôts varvés de la Nouvelle Angleterre, basaltes d'Islande) ont donné des résultats analogues pour une bonne partie du Pléistocène : variations de déclinaison de $+ 35^{\circ}$ à $- 25^{\circ}$, avec périodes d'oscillation de 750 à 2000 années. Il s'agit d'une espèce de précession de l'axe magnétique autour de l'axe de rotation, avec une amplitude maximale de 60° (rappelons que le pôle sud magnétique se trouve actuellement sur le cercle polaire antarctique).

» Pendant la sédimentation d'une seule formation de roches rouges, il est donc normal qu'il se produise de nombreuses oscillations de ce genre, faisant passer la *déclinaison* de l'Est à l'Ouest et influençant aussi l'*inclinaison* suivant le même rythme millénaire.

» La *dispersion* des pôles calculés pour une même époque géologique, d'après les données paléomagnétiques, s'explique *en partie* par ces variations. En remplaçant le « nuage » de points par un point moyen ou une « ellipse de confiance », *on croit* avoir éliminé jusqu'à un certain point l'effet de la variation séculaire en même temps que celui des erreurs de mesure.

» Il n'est cependant pas démontré *a priori* que le mouvement des pôles magnétiques soit à peu près symétrique par rapport à l'axe de rotation. Il pourrait donc subsister une erreur systématique. Mais celle-ci ne peut pas être très importante et de toutes façons ne peut expliquer la différence systématique, décroissante en fonction du temps, de la position calculée des pôles pour l'Amérique d'une part, l'Eurasie d'autre part.

» Quant aux remarques de M. EVRARD sur la « fossilisation » du champ magnétique, il est vrai que beaucoup de types de roches sédimentaires et éruptives ont donné des résultats décevants, voire aberrants ou impossibles. Cela prouve simplement que ces roches sont inutilisables, le champ originel n'étant généralement pas bien conservé par leur « mémoire magnétique ».

» Ce sont les roches sédimentaires rouges qui ont donné les meilleurs résultats, c'est-à-dire *cohérents* pour une époque géologique donnée et pour une vaste région. Les mesures sont non seulement cohérentes entre elles, mais aussi avec les données paléoclimatologiques ⁽¹⁾.

» Le stade « théorie » ou « hypothèse de travail » est nettement dépassé. L'indice le plus sûr qu'il en est bien ainsi est que pour les périodes postérieures au Cambrien, il est désormais possible de prévoir presque à coup sûr l'inclinaison et la déclinaison magnétique rémanentes d'une roche rouge quelconque. C'était le cas pour le poudingue de Malmédy.

» Contrairement à ce que dit M. EVRARD, les inversions du champ magnétique terrestre ne troublent pas du tout les résultats, bien au contraire. Et il ne s'agit

⁽¹⁾ Par exemple, une roche rouge détritique déposée dans une mer « chaude » (associée à des évaporites ou des récifs coralliaires par exemple) montrera nécessairement une faible inclinaison magnétique.

pas du tout d'« auto-inversions » ! On sait depuis plusieurs années que ces inversions affectent l'ensemble du globe et toutes les roches, au point qu'elles sont devenues un outil précieux pour la corrélation stratigraphique.

» En bref, beaucoup de critiques que le Professeur THELLIER formulait en 1963 sont maintenant dépassées, notamment celles relatives aux données insuffisantes en quantité ou en qualité.

» La situation est en somme comparable au développement actuel des méthodes géochronologiques (âges absolus) dont les promoteurs ne se sont pas laissés décourager par des résultats parfois contradictoires ou difficilement interprétables. On ne peut nier que, dès à présent, ces méthodes ont énormément accru nos connaissances sur le Précambrien.

» En conclusion, on peut dire qu'en ce qui concerne l'hémisphère nord, le paléomagnétisme est *en faveur* d'une dérive, mitigée ou non, mais *ne la démontre pas* de manière irréfutable. Il en est de même pour l'hémisphère sud.

» Par contre, le paléomagnétisme démontre nettement une importante migration des pôles, *en excellent accord* avec les conclusions basées sur la paléoclimatologie (ceintures arides, évaporites, récifs coralliaires). On ne peut croire à une coïncidence fortuite des résultats de deux méthodes aussi dissemblables et indépendantes l'une de l'autre. »

Après l'exposé des considérations émises par M. DE MAGNÉE en réponse à M. EVRARD, nous croyons bien faire en attirant l'attention du lecteur sur l'intérêt qu'il convient d'attacher aux variations de la déclinaison et de l'inclinaison magnétique à Londres, telles qu'elles figurent sur la carte jointe à la note de M. EVRARD ; ces variations très marquées, sont, en effet, fonction du déplacement des pôles magnétiques. Or, il ne viendra à l'idée de personne d'admettre qu'en un laps de temps de moins de quatre siècles, il ait pu se produire une dérive de quelque importance.

Ces chiffres sont à comparer à ceux que nous avons rapportés ci-avant (page 146) d'après André CAILLEUX et qui intéressent un délai beaucoup plus court.

Dans ces conditions, on peut se demander s'il n'y a pas lieu de revoir la base même de la théorie du paléomagnétisme dans son application à la compréhension des phénomènes géologiques. N'est-il pas aléatoire de vouloir y trouver la preuve la plus manifeste de la dérive des continents telle que la concevait WEGENER.

De même que les remarques du professeur THELLIER rapportées ci-avant, la note du Professeur EVRARD nous porte à envisager la thèse de la dérive avec circonspection. Certes, les résultats acquis par les spécialistes du paléomagnétisme sont remarquables. Il nous paraît cependant bien délicat de vouloir y trouver une preuve de la théorie de WEGENER. D'autres arguments sont à prendre en considération et nous sommes amenés à nous demander si le simple jeu des phénomènes géologiques normaux n'est pas apte à fournir l'explication des déplacements relevés entre continents ou entre parties d'un même continent.

CHAPITRE III

LA PALÉOCLIMATOLOGIE

Les reconstitutions basées sur la connaissance du paléomagnétisme nous ont laissé dans l'incertitude sur le point de savoir jusqu'à quel point les pôles astronomiques se sont déplacés avec les pôles magnétiques au cours des périodes géologiques.

La paléoclimatologie est apte à jeter quelque lumière sur ce problème ; on sait, en effet, que les zones climatiques de la nature actuelle, sont, dans leurs grandes lignes, disposées parallèlement à l'équateur. S'il en était de même pour les temps anciens, vis-à-vis de l'équateur actuel, ce serait un indice en faveur de l'indépendance relative entre les pôles astronomiques et les pôles magnétiques.

D'autre part, la paléoclimatologie peut apporter des indications intéressantes à propos du déplacement des continents les uns par rapport aux autres, ou bien d'un glissement d'ensemble de la croûte par rapport à l'axe des pôles.

Des essais de reconstitution des anciens climats ont été tentés par bien des auteurs en tenant compte des variations de la flore et de la faune en ordre principal, mais aussi de la composition des sols fossiles, de la nature et des caractères de certains sédiments, telles les évaporites, les sables éoliens, etc.

Les données climatiques propres aux continents ne nous parviennent cependant que par un certain détour ; il faut essayer de les dégager de celles qui sont propres au milieu marin et d'en dissocier les anomalies dues à des effets perturbateurs ; les facteurs dynamiques du climat tels les vents, sont généralement effacés.

De nouvelles méthodes sont précieuses et il convient de citer les recherches de UREY sur la base du rapport O^{16}/O^{18} de l'oxygène de la calcite des organismes marins considérée comme en équilibre isotopique avec l'eau environnante ⁽¹⁾.

A. L'UTILISATION DES PALÉOFLORES.

Parmi les travaux récents, il convient de citer celui du professeur G. BAIN du Amherst College ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Comme l'établit VOIGT, (*Zur Frage der Klima Kurven der Oberkreide in Mitteleuropa*, in *Colloque de Paléoclimatologie*, Cologne, 1964), la méthode conduit à des interprétations qui paraissent en contradiction avec les faits. Il importe d'envisager avec prudence les résultats acquis par cette méthode géochimique ; ils doivent toujours être confrontés avec les données générales tirées des êtres vivants.

⁽²⁾ G. BAIN, *Climatic Zones throughout the ages*, in *Polar Wandering and continental Drift*, Soc. of Econ. Paleontologists and Mineralogists. Tulsa, Oklahoma, 1963.

L'auteur admet comme démontré le déplacement des pôles astronomiques comme des pôles magnétiques au cours des temps sur la base du paléomagnétisme.

A la lecture de son article, on garde l'impression que BAIN renonce à tout déplacement relatif des continents les uns par rapport aux autres ; il semble plutôt admettre un glissement en masse de la croûte terrestre sur son soubassement. Ses essais de reconstitution des zones climatiques à des époques successives depuis le Protérozoïque jusqu'aux temps présents sont intéressants à cet égard.

Au Protérozoïque il devait exister, d'après l'auteur, une aire équatoriale, marquée par l'alignement de récifs d'algues, qui passait par l'archipel canadien, le Maroc, l'Afrique Australe, l'Australie. A cette ceinture équatoriale, si différente de la zone équatoriale actuelle, correspondait une aire polaire avec tillite située dans le Tian-Shan, à la base du système sinien, lequel se présente là avec le facies détritique.

Le professeur N.D. OPDIJKE, de SALISBURY (Rhodésie du Sud) ⁽¹⁾ aboutit à des résultats comparables à ceux obtenus par G. BAIN. Dans les conclusions très brèves de son article, on relève la phrase suivante :

“ The distribution of subtropical climatic indicators during the Palaeozoic is not latitudinal with respect to the present equator. These indicator appear north of the Arctic Circle in the Permian and continue in these high latitudes to the Cambrian. This distribution is difficult or impossible to explain given the present relationship of the continents and of the earth to the sun. The existence of a Palaeozoic glacial period makes the existence of a climatically unzoned earth improbable.

” It is possible to fund the latitudinal spread of these indicators relative to the paleomagnetic equators. When this is done it is seen that the spread of these indicators fall beyond the range expected of them from a study of Cainozoic climates. Glacial deposits are then at high latitude and bioherms, bauxites and evaporites at low latitudes. It appears therefore that the weight of palaeoclimatic information supports continental drift as predicted by palaeomagnetism ⁽²⁾ ”.

Le professeur Martin SCHWARZBACH a dressé une série de cartes montrant l'évolution des zones climatiques depuis l'époque actuelle jusqu'à l'Ordovicien. Ces cartes ont le mérite de mettre en évidence une évolution progressive, mieux peut-être que ne le permettent les essais du professeur Georges BAIN, bien que, en fin de compte, les résultats obtenus par ces deux savants soient comparables.

L'examen des esquisses de SCHWARZBACH permet de constater que, pendant la durée des temps cénozoïques et mésozoïques, l'orientation des zones est sensiblement parallèle à l'équateur actuel. Par contre, en remontant davantage dans le passé, il apparaît déjà au Trias une tendance au déplacement de l'équateur qui

⁽¹⁾ N.D. OPDIJKE, *Paleoclimatology and Continental Drift*, International Geophysics series, vol. I. Continental Drift edited by S.K. Runcorn, p. 41. Academic Press, New York and London, 1962.

⁽²⁾ L'auteur ajoute que P.M.S. Blackett arrive à des conclusions analogues.

s'incurve vers le nord, dessinant une courbe à concavité tournée vers le sud, à l'endroit du continent africain, pour passer un peu au nord de la boucle du Niger.

Cette déviation s'accroît progressivement au fur et à mesure que l'on envisage des formations plus anciennes, avec cependant quelques oscillations. A l'époque du Dévonien moyen la déformation est maximale, car suivant le méridien de GREENWICH, l'équateur est reporté vers le nord jusqu'à hauteur du 60^e parallèle. De part et d'autre, il tend à se rapprocher de sa position actuelle en passant à hauteur de Panama d'une part, dans les îles de la Sonde d'autre part, Cette courbure de l'équateur est en relation avec le développement des calottes glaciaires en Amérique du Sud et en Afrique Australe à l'époque du Carbonifère supérieur et du Dévonien moyen.

Les tracés proposés par BAIN et par SCHWARZBACH sont en accord avec le principe de la migration des pôles. Ils partent l'un et l'autre de l'idée d'un glissement de la croûte terrestre tout entière sur son soubassement, et non pas du principe de la dérive individuelle des continents les uns par rapport aux autres.

Dans une communication présentée à la réunion annuelle de 1964 de la Geological Society of America, P. FRICKER ⁽¹⁾ a donné quelques renseignements sur les conditions climatiques de l'Archipel Canadien. Il conclut de la façon suivante : En comparaison avec le Paléozoïque, le climat dans l'Archipel Canadien était plus frais au Mésozoïque et au Tertiaire bien que la flore indique un climat tempéré. En se basant sur l'existence d'une plus grande uniformité des climats avant le Quaternaire, on peut accepter la notion de la stabilité des continents de l'hémisphère nord en latitude ; il y a ainsi concordance avec le climat post-paléozoïque d'autres régions arctiques.

Par contre, suivant les vues de l'auteur les conditions climatiques du Paléozoïque sont difficiles à concilier avec la thèse de la stabilité des continents.

Du point de vue qui nous occupe, nous voyons ainsi que l'orientation des zones isoclimatiques anciennes est sensiblement parallèle à l'équateur actuel du moment que l'on ne remonte pas dans l'échelle des temps au-delà de la fin du Paléozoïque. Il en est ainsi que l'on prenne pour base les idées de SCHWARZBACH ou celles de FRICKER.

On est tenté de croire, à la suite de ces données que la distribution générale des masses continentales était déjà très semblable à celle d'aujourd'hui à partir de la fin du Paléozoïque. Or si l'on se reporte aux trajectoires des pôles tracées par RUNCORN dans l'hémisphère nord, il y a concordance avec ces données de la paléoclimatologie : Depuis le Permien, l'écart entre la courbe américaine et la courbe de Grande Bretagne est réduit à peu de chose ; nous avons vu antérieurement que cette observation n'est pas favorable à la thèse wegenérienne, notamment en ce qui concerne l'ouverture de l'Atlantique nord ; les recherches des paléoclimatologistes ne démentent pas cette conclusion.

⁽¹⁾ P.E. FRICKER, *Paleoclimate of the Canadian Arctic Archipelago and some implications on the Problem of Continental Drift*, Program 1964 Annual Meetings of the Geol. Soc. of America (Résumé).

Pour les époques antérieures, la question est tout autre.

Sur la base de la répartition des flores fossiles, F. STOCKMANS et Y. WILLIÈRE ont tenté de reconstituer les zones climatiques d'autrefois ⁽¹⁾.

On comparera, avec intérêt, leur tracé des zones de végétation, au Stéphanocarbonifère (Fig. 21) avec la reconstitution des zones climatiques esquissée pour cette époque par G. BAIN. On est frappé aussitôt de la dissemblance entre ces deux esquisses. Dans celle de BAIN, les zones s'allongent suivant une direction presque normale à l'équateur actuel ; dans celle de STOCKMANS et WILLIÈRE les zones de végétation lui sont approximativement parallèles.

Cette dissemblance tient en partie au fait que BAIN n'a pas mis dans la même zone les bassins carbonifères d'Amérique-Europe et ceux de l'Afrique saharienne et qu'il a inclus dans la zone équatoriale des dépôts de l'ouest de l'Amérique du Sud qui sont sans doute plus apparentés à ceux renfermant la flore à *Glossopteris*.

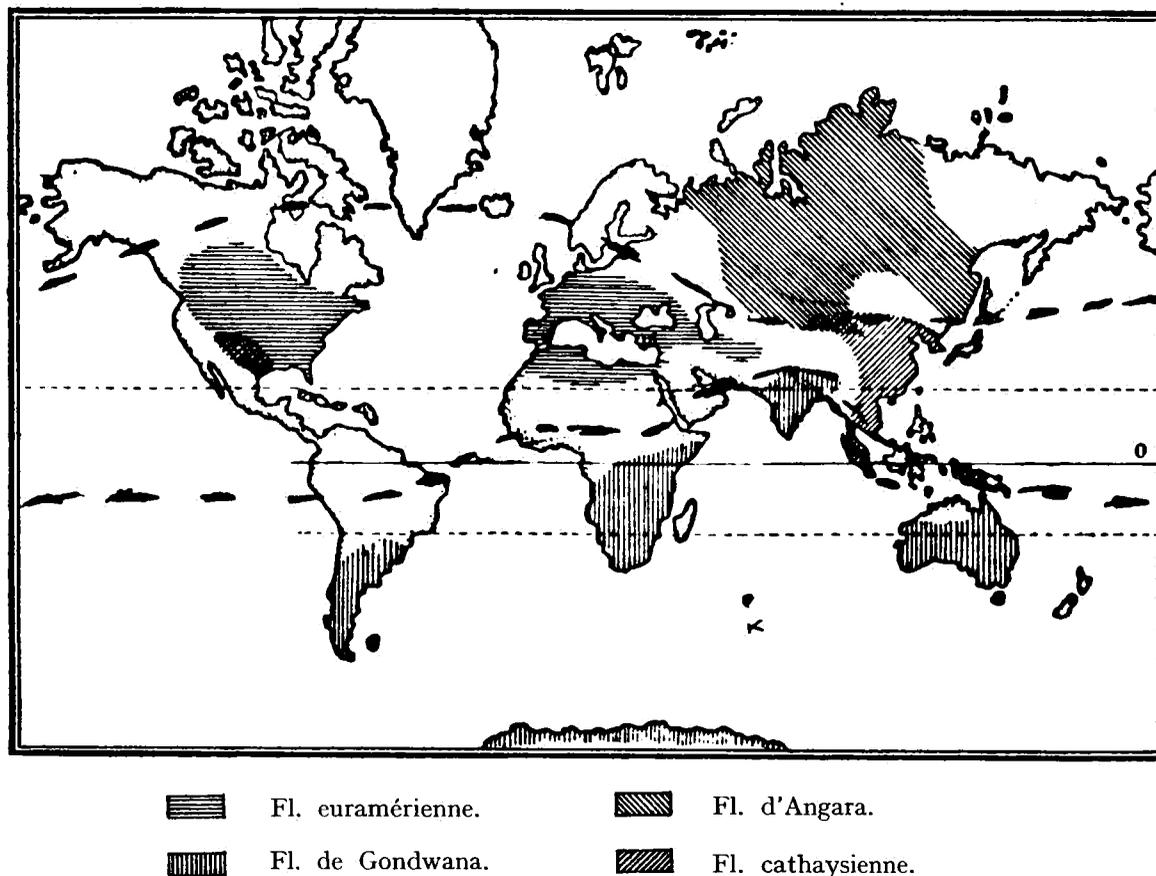


FIG. 21. — Les zones climatiques, d'après les flores stéphanopériennes, d'après GOTHAN et WEYLAND. Repris de STOCKMANS et WILLIÈRE. La surcharge en traits interrompus souligne l'allure générale de ces zones.

⁽¹⁾ F. STOCKMANS et WILLIÈRE, *Flores anciennes et climats*, Les Naturalistes belges, t. 44, 1963, Bruxelles.

A cet égard, les tracés de SWARZBACH d'une part, de STOCKMANS et WILLIÈRE d'autre part pour la période carbonifère concordent davantage. A propos du travail réalisé par STOCKMANS et WILLIÈRE, il convient de faire observer qu'au Carbonifère, les zones climatiques semblent être déformées ou déviées à la traversée de l'Atlantique et du Pacifique, comme le sont, d'ailleurs, les zones climatiques de l'époque actuelle, comme elles le sont aussi, d'après CHANEY, à l'époque éocène (Fig. 22). Ne peut-on pas trouver là un argument en faveur de la permanence de ces deux grands océans, ce qui n'est pas en contradiction avec les données de la Géologie ⁽¹⁾ ?

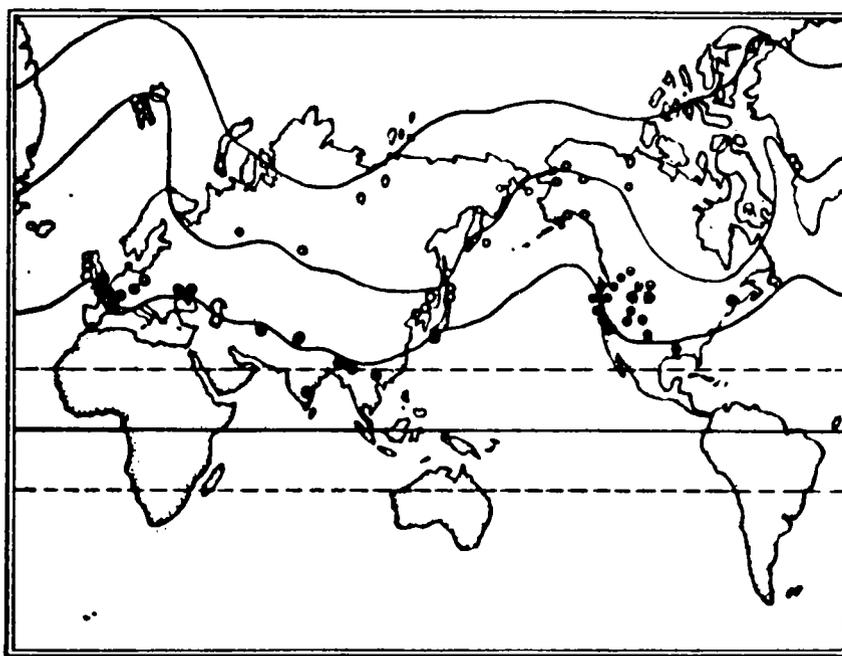


FIG. 22. — Les flores de l'hémisphère nord à l'Éocène, d'après CHANEY (in STOCKMANS et WILLIÈRE).

Ces reconstitutions conduisent encore à une remarque importante : Durant les temps cénozoïques, une flore arbustive s'est développée dans les hautes latitudes, jusque près de 80 degrés. Il ne serait pas possible d'admettre que dans les conditions actuelles, des arbres aient pu vivre sous ces latitudes et permettre la formation de dépôts de combustible. Il faut concevoir non seulement l'existence d'un climat plus chaud, mais aussi un éclaircissement différent de ces parties du globe, peut-être sous l'action d'une cause extérieure que les astronomes pourront préciser.

Ces divers essais relatifs à la paléoclimatologie s'accordent ainsi sur un point important : A la fin des temps tertiaires comme pendant tout le Cénozoïque et le Mésozoïque, le climat était tempéré, voire relativement chaud *au voisinage*

⁽¹⁾ M. le professeur Stockmans nous fait observer que les tracés de Chaney ne lui paraissent pas appuyés par un nombre suffisant d'observations.

des deux pôles. C'est de façon relativement brusque que s'est instauré en Arctique et en Antarctique, au Quaternaire une période glaciaire importante et cela sans modification appréciable de la position des pôles par rapport à la configuration géographique actuelle de la surface du Globe. Un tel changement ne semble pas avoir pu se produire sans l'intervention d'un facteur exceptionnel peut être extérieur à la Terre.

Si ce raisonnement vaut pour le Quaternaire, n'est-il pas à envisager tout aussi bien pour d'autres périodes caractérisées par la grande extension des glaciations, telle par exemple celle de Gondwana — Karroo ? A cette époque aussi, il y eut un changement brusque dans les conditions de vie si l'on en juge par les caractères de la flore. La situation n'est certes pas strictement identique à celle du Quaternaire ; il n'empêche qu'il y eut, à une époque comme à l'autre des modifications quasi-brutales du climat, de durée relativement courte, dans une suite continue de conditions plus propices à un grand développement de la végétation.

Nous ajouterons qu'au Groenland, à Trail Island, entre 72 et 73 degrés de latitude nord ; on connaît du Namurien et du Westphalien à plantes. Certains de ces fossiles sont communs dans nos régions à la même époque.

Si l'on tient compte des données acquises sur le Westphalien du Sud-Oranais, vers 30 degrés de latitude nord, dont la flore a été étudiée par JONGMANS ⁽¹⁾, on doit admettre l'existence d'un climat sensiblement uniforme sur 50 degrés de latitude. JONGMANS écrit à ce propos :

« Il est remarquable de voir que la flore entière trouvée dans ces régions concorde avec celle des pays qui, dans les temps carbonifères, étaient situés au nord de la Téthys ».

D'autre part, la même réflexion serait de mise pour les dépôts du Carbonifère inférieur d'Égypte étudiés par JONGMANS et S. VAN DER HEIDE, dans le bassin de Ras Gharib au bord de la mer Rouge.

Il en est ainsi également pour les dépôts du Carbonifère inférieur de l'Oued Korifla, au Maroc, par 37° 7 latitude nord ⁽²⁾.

Si l'on s'en rapporte à ce qu'a écrit Texeira sur le Houiller du bassin de Tete (Zambèze) où les espèces européennes voisinent avec les représentants de la flore de Gondwana ⁽³⁾, c'est sur une extension de 90 degrés en latitude que la flore apparaît sensiblement constante indiquant des conditions climatiques assez semblables sur une telle étendue. C'est là un argument important en faveur d'une uniformité relativement grande des climats en dehors des phases glaciaires.

Nous avons dit précédemment que les tracés des zones climatiques proposés par G. BAIN à l'époque du Carbonifère diffèrent grandement de ceux établis par

⁽¹⁾ W.J. JONGMANS et P.C. DELEAU, *Les bassins houillers du sud Oranais*, Livre II. *Contribution à l'étude paléontologique*, Bull. Service carte géol. Algérie, 1^{re} série, paléontologie, n° 13, 1951.

⁽²⁾ E. CHOUBERT et A. FAURE-MURET, *Note sur une flore du Carbonifère inférieur de L'oued Korifla (région de Rabat)*, Notes du Service géologique du Maroc, t. XX (Notes et mémoires n° 152), 1961.

⁽³⁾ M. de Magnée nous signale que la flore de Tete est essentiellement de type gondwanien ; il convient donc de faire quelque réserve aux conclusions que l'on croirait pouvoir tirer des déterminations de Texeira.

STOCKMANS et WILLIÈRE. On s'étonne de voir BAIN placer la flore d'Angara dans une zone à climat plus chaud que la flore cathaysienne, plus étroitement apparentée à la flore euraméricaine.

On serait tenté de tenir compte du mémoire de G. HART ⁽¹⁾ sur les miospores du Permien pour appuyer l'un ou l'autre de ces tracés, mais le professeur F. STOCKMANS pense que, pour ce cas précis, il faut s'en référer avec prudence à ce travail, en présence des noms génériques adoptés et aussi de la présentation des tableaux de répartition ; ceux-ci visent surtout à comparer ces ensembles de l'hémisphère nord à ceux de l'hémisphère sud et, cela en bloc, quelle que soit la province paléobotanique qui les a fournis. On aurait aimé aussi trouver dans ce travail une colonne spéciale consacrée à la province cathaysienne par exemple.

Des changements importants dans les conditions de vie ne sont pas pour étonner le géologue et le paléontologue. Des preuves en ont été données pour diverses régions. C'est ainsi que M^{lle} Fr. BEUCHER a établi, par analyse pollinique qu'une végétation de caractère tempéré, actuellement disparue, s'est largement développée au Sahara durant le Quaternaire ⁽²⁾.

D'autre part à l'époque stampienne, d'après P. GRANGEON ⁽³⁾, le climat de la Limagne devait être tropical, analogue à celui qui règne aujourd'hui au Brésil, en Insulinde, dans l'est de l'Australie.

En tenant compte du type de végétation du Spitzberg et de l'Antarctide au Tertiaire et au Secondaire, le professeur LEBRUN s'exprime comme suit :

« Il y a eu, en effet, des formations végétales thermophiles dans ce qui est actuellement l'aire des pôles. L'existence de cette végétation est incompatible avec un régime d'éclairement saisonnier tel que le connaissent de nos jours les régions polaires.

» Les faits biologiques sont évidents, Il est extrêmement difficile de croire que cette végétation ait à ce point changé d'appétence écologique que sa localisation ait eu une tout autre signification que celle qui lui est attribuée aujourd'hui. Il est impensable que la vie végétale — et surtout les autotrophes — aient modifié leur comportement ».

Notre confrère estime que l'explication doit en être cherchée dans la dérive des continents ou dans le déplacement des pôles. Toutefois, il y a lieu de noter que, d'après les estimations basées sur le paléomagnétisme, le déplacement des pôles a été très minime depuis le début du Tertiaire ; si l'on veut faire appel à la dérive des masses continentales on se heurte à une autre objection : cette dérive était pratiquement achevée ou sur le point de l'être.

Les figures 23 et 24 sont très parlantes à cet égard.

N'est-ce pas alors à des causes extérieures, astronomiques notamment, qu'il faut faire appel : variations du rayonnement solaire qui ne pourrait cependant

⁽¹⁾ J.F. HART, *The systematics and distribution of the Permian Miospores*, 1966.

⁽²⁾ C. R. Acad. Sc. Inst. France, t. CCLVI, n° 10, 4 mars 1953, p. 2205.

⁽³⁾ Revue des Sciences naturelles d'Auvergne, vol. XXIV, 1958.

pas compenser la longue nuit polaire ; ou bien variations de l'inclinaison de l'axe de la Terre sur le plan de l'écliptique, bien qu'à priori ce soit en contradiction avec les principes mêmes de la mécanique céleste classique.

D'autre part, dans l'ouvrage de F. STOCKMANS et WILLIÈRE, on relève la phrase suivante qui met en évidence la généralité du phénomène (p. 338) : « Il reste un fait certain, c'est que des régions arctiques et antarctiques aujourd'hui

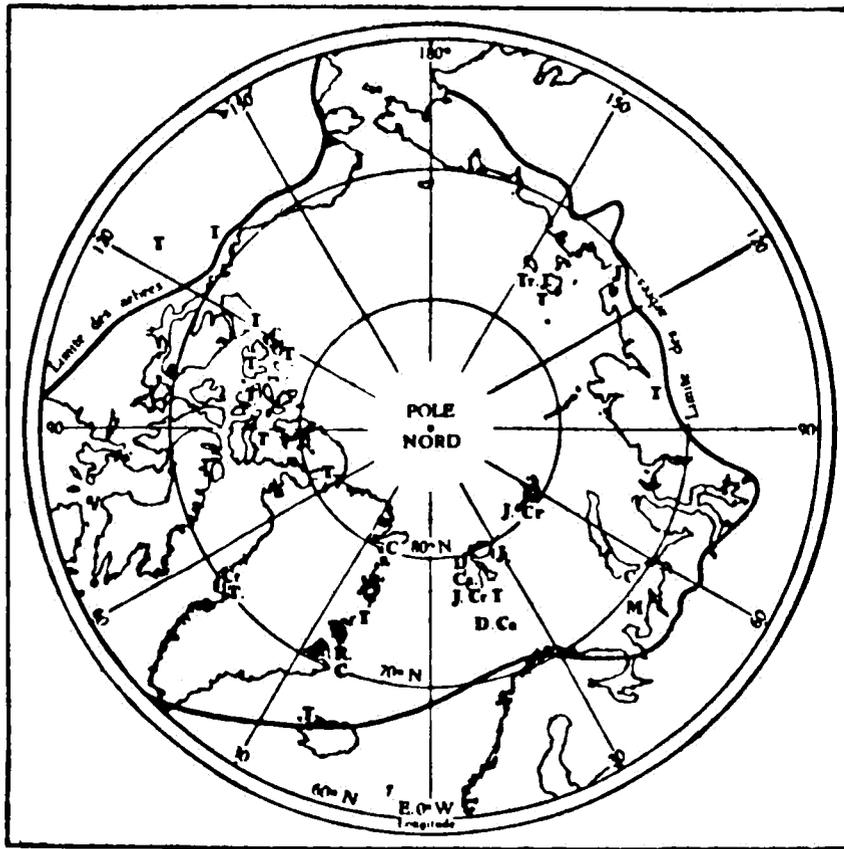


FIG. 23. — Gisements de plantes fossiles des régions arctiques et limite septentrionale actuelle des arbres.

D, Dévonien, Ca, Carbonifère ; Tr, Triasique ; J, jurassique, Cr, Crétacique ; T, Tertiaire.

(Adaptés, d'après A. SEWARD, 1931, p. 532, fig. 137).

inhabitables pour des plantes arborescentes vasculaires furent colonisées par une végétation abondante : au Dévonien, au Carbonifère, au Permien, au Trias, au Jurassique, au Crétacé, au Tertiaire... » (Voir fig. 23 et 24).

A ce propos, nous croyons utile de signaler à l'attention du lecteur la note publiée en 1958 par O. BARBOSA sur les formations de Gondwana au Brésil et dans les régions environnantes ⁽¹⁾. La flore la plus ancienne de Gondwana, et celle datant du Stephanien renferment un mélange de plantes de type euraméricain. L'auteur écrit à ce propos :

⁽¹⁾ O. BARBOSA, *On the age of the lower Gondwana floras in Brazil and abroad*, Publ. XX^e sess. Congrès géol. intern., Mexico, 1956. Commission de Gondwana.

“ The intrusion of boreal elements into the Gondwana florulas, which developed during the interglacial epochs, shows that the ecological conditions for the formation of coal were not very different in both hemispheres. The two floras had only a different development and adaptation ”.

On peut voir dans ces conclusions une indication précieuse en faveur d'une tendance à une uniformisation des climats bien plus grande à certaines époques

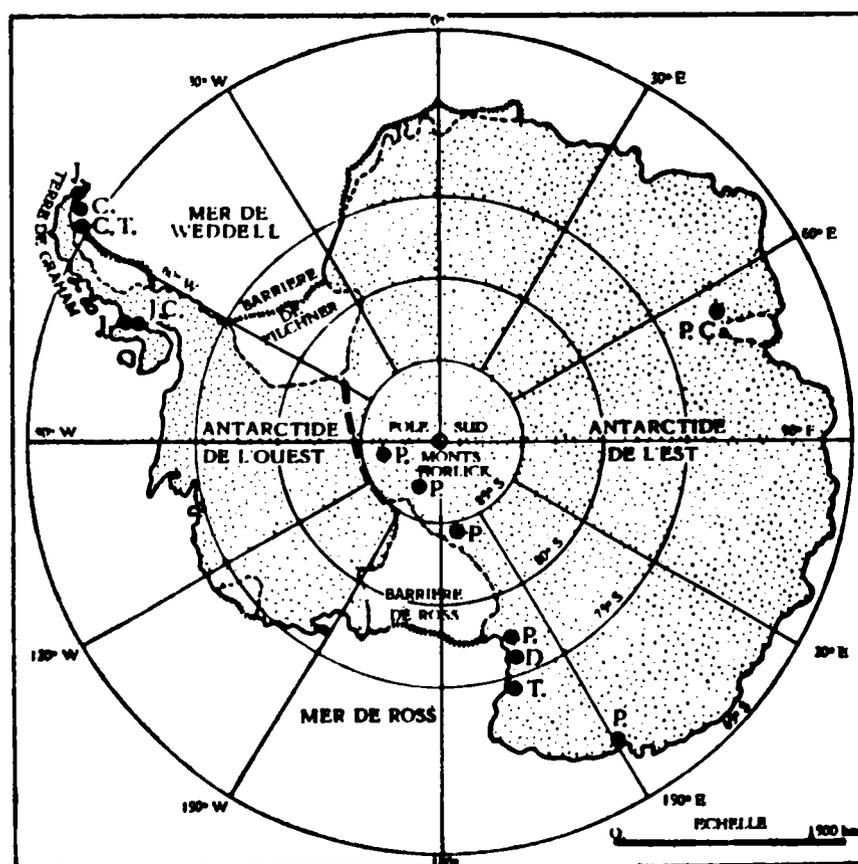


FIG. 24. — Gisements de plantes fossiles repérés dans l'Antarctide.

D, Dévonien ; Ca, Carbonifère ; P, Permien ; J, Jurassique ; C, Crétacique ; T, Tertiaire.

qu'elle ne l'est dans les temps actuels, lesquels sont encore vraisemblablement sous l'influence de la phase glaciaire du Quaternaire.

Les données fournies par O. BARBOSA mettent encore en évidence le fait qu'à l'époque de Gondwana, les phases glaciaires ne constituent que des stades passagers venant interrompre brusquement les conditions normales de vie à la surface de la Terre. C'est là un fait sur lequel doit porter spécialement l'attention de ceux qui se sont assigné pour tâche de reconstituer les conditions climatiques aux époques successives de l'histoire de la Terre.

Aussi nous a-t-il paru utile de réserver quelques pages à l'examen spécial des glaciations ; ce sera l'objet du chapitre suivant.

En résumé, en tenant compte des données acquises sur les flores fossiles, depuis le Dévonien jusqu'au Tertiaire supérieur, on arrive à la notion d'une tendance à une uniformité plus grande des climats entre l'équateur et les pôles qu'on ne l'observe aujourd'hui ; cette tendance fut troublée pendant des périodes relativement courtes, correspondant au développement des grandes calottes glaciaires ; elle existerait probablement encore aujourd'hui sans l'intervention de la glaciation du Quaternaire.

B. L'UTILISATION DES FAUNES ANCIENNES.

Parmi les animaux fossiles, les Coelentérés constructeurs de récifs [Stromatoporoïdes, Coraux Tétracoralliaires et Tabulés] ont retenu spécialement l'attention.

De nos jours, les coraux constructeurs de récifs obéissent à des conditions écologiques très strictes, notamment la température et la profondeur. Ce sont ces facteurs, et notamment le premier, qui sont à la base de toutes les reconstitutions paléoclimatiques qui ont fait usage de ces organismes.

Mais il ne faut pas perdre de vue que les coraux constructeurs actuels ne s'identifient pas aux Coelentérés responsables des calcaires construits du Paléozoïque. Les Stromatoporoïdes, qui ont joué à cette époque un rôle primordial, ont disparu depuis le Mésozoïque. Les Tabulés, qui suivent dans l'ordre d'importance, n'ont pas de successeurs actuels ; eux aussi sont éteints depuis le Mésozoïque et leur rôle constructeur avait pratiquement cessé depuis le Dévonien supérieur.

Quant aux Tétracoralliaires, qui n'ont pas dépassé le Paléozoïque, ils divergent par tant de caractères, notamment par leur structure tétramère, des Madréporaires actuels, à structure hexamère, que leurs relations phylogéniques avec leurs successeurs mésozoïques, tertiaires et modernes sont toujours controversées. Peut-on se croire autorisé, dans ces conditions, à transposer dans le Paléozoïque les conditions climatologiques qui règlent la localisation et le développement des récifs coralliens actuels ? La prudence s'impose d'autant plus que des observations évidentes dans le Paléozoïque conduisent à admettre sans le moindre doute que les Tétracoralliaires et les Tabulés ont généralement contribué à construire des masses récifales dans des conditions de profondeur et de turbidité prohibitives pour les Madréporaires modernes.

Au surplus, après le Dévonien, ou du moins après le Strunien situé par les uns au sommet du Dévonien, par les autres à la base du Dinantien, les Coelentérés n'interviennent plus, ou qu'à titre tout à fait accessoires dans la formation de calcaires construits. N'empêche qu'on a souvent attribué, sans critère évident, au phénomène constructeur carbonifère et permien, la même signification paléoclimatique qu'aux récifs coralliens actuels.

Aussi n'est-ce qu'après une longue hésitation que le professeur M. LECOMPTE a accepté de tenter de reconstituer les zones récifales, construites à l'intervention

totale ou partielle des Cœlentérés, depuis l'Ordovicien jusqu'à nos jours. Cette étude est loin d'être terminée car elle exige une discrimination que la littérature rend le plus souvent très malaisée et, d'autre part, les renseignements manquent encore sur de vastes régions, notamment dans l'hémisphère sud.

L'état présent d'avancement du travail permet de dégager une constatation intéressante, toutes réserves étant faites, pour les raisons mentionnées, sur son interprétation, c'est que, dans l'hémisphère Nord tout au moins, les zones construites se succèdent en se chevauchant légèrement du Nord au Sud en bandes plus ou moins parallèles à l'équateur actuel, depuis l'Ordovicien jusqu'à nos jours. Dans l'hémisphère sud les observations sont trop incomplètes pour autoriser même un schéma.

C'est aussi par une étude attentive des coraux du Paléozoïque et du Mésozoïque et de leur mode de croissance que le professeur TING-YING H.MA., de l'Université de Taïwan a cherché à mettre en évidence les déplacements de la croûte terrestre au cours des périodes géologiques ⁽¹⁾. Il est arrivé aux résultats suivants :

a) Les mers à coraux du Paléozoïque et du Mésozoïque ont subi un déplacement angulaire par rapport à la situation des bassins de même condition de la nature actuelle, jusqu'à prendre une direction presque à angle droit avec celles-ci.

b) Les zones occupées par des récifs coralliens ont, par la suite, été brisées en fragments qui peuvent appartenir actuellement à des continents différents, établissant ainsi la réalité d'un déplacement des parties de la croûte terrestre les unes par rapport aux autres.

c) La comparaison des aires à coraux de deux périodes consécutives, permet de constater qu'il y eut dans l'intervalle un déplacement angulaire, dû à la migration des pôles en plus du déplacement des continents.

Les travaux du professeur T.Y.A. Ma dont personne ne contestera le grand intérêt, se basent cependant sur deux postulats discutables :

1. La distribution et les conditions écologiques des récifs coralliens et des coraux paléozoïques suivent les mêmes lois que celles qui régissent les coraux modernes et leurs constructions.

On a vu plus haut la fragilité des fondements de cette opinion qui conditionne toutes les déductions du savant chinois.

2. Les déplacements des continents seraient subits. En dérivant d'une latitude faible à une latitude élevée, les continents se soulèveraient et pourraient atteindre une hauteur favorable aux glaciations.

C'est une conception que ne partagent pas facilement ceux qui pensent que les phénomènes de déformation de la croûte terrestre constituent un mécanisme

⁽¹⁾ Voir notamment : T.Y.H.MA., *Climate and the relative positions of Continents during the Upper Carboniferous as deduced from the growth values of reef corals*, Congr. intern. palaeontol. Union, 1960. Copenhague.

— *A comparison of palaeomagnetic latitudes and palaeogeographical latitude deduced from growth values of reef corals*, XIII^e gen. Assembly of I.U.G.G. Helsinki, 1960.

— *Continental Drift and Polar Wandering*, XIII^e gen. Assembly of I.U.G.G. Helsinki, 1960.

lent et que le sima, s'il y avait déplacement de la croûte sialique, s'y ajusterait automatiquement.

Dans son ouvrage sur les anciens climats, M. SCHWARZBACH ⁽¹⁾ n'a pas manqué de faire appel aux récifs coralliens. La figure 122 que nous reproduisons a pour objet de mettre en évidence la migration de la zone récifale au cours des périodes géologiques (figure 25).

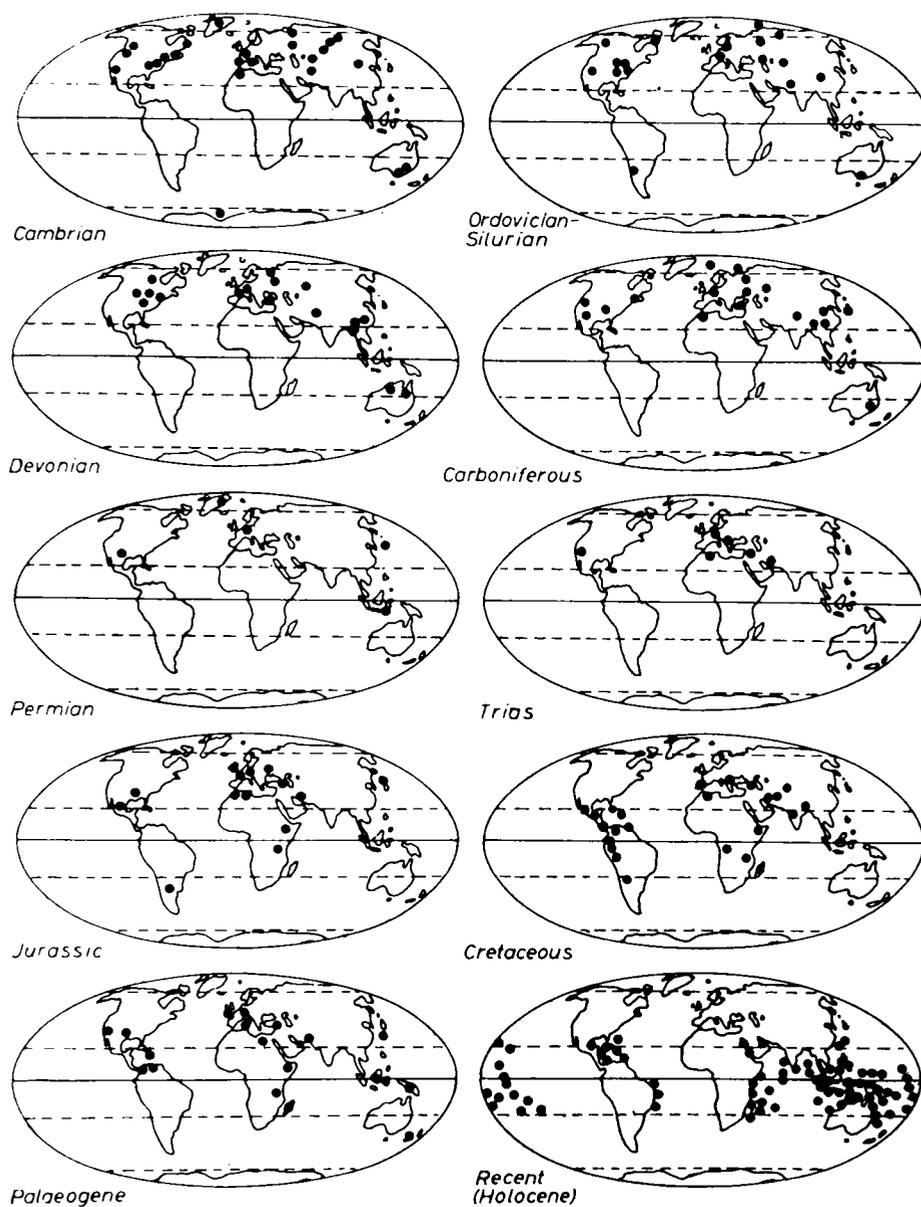


FIG. 25. — Les zones à récifs coralliens depuis le Cambrien, d'après SCHWARZBACH. (Fig. 122).

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).

⁽¹⁾ M. SCHWARZBACH, *Climates of the Past*. D. van Nostrand Company Ltd. Londres, 1962.

Ces reconstitutions comparées à la situation actuelle sont évidemment sujettes à caution parce que les données recueillies pour les périodes anciennes se rapportent uniquement à des formations édifiées dans des mers épicontinentales, tandis qu'à l'Holocène le domaine océanique actuel est seul à prendre en considération y compris les îles et les hauts fonds distribués dans les océans profonds.

Malgré cette difficulté, on est frappé par le fait que, dans la nature actuelle, les récifs coralliens sont en très grande majorité situés dans la zone intertropicale tandis qu'aux époques antérieures, ils s'étendent sur une aire beaucoup plus large, *mais tout spécialement dans l'hémisphère nord.*

On est autorisé, semble-t-il à en conclure que *le climat s'est différencié progressivement des pôles vers l'équateur.* Cette conclusion est alors conforme à celle tirée de la répartition des flores depuis l'époque dévonienne tout au moins.

Il n'empêche que cette carte dressée par SCHWARZBACH fait ressortir clairement l'influence des glaciations à l'époque du Permo-Carbonifère. Si, à cette époque, les récifs sont refoulés vers le nord, *la zone occupée par eux reste, dans ses grandes lignes, parallèle à l'équateur.*

Il y a là matière à réflexion et surtout à critique, notamment sur le point de savoir si les coraux des époques anciennes exigeaient les mêmes conditions de milieu que les coraux constructeurs de récifs de la nature actuelle.

Nous ajouterons que les données fournies par SCHWARZBACH sur la base des coraux s'accordent bien mieux avec le tracé des zones climatiques anciennes proposé par notre confrère STOCKMANS qu'avec les tracés imaginés par BAIN.

Nous voudrions encore faire remarquer qu'aux époques anciennes, les récifs coralliens semblent s'avancer davantage vers le sud le long de la bordure occidentale du Pacifique. Ce fait pourrait trouver son explication dans la présence d'un courant chaud en cette partie du Grand Océan comme dans la nature actuelle. Nous croyons trouver là un argument en faveur d'une répartition géographique très semblable à celle qui existe aujourd'hui.

Peut-être pourrait-on renforcer cet argument en notant le déplacement vers le nord de la même zone pendant le Paléozoïque au nord de l'Océan Indien, disposition à mettre en parallèle avec le report dans la même direction de l'équateur thermique actuel.

On pourrait voir dans ces faits un argument en faveur de la permanence dans l'arrangement des massifs continentaux au cours des périodes géologiques.

Les reconstitutions des anciens climats d'après la faune conduisent encore à d'autres constatations. A titre d'exemple, la mer du Jurassique supérieur ⁽¹⁾ devait avoir, dans l'ouest de l'Europe, un climat tropical à subtropical. La région « boréale » restait confinée à l'Arctique actuel où devait régner un climat modéré.

Au Crétacé supérieur, comme l'indiquent la faune et la flore, le climat de la Pologne était chaud, non tropical.

(1) ZEGLER, *Boreale Einfluence in Oberjura Westeuropas*, Colloque de Paléoclimatologie, Cologne, 1964.

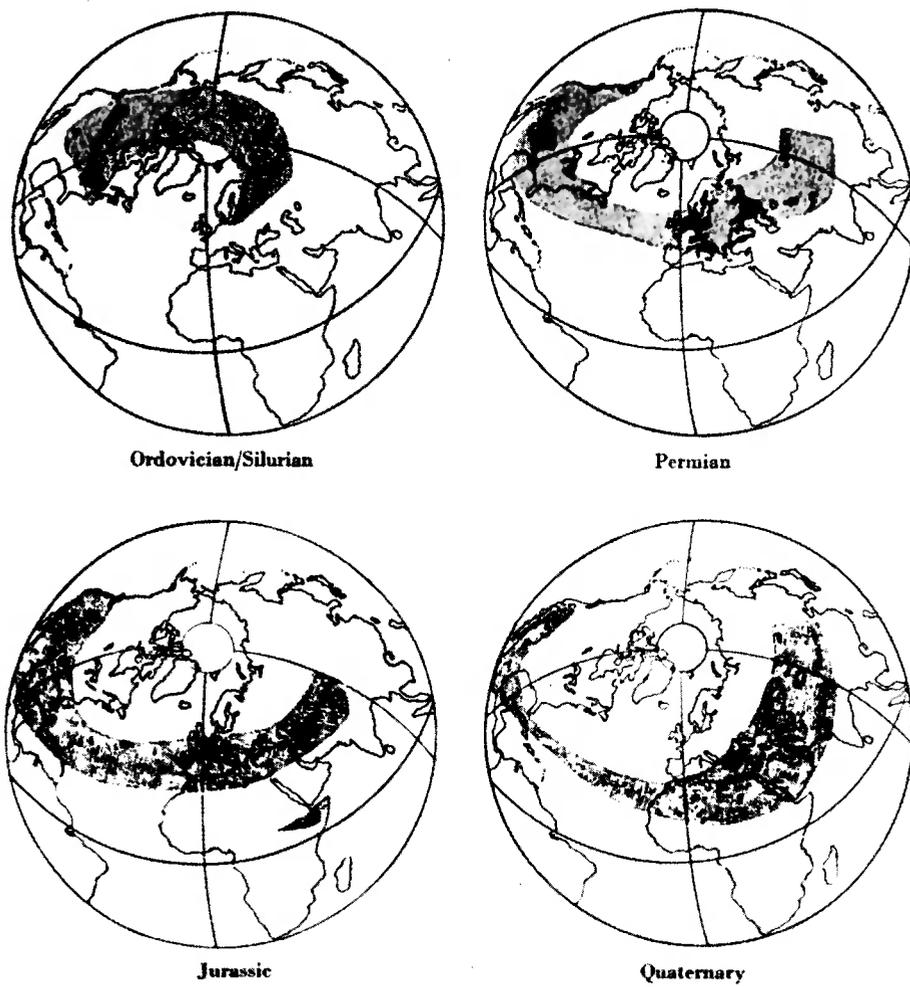


FIG. 26. — La distribution des évaporites au cours des périodes géologiques, d'après SCHWARZBACH.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).



Les déductions tirées de l'étude de la faune concordent ainsi, dans les grandes lignes avec celles que nous avons rapportées pour la flore : *tendance à l'existence d'un climat plus uniforme qu'actuellement entre le pôle et l'équateur.*

C. LES SÉDIMENTS EXCEPTIONNELS.

Dans ce qui précède, il a été question en ordre principal de l'utilisation des flores et partiellement des faunes pour déterminer la nature probable des climats d'autrefois.

Il convient d'ajouter cependant que les auteurs ont tenu compte également des dépôts de bauxite, des évaporites, des dépôts éoliens, des dépôts désertiques.

A ce sujet, il y a lieu de signaler que G.P. EATON ⁽¹⁾ dans un article intitulé : " Windborne volcanic ashes, a possible index to polar wandering ", propose d'utiliser cette nouvelle méthode pour déterminer la direction probable des courants aériens aux époques anciennes ; comme ces courants sont liés, dans la nature actuelle, à la distribution géographique des structures par rapport aux pôles, il y aurait là un moyen de se rendre compte des déplacements éventuels de ceux-ci.

Pour ce qui concerne l'utilisation des évaporites nous nous sommes encore reportés à l'ouvrage de M. SCHWARZBACH sur les climats des époques anciennes ⁽²⁾. La figure 121 de cet ouvrage (Fig. 26) est particulièrement instructive. L'auteur a voulu représenter les variations dans la distribution des évaporites à l'Ordovicien-Silurien, au Permien, au Jurassique et au Quaternaire dans l'hémisphère nord. La zone figurée se rapproche de plus en plus de l'équateur au fur et à mesure que l'on considère une période plus récente. Il n'empêche qu'à toutes ces époques les dites zones, en forme d'anneau ont pour centre le pôle boréal actuel.

On est forcément amené à croire que les climats ont varié au cours des temps, mais que les zones climatiques restaient néanmoins parallèles à l'équateur actuel. Si cette conclusion est exacte on en vient à supposer que les déplacements des pôles magnétiques, dont la réalité est évidente, n'entraînent pas nécessairement un déplacement parallèle des pôles astronomiques. Aussi, pour ce qui concerne l'hémisphère nord on peut se demander si les non-coïncidences des emplacements des pôles magnétiques d'un continent à l'autre ne sont pas dues essentiellement au jeu des grandes dislocations de l'écorce terrestre sans qu'il soit nécessaire de considérer à l'exemple de WEGENER, DU TOIT, TUZO WILSON et d'autres savants l'existence d'une Pangeae unique il y a 150 à 200 millions d'années.

Il est bon de mentionner ici ce qu'a écrit André CAILLEUX dans son ouvrage sur la géologie de l'Antarctique au chapitre consacré à la paléogéographie. Il souligne un fait remarquable, qui demande évidemment confirmation par de

⁽¹⁾ Journal of Geology, vol. 72, n° 1, janvier 1964.

⁽²⁾ M. SCHWARZBACH, *Climates of the Past*. D. van Nostrand Company Ltd. Londres, 1962.

nouvelles recherches : Au sujet de la ressemblance entre les dépôts permo-triasiques de l'Antarctique et ceux de même âge des autres terres de Gondwana, il note que, dans les territoires de l'Amérique du Sud, de l'Afrique, de l'Inde et de l'Australie, les grès sont *rouges*, tandis que, dans une bonne partie de l'Antarctique ils sont *blancs*. C'est peut-être, pense-t-il, l'indice d'un climat moins chaud dans l'Antarctique. Cet argument doit être manié avec circonspection, car il existe à la même époque, sur le territoire africain non seulement des grès rouges, mais aussi des grès blancs.

CONCLUSIONS.

On se rend compte par la lecture de ce qui précède de la complexité du problème des reconstitutions paléoclimatiques. Il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine, d'autant plus que certains éléments nous échappent pour les périodes anciennes. Rappelons à ce sujet ce dont le professeur VAN MIEGHEM nous a fait part : « Parmi les facteurs conditionnant la circulation générale de l'atmosphère, la topographie de la surface terrestre ainsi que la répartition des terres et des mers jouent un rôle déterminant.

« Il en résulte que toute modification importante, à grande échelle, de l'un de ces facteurs doit se répercuter sur le climat de la terre ⁽¹⁾ ».

Les causes possibles des variations du climat dont les terrains sédimentaires gardent la trace, sont certainement multiples : déplacement des continents ou de leurs fragments, glissement de la croûte terrestre tout entière par rapport à l'axe de rotation, balancement de l'axe des pôles, variations de la radiation solaire, etc. Rappelons ici que dans son adresse présidentielle à la Geological Society of London, le 26 avril 1961, le professeur HOLLINGWORTH déclare :

« The theory that fluctuations in solar radiation is a major factor in climatic change finds increasing favour among meteorologists » ⁽²⁾.

A ce propos, il y a lieu de tenir compte des considérations exprimées par M. Edg. CASIER dans une publication récente ⁽³⁾. Certes, il serait trop long de résumer, même très succinctement, les idées de son auteur ; nous nous contenterons de signaler certains points qui touchent de près au problème soumis à notre attention. A cet effet, nous reproduisons simplement les conclusions exposées par l'auteur de cet ouvrage (pages 38 et 39).

« Arrivés à ce point de l'exposé, nous pouvons dresser le tableau des grandes modifications climatiques susceptibles de s'être présentées au cours des temps

⁽¹⁾ Séance du groupe de travail du 7 décembre 1963, Annexe 1.

⁽²⁾ Quarterly Journal of the Geological Society of London, n° 469, vol. CXVIII, part. I, issued 30-3-1962.

⁽³⁾ Edg. CASIER, *Propos sur l'importance des fluctuations de l'activité solaire dans le déterminisme des transgressions marines et d'autres facteurs physiques de l'évolution de la biosphère*, Bull. Inst. roy. Sc. Natur. de Belgique, t. XXXVIII, n° 45, Bruxelles, novembre 1962.

géologiques et d'être intervenues, en concurrence et de façon plus ou moins déterminante, dans les transformations du peuplement de la biosphère, ainsi que de leurs causes immédiates :

« 1^o Réchauffement (ou refroidissement) général et élargissement corrélatif des zones chaudes (ou froides), par suite des variations du rayonnement solaire total reçu par la surface de la planète.

« 2^o Modifications climatiques par perturbations dans la circulation atmosphérique, elles-mêmes conséquences d'une accentuation des phénomènes électromagnétiques (ou de leur réduction) associée aux variations solaires.

« 3^o Accroissement (ou régression) des effets thermiques, plus ou moins locaux, des eaux de transgression (comme dans le cas des transgressions océaniques), par variation d'intensité des transgressions (ou régressions) ainsi que par celle des courants de fronts glaciaires, le tout conditionné par les modifications géographiques résultant elles-mêmes des transgressions (ou des régressions) et avec déphasage, toutefois négligeable à l'échelle géologique.

« 4^o Modifications climatiques par fluctuations du taux de CO² dues notamment à des variations de l'activité volcanique et, dans une certaine mesure, à l'extension (ou au recul) de la végétation (?).

« 5^o Déplacement de zones climatiques par :

a) troubles des mouvements du globe ;

b) déplacement relatif des pôles par suite de déplacement, en réalité des aires continentales (subordonné à l'hypothèse de la dérive).

« 6^o Accentuation (ou atténuation) du cycle saisonnier par variation de l'obliquité du plan de l'écliptique (?).

« Des diverses relations exprimées plus haut, on peut, d'autre part, conclure que ces changements climatiques seraient attribuables à des fluctuations de grande amplitude de l'activité solaire, directement pour celui visé au 1^o, plus ou moins indirectement pour les autres.

« Il n'est toutefois pas possible d'écarter les phénomènes internes du globe en tant que facteur capable de modifier directement la température moyenne de celui-ci. Un tel réchauffement du globe, en apparence « par ses propres moyens », serait éventuellement à considérer comme conséquence secondaire de perturbations dans les courants magmatiques envisagées plus haut et, dans ce cas, à verser aussi à l'actif de l'irrégularité du rayonnement solaire ».

Bien que des doutes très graves subsistent encore, les résultats des recherches sur les paléoclimats permettent peut-être d'envisager un glissement d'ensemble de la croûte terrestre, en conformité avec les conclusions que d'aucuns veulent tirer de l'étude du paléomagnétisme.

Cependant, la question reste posée de savoir s'il ne peut pas y avoir eu également dérive au sens de WEGENER. Les connaissances acquises sur la géologie

des continents et en partie aussi des fonds océaniques nous permettront d'envisager cet aspect du problème, notamment en vue de préciser s'il y eut ou non une Pangée ou bien si les masses continentales ont été depuis leur origine séparées les uns des autres.

Toutefois, avant d'aborder ce sujet, il convient de rappeler ici l'opinion de notre confrère Et. BERNARD. En s'appuyant sur des observations géologiques et notamment sur les travaux de KORN relatifs à la signification des niveaux à varves connus dans le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur de Thuringe, dans l'Éocène moyen de la Green River au Colorado et dans le Crétacé de l'Arkansas, Et. BERNARD conclut à une dérive des continents en latitude, dès la fin du Paléozoïque.

Il convient de faire observer ici que la présence de dépôts à varves n'implique nullement l'existence d'un climat de nature tropicale ; on connaît des formations présentant ces particularités qui sont en relation avec les phénomènes glaciaires tant au Quaternaire dans les régions nordiques qu'à des époques plus anciennes comme au Carbonifère supérieur dans d'autres régions du globe, et notamment en Afrique Centrale.

D'autre part, la présence de sédiments à caractère tropical en Thuringe ou au Colorado n'étonne pas si l'on se rappelle les observations rapportées précédemment sur la tendance à plus d'uniformité du climat en latitude pendant de longues périodes de l'histoire de la Terre sans qu'il soit besoin de faire appel à une dérive en latitude.

C'est durant le Tertiaire que des changements systématiques ont commencé à se produire. Il est intéressant à cet égard de citer les conclusions d'un article récent de W.R. RIEDEL et Br. M. FUNNELL sur les sédiments tertiaires de l'Océan Pacifique ⁽¹⁾.

Les observations de ces auteurs ont porté sur des sédiments d'âge éocène à quaternaire prélevés dans un espace compris entre 45 degrés latitude nord et 45 degrés latitude sud et entre 151 degrés longitude est et 73 degrés longitude ouest. Ils en ont tiré les conclusions suivantes :

a) Au *Miocène* et au *Quaternaire* la distribution des courants était comparable à celle que l'on connaît aujourd'hui, sauf peut-être un léger déplacement vers le nord (5°) de la limite nord du courant équatorial et probablement un déplacement de 5° vers le sud de la limite méridionale du courant subarctique à la longitude de 173° W. ⁽²⁾.

b) Pendant l'*Oligocène*, la limite nord du courant équatorial était à 7 degrés de latitude au nord de sa position actuelle aux environs de la longitude de 130 à 50° W ; la limite sud coïncidait à peu près avec sa position actuelle.

⁽¹⁾ W.R. RIEDEL and Br. M. FUNNELL, *Tertiary sediment core and microfossils from the Pacific Ocean floor*, Quart. Journ. Geol. Soc. of London, N° 479, 1964.

⁽²⁾ Pendant le Quaternaire, il y eut, en divers endroits, des réchauffements passagers. Voir à ce sujet : D. McCULLOCH and D. HOPKINS, *Evidence of an early recent warm interval in north Western Alaska*, Bull. geol. Soc. of America, vol. 77, n° 10, octobre 1966.

c) A l'*Eocène*, la limite nord du courant équatorial était située à 9 degrés au nord de sa position actuelle entre 135 et 65 degrés de longitude ouest.

La comparaison de ces données confirme la thèse du retrait progressif des zones climatiques vers l'équateur à l'approche du Quaternaire. On y verra sans doute l'annonce de la période glaciaire de cette époque.

Des résultats du même ordre nous sont communiqués par MM. ALLEGRE, BOULANGER et JAVOY ⁽¹⁾ à propos du Tertiaire du bassin de l'Aquitaine. En appliquant la méthode d'UREY on constate un abaissement progressif de la température du milieu de l'Yprésien au Stampien. On y verra, comme pour le Pacifique, l'influence de l'approche de la période glaciaire du Quaternaire dans le nord de l'Europe.

Il résulte de cet exposé que les recherches sur les climats anciens mettent en évidence deux faits intéressants :

a) Le climat fut relativement chaud, ou tempéré pour le moins, de l'équateur jusqu'au voisinage des régions polaires depuis le Cambrien jusque vers le milieu du Tertiaire, sauf au Permo-Carbonifère caractérisé par le grand développement des glaciations de l'époque de Gondwana. C'est seulement à partir du Tertiaire moyen que les conditions climatiques des régions polaires se différencient nettement de celles des régions plus proches de l'équateur. Ce changement bien apparent a débuté il y a environ un million d'années et il s'est manifesté en même temps dans l'Arctique et dans l'Antarctique.

b) Il semble résulter aussi du tracé des zones isoclimatiques que l'hémisphère nord a joui d'une température moyenne plus élevée que l'hémisphère sud pendant la majeure partie des temps géologiques. Cette différence tient sans doute à la distribution des masses continentales.

A ce propos, on a signalé, au Brésil notamment, des variations climatiques notoires au Paléozoïque ⁽²⁾. Au Permo-Carbonifère, notamment le climat était chaud à l'endroit du bassin de l'Amazone et de Parnaíba, tandis qu'il était froid dans le sud (Parana). Au Dévonien les facies des formations sédimentaires indiquent un climat chaud dans le bassin de l'Amazone, tandis que, dans les bassins de Parnaíba et de Parana, le même terrain est caractérisé par une faune froide australe ⁽³⁾.

Notons encore que les tracés des zones climatiques et phytologiques anciennes font apparaître un décalage systématique de 15 à 20 degrés de latitude vers le nord, de l'hémisphère septentrional par rapport à l'hémisphère méridional. Ce fait est important car il semble être en harmonie avec une constance dans la répartition des masses continentales pendant toute la durée des temps géologiques ⁽⁴⁾.

⁽¹⁾ Compte-rendus dommaires des séances de la Société géologique de France, 4 novembre 1963.

⁽²⁾ C. R. du Congrès de Climatologie, Cologne, 1964 (résumé par P. Michot).

⁽³⁾ C. R. du Congrès de Climatologie, Cologne, 1964 (résumé par P. Michot).

⁽⁴⁾ Voir à ce sujet : P. FOURMARIER, *Principes de Géologie*, 3^e édition, tome II, Paris-Liège, 1950.

Même si on se rallie à la thèse d'une dérive importante des continents (type WEGENER, TUZO WILSON, par exemple) il faut admettre que jusque vers la fin du Tertiaire, le climat était tempéré ou même chaud jusqu'à une distance relativement faible des pôles. C'est de façon relativement brutale que s'est instaurée en Arctique comme en Antarctique une phase glaciaire importante, sans modification appréciable de la position des pôles par rapport à la configuration géographique actuelle. Il y a donc lieu de faire intervenir l'action d'un facteur exceptionnel.

Si ce raisonnement vaut pour le Quaternaire ne peut-on pas penser à l'appliquer pour d'autres périodes, telle la période du Karroo-Gondwana. Toutefois les conditions n'étaient certes pas identiques à celles de la phase quaternaire, parce que l'asymétrie polaire y est autrement marquée quant à l'extension des dépôts glaciaires.

Le but final de la paléoclimatologie est de déterminer la cause des changements climatiques. Les principes généraux de la météorologie, la théorie physique de la circulation de l'atmosphère, l'influence de la répartition et de l'extension des continents ainsi que celle de la composition de l'atmosphère doivent être le terrain sur lequel peuvent s'étayer des conclusions solides.

La teneur en ozone joue aussi un rôle essentiel à l'époque actuelle et il a dû en être de même aux époques anciennes.

Par la connaissance de la circulation atmosphérique actuelle, on a pu montrer que des modifications progressives se sont produites au cours des 100 à 250 dernières années dans la position et l'intensité des courants atmosphériques ainsi que des courants océaniques qui leur correspondent.

Les variations dans la radiation solaire ont peut-être joué un rôle au cours des temps. C'est ainsi que TEICHERT ⁽¹⁾ se demande s'il ne faut pas tenir compte de l'influence possible sur le développement des êtres vivants, d'une augmentation de radiations par exemple par une moindre absorption par les poussières cosmiques. Il ajoute que, dans ce cas, l'augmentation de température paraît devoir être plus grande aux pôles qu'à l'équateur ; ceci serait en accord avec l'étalement plus grand des zones climatiques aux époques anciennes.

Il n'en reste pas moins que ces explications ne donnent pas la raison d'une tendance à l'uniformisation relative des climats de l'équateur aux pôles actuels. Faut-il faire appel à des causes astronomiques ? La dérive des continents ou les déplacements des pôles ne semblent pas à même de résoudre le problème de manière satisfaisante et d'expliquer notamment l'intercalation des phases glaciaires dans une suite de dépôts renfermant des organismes de climat tempéré, sous toutes les latitudes.

Ce long exposé amène à conclure que la question est loin d'être résolue quant à la réalité d'une dérive des continents au sens wegenerien du terme, voire même quant à la réalité d'un déplacement des *pôles astronomiques*.

⁽¹⁾ C. TEICHERT, *Australia and Gondwanaland*, Publ. Congr. Geol. Intern. XXX^e sess. Mexico, 1956, Comisión para la correlación del Sistema Karroo, page 115.

Il y a certes des arguments décisifs en faveur du cheminement du *pôle magnétique*. Peut-on, sur la base des arguments paléoclimatiques, accepter un déplacement relatif de l'axe de rotation par rapport à l'agencement des continents ? Est-il permis aussi de croire à un changement, périodique ou non, de l'inclinaison de l'axe de rotation sur le plan de l'écliptique ?

Sans doute conviendra-t-il de s'arrêter à un moyen terme et de faire intervenir à la fois un glissement modéré de la croûte sur son substratum ⁽¹⁾, pouvant entraîner un déplacement de l'axe de rotation, capable d'expliquer le développement des grands végétaux dans les très hautes latitudes ; il faudra aussi tenir compte largement des dislocations de la croûte notamment sous forme de grandes fractures, conséquence de son glissement sur le manteau, sans oublier la surrection des orogènes.

Nous voudrions nous reporter une fois encore au traité de SCHWARZBACH auquel nous avons fait des emprunts à diverses reprises.

Ce savant rappelle que la présence d'indices de climats tropicaux en Europe Centrale a attiré l'attention il y a plus de 200 ans et des savants de l'époque les expliquèrent par des changements dans l'emplacement des pôles, de même que pour la présence de restes de glaciations. La théorie de la dérive des continents permet aussi d'expliquer de telles variations. Toutefois SCHWARZBACH ajoute que durant le Pléistocène la position des pôles n'a pas changé par rapport au continent européen. La glaciation du Quaternaire en Scandinavie ne peut pas s'expliquer par une migration du pôle ou par un phénomène de dérive.

Remontant plus loin dans le passé, SCHWARZBACH ne manque pas de faire observer que les conditions ne sont plus les mêmes qu'à l'époque pléistocène. La répartition des zones climatiques est alors en faveur d'un déplacement des pôles et d'une dérive des continents.

Le fait que la glaciation du Paléozoïque supérieur s'est étendue jusque l'équateur est aussi pour lui d'une importance capitale. Il rappelle à ce sujet l'explication de BROOKS figurée par une carte schématique montrant la disposition supposée des mers et des terres, y compris l'hypothétique continent de Gondwana. Dans cette reconstitution l'extension des glaces dépasse largement le cercle polaire même en choisissant une position du pôle plus conforme à la configuration générale de la calotte glaciaire australe. Aussi ajoute-t-il le groupement des continents à la fin du Paléozoïque proné par WEGENER, du TOIT et d'autres, résout en partie la difficulté. Il serait cependant possible de penser à une dérive moindre que celle imaginée par WEGENER.

Et il ajoute :

“ Many paleoclimatic facts can be explained then on the basis of a different position of the poles ; but this theory does not provide a complete solution to all climatic problems for it does not explain the alternation of ice-free and icecovered poles during the earth's history ”.

(1) Il en sera question au chapitre consacré aux données de la géologie structurale.

Cette phrase méritait d'être rapportée car elle est en accord avec l'idée exposée précédemment à savoir que durant l'histoire géologique de la Terre il y eut de longues périodes à climats moins différenciés qu'actuellement séparées par de brèves phases à large extension glaciaire.

Le professeur SCHWARZBACH pense que le paléomagnétisme pourra dans l'avenir aider grandement à la solution du problème de la paléoclimatologie.

Nous avons exposé la question au chapitre précédent, nous ne croyons pas devoir la reprendre ici.

Nous pensons utile de citer encore une phrase du chapitre 28 du même ouvrage qui résume les idées de l'auteur sur le problème des anciens climats :

“ It seems to me that interpretation of the climatic history of earlier periods is not really possible without the additionnal assumption of polar wandering and continental drift. This applies not only to the Gondwana Glaciation, but also to the migration of the evaporite belt and the reef belt during the Paleozoic Era. Extensive shift of the continents, as proposed by WEGENER, is not necessary ; a moderata amount of drift would suffice to explain paleoclimatic findings. Overall movement of the earth's crust was probably more important than drift of individual continents ”.

Nous ne pouvons pas manquer de souligner une certaine analogie entre ces conclusions, très modérées pour ce qui concerne la dérive proprement dite des continents, et la proposition faite au chapitre précédent d'attribuer les positions différentes du pôle, à un même moment, au jeu des grands accidents géologiques (plissements ou failles radiales) qui intéressent non seulement les masses continentales mais aussi le domaine océanique profond.

Nous désirons citer ici une phrase tirée d'une lettre adressée à l'un de nous par le professeur AVIAS de l'Université de Montpellier.

Après avoir rappelé la continuité très ancienne de la répartition des unités géologiques connues en Nouvelle-Calédonie, en Nouvelle-Zélande, en Australie, en Indonésie et dans l'Inde, ce savant ajoute :

« Je vous signale toutefois que les caractères de la sédimentation en Nouvelle-Calédonie, comme en Australie montrent qu'au Carbonifère ces contrées devaient être soumises à un climat froid ; d'ailleurs les premiers coraux et récifs coralliens ne sont connus dans la zone néo-calédonienne que du Miocène. La flore de Gymnospermes (Araucariées en particulier) est actuellement une flore relique de climat plus froid, réfugiée pour sa plus grande partie dans les montagnes et sur les massifs de roches ultrabasiqes. Il semble donc que la Nouvelle-Calédonie n'a pas toujours été dans la position qu'elle a actuellement par rapport à l'équateur et ne pourrait-on pas interpréter cela par un glissement d'ensemble de la lithosphère sur la pyrosphère et par un glissement relatif des pôles sans qu'il y ait pour cela dérive appréciable des continents par rapport aux autres ».

Pour terminer ce chapitre, nous croyons intéressant de reproduire ici, à titre documentaire, le petit tableau comparatif dû à A.N. KHRAMOV ⁽¹⁾. Ce tableau

⁽¹⁾ A.N. KHRAMOV, *Palaeomagnetism and stratigraphic correlation*, 1960, p. 58.

est basé sur des données fournies pour l'hémisphère nord par SCHEINMANN (1954), SCHWARTZBACH (1955) et KREICHGAUER (1949).

THE POSITION OF THE NORTH POLE FROM PALAEOMAGNETIC AND
PALAEOCLIMATIC DATA.

PERIOD	PALAEOMAGNETIC DATA		PALAEOCLIMATIC DATA		DIFFERENCE IN DEGREES OF ARC
	Lat. N.	Long. E.	Lat. N.	Long. E.	
Pliocène	77	225	75	250	6
Miocène	75	163	74	210	12
Palaeogene to Jurassic	70	147	71	164	6
Triassic	55	143	65	160	15
Permian to Carboniferous	43	142	45	171	21
Devonian to Ordovician	41	148	42	165	11
Cambrian	8	165	20	160	13
Upper Proterozoic	3	211	— 13	233	27
Lower Proterozoic	33	230	—	—	—

CHAPITRE IV

LES GLACIATIONS

Il a déjà été question des périodes glaciaires dans le chapitre précédent ; il n'est pas possible, en effet, de les dissocier de la paléoclimatologie. Dans le présent chapitre nous désirons seulement donner quelques renseignements complémentaires à leur sujet et surtout insister sur leur signification au cours des périodes géologiques.

A diverses époques des calottes glaciaires ont recouvert des étendues considérables de la surface du globe, tout aussi bien dans les régions basses voisines de la mer que dans des pays à relief plus marqué. Par leur développement, elles peuvent être comparées jusqu'à un certain point, à la calotte glaciaire du Quaternaire dans l'hémisphère nord, dont l'étendue fut considérable. Dans un cas comme dans l'autre il s'agit, semble-t-il, non pas d'une situation permanente, mais transitoire venant troubler brusquement l'évolution normale des climats. Notre confrère M. L. CAHEN a publié à ce sujet une note du plus haut intérêt ⁽¹⁾.

Il nous rappelle tout d'abord que l'on peut reconnaître, entre des limites de temps plus ou moins étroites, trois périodes glaciaires principales s'étendant sur plusieurs continents. *a)* la *glaciation quaternaire* repérée chronologiquement, pour sa partie révolue, par une expression telle que $(0,5 \pm 0,5)$ M.A. ; *b)* la *glaciation carboniférienne* (300 ± 30) M.A. ; *c)* la *glaciation de la fin du Précambrien* (650 ± 60) M.A. ⁽²⁾.

D'autres glaciations à caractère plus local ont existé entretemps sur plusieurs continents.

Il est possible aussi que vers – 800 à – 900 M.A., il ait existé une importante glaciation s'étendant sur l'Afrique centrale et peut-être sur l'Asie et l'Amérique du Sud ⁽³⁾.

Si approximatives qu'elles soient, ces estimations d'âge méritent de retenir l'attention ; il semble, en effet, que les phases glaciaires causant un bouleversement

⁽¹⁾ L. CAHEN, *Glaciations anciennes et dérive des continents*, Ann. Soc. Geol. Belg., t. LXXXVI, 1962-1963, Bull. n° 1, mai 1963.

⁽²⁾ Ces estimations d'âge, dans l'état actuel des connaissances acquises ne peuvent pas avoir une valeur absolue.

⁽³⁾ En ce qui concerne les traces de glaciation antérieure au Dévonien, en Afrique Saharienne, il convient de signaler la découverte des blocs « erratiques » de nature rhyolitique de grande taille dans une série gréseuse marine d'âge caradocien. C'est la confirmation du concept faisant du massif central saharien une zone garnie de glaciers avant le Gothlandien, ainsi que l'ont admis plusieurs géologues.

P. GEVIN, *Blocs erratiques sur les pentes de la Gara Sayada, frange sédimentaire du Nord-Est de l'Eglab (Sahara Occidental)*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLXIII, série D, N° 19, 7 novembre 1966.

brusque dans la régularité des zones climatiques se représentent à des intervalles assez constants, de l'ordre de 300 M.A.

Des cartes ont été dressées de l'extension des glaciations anciennes ; elles ont été complétées par l'indication des positions moyennes des pôles établies suivant les méthodes du paléomagnétisme. On y trouve une donnée précieuse : la position du pôle restituée de cette manière indique que chacune de ces glaciations se trouvait à une latitude élevée, généralement supérieure à 65 degrés. Comme l'écrit le professeur L. CAHEN :

« Il est peu probable que des coïncidences perdurant durant si longtemps [2000 M.A. environ] et qui sont confirmées par d'autres coïncidences paléoclimatiques pour les périodes plus récentes, soient purement accidentelles ».

D'après cet auteur, l'étude des grandes glaciations d'autrefois confirme les conclusions tirées de la connaissance des anciens climats basée sur d'autres critères.

Nous savons que, pour plusieurs périodes géologiques, à chaque continent correspond au même moment, une position particulière du pôle magnétique. Aussi, écrit L. CAHEN : « ces différents pôles contemporains ont dû coïncider à la période envisagée et leur manque de coïncidence actuelle implique que les continents ont modifié leurs positions relatives ».

Nous avons envisagé cette question dans les chapitres précédents. Nous devons cependant relever un fait important : L'examen des cartes jointes au travail de L. CAHEN laisse apparaître, à chaque époque envisagée, une dissemblance entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud. Les glaciations couvrent une surface bien plus grande dans le second que dans le premier, sauf peut-être au Quaternaire ; il serait intéressant d'en connaître la raison.

Si l'on ne considère que les trois plus grandes périodes de glaciation, il peut paraître vraisemblable d'imaginer une évolution cyclique de la Terre à cet égard. Cependant, HOLMES fait remarquer ⁽¹⁾ qu'il faut se garder d'y voir une règle solidement établie ; il y a lieu de considérer, en effet, non seulement les trois phases principales rappelées ci-avant, mais aussi d'autres de moindre extension, qui s'intercalent entre elles et qui sont particulièrement développées dans l'hémisphère sud.

A propos des formations glaciaires de l'époque paléozoïque, il y a lieu de rappeler l'analogie entre la tillite de Iapo à l'ouest-sud-ouest de Sao Paulo au Brésil et celle de Table Mountain près de Cape-Town en Afrique Australe. Toutes deux datent du Silurien final ou du début du Dévonien.

La recherche de la cause des glaciations est un problème difficile à résoudre. Divers facteurs interviennent indiscutablement, telles des coïncidences astronomiques, atmosphériques et terrestres, agissant avec des intensités variables.

Après ces considérations générales, nous examinerons avec quelque détail ce que nous apprennent les dépôts glaciaires du Permo-Carbonifère tels qu'ils

(1) Page 740 de l'édition récente de *Principles of Physical Geology*.

sont connus sur les divers continents. Ces formations sont, en effet, particulièrement intéressantes parce qu'elles se sont faites peu de temps avant l'époque admise par WEGENER pour le début de la dislocation de la Pangeae et la dérive des continents.

L'Afrique australe et centrale offre à ce sujet une documentation importante. Pour la partie sud du continent nous nous sommes reportés principalement à l'ouvrage de A. DU TOIT ⁽¹⁾.

Les dépôts glaciaires sont à la base d'une grande série sédimentaire connue sous le nom de Karroo-System. Ils font partie de l'assise inférieure dite de la Dwycka du système du Karroo.

Au nord du 33^{me} parallèle sud, la tillite repose en discordance de stratification sur les terrains antérieurs ; par contre, d'après A. DU TOIT, au Sud de ce parallèle, elle surmonte un niveau schisteux (" Lower shales ") considéré comme formant la base du système du Karroo et, chose intéressante, succédant en parfaite conformité aux couches de Witteberg, c'est-à-dire à la partie supérieure du système du Cap. La série de Witteberg, d'origine continentale renferme une faune et une flore très pauvres, permettant cependant de la considérer comme s'étendant, dans la série stratigraphique, du Dévonien moyen au Carbonifère inférieur.

D'après DU TOIT, les " Lower Shales " renfermant peu de fossiles devraient être rattachés à la série de Witteberg ; ils représenteraient des dépôts d'eau douce sur lesquels le front du glacier aurait déposé les éléments de la tillite.

Celle-ci serait alors réellement la base du Karroo, en accord avec l'opinion généralement acceptée, au nord du 33^{me} parallèle. Il est à noter que des restes de Gangamopteris ont été trouvés dans les schistes intercalés dans la tillite ; les schistes qui surmontent celle-ci ont fourni une belle flore à *Glossopteris*. On peut dire que la glaciation date ainsi du Carbonifère supérieur.

L'épaisseur de la tillite, dans les régions les plus méridionales, c'est-à-dire dans l'État du Cap serait pour le moins de 800 mètres en moyenne ; elle varie néanmoins dans des proportions énormes, suivant les conditions du relief au moment du dépôt. Il est non moins certain que sa puissance diminue rapidement du sud vers le nord.

DU TOIT établit à ce propos une comparaison avec la glaciation quaternaire. Il écrit : " It should be observed that, just as in the case of the Pleistocene Glaciation, the boulder beds are poorly developed over the area from which the ice is presumed to have radiated " ⁽²⁾.

La carte quelque peu schématique (Fig. 27) dressée par DU TOIT (fig. 35 de son ouvrage) est très parlante à cet égard. Elle montre qu'il y eut, à l'époque du Karroo, plusieurs centres de glaciation. Il en existait certainement un d'importance primordiale dans la région de Pretoria-Middelburg ; le cheminement

⁽¹⁾ Alex L. DU TOIT, *The geology of south Africa*, 2^e édit., Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1939.

⁽²⁾ Dans une série de profils alignés approximativement suivant le 28^e méridien, A.L. du Toit fait ressortir les variations de facies et de puissance du Karroo depuis le Cap jusqu'en Rhodésie. Ce schéma très parlant est en accord avec sa conception sur l'emplacement de la région de départ de la glaciation (*op. cit.*, p. 234, fig. 34).

de la glace se faisait en éventail vers l'W. S.W., le sud-ouest, le sud, le glacier venant de l'intérieur du continent pour se diriger vers la ligne du rivage actuel. Par contre, dans la région de Durban, la striation du soubassement indique un transport au départ d'un centre situé actuellement en plein Océan Indien et se dirigeant d'abord vers l'intérieur du continent, pour s'infléchir ensuite lentement et s'en aller dans la direction sud-ouest, parallèlement au glacier de Pretoria, longeant ainsi le rivage actuel de l'Océan Indien.

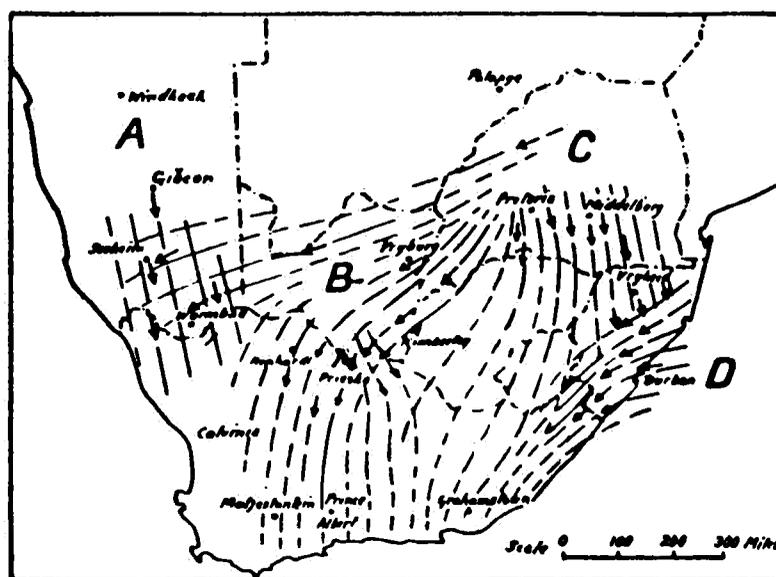


FIG. 27. — Le sens du cheminement des glaciers de l'Afrique Australe, d'après Al. DU TOIT.

Centres de glaciation : A = Namaqualand ; B = Griqualand ; C = Transvaal ; D = Natal.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).

Les partisans de la dérive ne manqueront pas de voir là un indice en faveur de l'accolement de l'Afrique à une autre masse continentale à l'époque du Karroo. Comme nous le verrons au chapitre consacré aux enseignements tirés de la géologie structurale, une autre explication peut être proposée à ce sujet.

Sur la glaciation permo-carbonifère de l'Afrique australe, le professeur BELL-AIR, de l'Université de Paris, nous apporte des renseignements récents ⁽¹⁾ : Les formations de Dwycka débutent par un conglomérat à allure morainique très nette reposant sur un bed-rock strié ; ces stries permettent de penser que le point de départ du glacier se trouve à un endroit situé actuellement sous les eaux de l'Océan Indien.

Sur cette formation glaciaire de base, reposent des terrains à « varves » sur une épaisseur réduite. Ils sont surmontés à leur tour par le conglomérat de Dwycka, avec ses galets striés, dont l'épaisseur atteint plusieurs centaines de mètres. D'après ses caractères, ce conglomérat n'est peut-être pas une vraie tillite, dans l'entièreté de sa masse tout au moins ; il peut représenter un dépôt formé sur

⁽¹⁾ P. BALLAIR, *Réflexions sur le glaciaire de Dwycka (Afrique du Sud)*, C. R. Acad. Sc. de Paris, t. CCLVII, n° 23, 4 décembre 1963, p. 2632.

place par la fusion d'un inlandsis donnant naissance à un dépôt lacustre sous-glaciaire. Mais pour obtenir 300 mètres de tillite, il faut au moins 6000 mètres de glace chargée de 5 % de galets. Il faut dans ce cas imaginer l'existence d'un glacier actif aboutissant à un immense lac, ou bien plusieurs phases d'avancée et de fonte du glacier, comme le prouvent les intercalations de *sédiments à faune marine* dans la formation glaciaire.

Nous pensons qu'il est utile d'insister ici sur la présence de niveaux marins dans les dépôts glaciaires de la région de Durban. Il faut vraisemblablement en déduire que le glacier abandonnait son matériel détritique non pas dans un lac mais en bordure de l'océan. Il y a là une grande différence avec ce que l'on sait des dépôts glaciaires de même âge situés à l'intérieur du continent. On est tenté de penser que les glaciers descendaient d'une terre émergée ayant grossièrement la forme de l'Afrique australe actuelle, mais dont une partie s'est affaissée le long d'une faille radiale, de manière qu'un centre de glaciation soit aujourd'hui caché sous les eaux de l'Océan Indien.

Cela conduit aussi par voie de conséquence à croire que l'océan s'étendait, à l'époque du Permo-Carbonifère, tout autour de l'extrémité méridionale de l'Afrique, comme il le fait dans la configuration géographique actuelle. C'est une opinion que nous verrons se confirmer quand nous passerons en revue, dans un prochain chapitre, les données de la paléogéographie.

La glaciation du Permo-Carbonifère a laissé des traces en Afrique Centrale et notamment au Congo. Nous nous reporterons à ce sujet aux travaux publiés par L. CAHEN (1).

Les tillites sont situées à la base des formations du Permo-Carbonifère dans la région orientale du territoire du Congo. On y observe des alternances de conglomérat glaciaire et de sédiments renfermant la flore à *Glossopteris* et à *Gangamopteris*.

L'épaisseur de ces dépôts à intercalations de tillites est très variable ; elle va de quelques mètres à plus de 300 mètres ; il semble bien qu'il s'agisse de dépôts édifiés sur un sol irrégulier. A la Lukuga, l'écoulement de la glace se faisait très vraisemblablement vers l'est ; dans la région de la Lova et de Walikale elle se faisait vers le nord ou vers l'ouest ; dans la partie du bassin congolais située le long du Lualaba, du Lubudi, de la Lovoï, les glaciers paraissent avoir été centrés sur les Monts Hakansson.

Au Kasai et dans l'Angola du Nord, comme plus au nord-est, la base de la série de la Lukuga est formée de tillites et de dépôts à varves conservés au fond d'anciennes vallées.

D'après les caractères de ces formations glaciaires d'âge permo-carbonifère il est permis de supposer qu'il s'agit en l'occurrence de dépôts édifiés dans des

(1) L. CAHEN, *Géologie du Congo belge*, Liège, Vaillant-Carmanne, 1954.

Voir aussi : L. CAHEN et J. LEPERSONNE, *Les terrains du Congo belge appartenant ou pouvant appartenir au système du Karroo. Résumé des connaissances*, C. R. Congrès Géol. Intern. XX^e session, Mexico, 1956. Rapport de la Commission de Gondwana.

conditions différentes de celles reconnues dans l'extrême sud de l'Afrique. Ces dernières se sont édifiées probablement dans des régions basses proches de la mer, tandis que, dans le centre du continent le relief intervenait pour une part importante dans la localisation des centres de glaciation. Le professeur CAHEN n'a pas manqué de noter cette différence.

On peut accepter, jusqu'à plus ample informé, l'opinion de cet auteur quant à l'âge relatif des tillites du Centre africain et des tillites du sud du continent ; ces dernières se seraient formées plus tôt que les autres.

Ajoutons encore que les dépôts glaciaires sont connus au Kenya et à Madagascar. Dans cette île ils sont surmontés de dépôts alternant de couches à fossiles continentaux et à fossiles marins, ce qui semble indiquer la présence toute proche de l'océan. Nous y reviendrons plus loin.

L'Amérique méridionale présente aussi une répartition intéressante des formations glaciaires de l'époque de Gondwana (Permo-Carbonifère). Nous nous reporterons une fois de plus au travail de Barbosa déjà cité au chapitre précédent ⁽¹⁾.

Les corrélations rapportées dans cet ouvrage sont quelque peu différentes de celles généralement acceptées quant à la position de la série Gondwana-Karoo dans l'échelle stratigraphique mondiale.

Si l'on se reporte au tableau récapitulatif, on note que la tillite de l'Afrique du Sud est rangée au niveau du Namurien de même que les couches de Vereeniging qui la recouvrent directement, avec pour ces couches, la mention : " Fl. *Glossopteris* with Namurian European elements "

Les tillites de Sao Paulo, et de l'Argentine descendaient même au niveau du Viséen, si pas plus bas encore dans la série.

Nous avons désiré rappeler ce désaccord avec les idées généralement acceptées en la matière, de façon que l'on comprenne mieux les descriptions qui vont suivre.

Le tableau récapitulatif, joint au travail de BARBOSA permet de voir qu'en Amérique du Sud les phases glaciaires s'échelonnent de la fin du Tournaisien au Stéphanien dans les gisements méridionaux ; par contre dans les provinces de Matto-Grosso, de Goyas et de Minas Geraes, la glaciation ne s'est développée qu'au Stéphanien. D'après cet auteur, la situation est à peu près la même en Australie. En Inde péninsulaire, la phase glaciaire est limitée au sommet du Namurien ; elle y a donc commencé plus tard et s'est achevée plus tôt qu'en Amérique du Sud et en Australie.

Dans l'ouvrage publié par la Geological Society of America, sur la géologie de l'Amérique du Sud ⁽²⁾, l'interprétation est quelque peu différente :

En Uruguay et Paraguay, il existe une tillite à la base du Permien ; elle repose sur des formations antérieures au Carbonifère. Dans l'état de Parana la tillite est

⁽¹⁾ O. BARBOSA, *The age of the Lower Gondwana Floras in Brazil and abroad*, Publ. XX^e Session Congr. Géol. Intern., Mexico, 1956. Commission pour la corrélation du système du Karroo, p. 205.

⁽²⁾ *Handbook of South American Geology* (Jenks, editor). Geol. Soc. of America, Memoir 65, 1956.

considérée comme carbonifère ; elle est surmontée par des dépôts à *Glossopteris*. Dans les bassins situés plus au Nord (Parnaíba) la tillite n'existe pas. En Argentine par contre, il existe une tillite pennsylvanienne accompagnée de sédiments marins, et une tillite permienne que surmontent des sédiments renfermant la flore à *Glossopteris*. Il en est de même aux îles Falkland. Pour celles-ci, un fait de première importance mérite que nous nous y arrêtions un instant.

Il paraît bien établi, en effet, que les glaciers des îles Falkland cheminaient du Sud vers le Nord ⁽¹⁾. Ce fait s'accorde parfaitement avec les observations faites en Amérique du Sud à propos des variations de facies des couches de Gondwana ; il en sera question plus loin à propos des arguments à tirer de la paléogéographie. Faisons remarquer cependant que le sens de progression de la glace aux Falkland d'une part, en Afrique Australe d'autre part, est déjà en faveur de l'existence d'un bassin marin entre l'Afrique et la terminaison sud de l'Amérique à l'époque de Gondwana.

Certes, dans l'ouvrage rappelé ci-dessus, R.J. ADIE a trouvé une manière curieuse de concilier la divergence observée entre les Falkland et l'Afrique Australe dans l'hypothèse de la Pangeae. Nous croyons que nous nous écarterions trop de notre programme si nous voulions procéder à un examen détaillé et à une critique de la thèse proposée.

La distribution des dépôts glaciaires du Permo-Carbonifère en Australie et en Nouvelle-Zélande est particulièrement instructive : Les tillites de la série de Gondwana sont bien représentées en Australie du Sud dans la région d'Adélaïde et au sud-est de cette ville jusque Kingston ; on y a reconnu au moins deux phases glaciaires ; on en trouve le prolongement en Tasmanie et dans l'État de Victoria d'une part, à la pointe sud-ouest de l'Australie d'autre part, où, sur une formation glaciaire de base, reposent des dépôts alternants d'origine marine et d'origine continentale.

Le long de la côte occidentale du continent australien, les dépôts de base du Permien comprennent des conglomérats glacio-marins dans une série essentiellement marine.

Plus au nord, on a signalé des dépôts semblables dans la région des déserts (St George Range), à la base de sédiments de type estuarien, ainsi que dans la Nouvelle Galles du Sud. Toutefois, dans ces deux districts, les tillites sont fortement réduites en importance. Le long de la côte nord (Golfe Bonaparte) le glaciaire fait défaut et le facies marin prédomine au même niveau géologique, marquant ainsi le passage aux grandes séries marines du domaine de la Téthys.

Dans le nord-est de l'Australie (Queensland) on connaît encore du glaciaire dans le bassin de Bowen, mais il disparaît vers l'est en bordure du continent ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Voir à ce sujet : RAYMOND J. ADIE, *The position of the Falkland Islands in a Reconstruction of Gondwanaland*, Geological Magazine, Vol. LXXXIX, n° 6, 1952.

⁽²⁾ Une documentation importante sur la question des dépôts glaciaires dans l'hémisphère sud à l'époque de Gondwana a été tirée du volume « Symposium sur les séries de Gondwana » publié à l'occasion de la XIX^e session du Congrès géologique international, Alger, 1952, et du Rapport de la Commission de Gondwana publié à l'occasion de la XX^e session de ce Congrès, Mexico, 1956.

On voit ainsi que les glaciations de l'époque de Gondwana, bien développées dans le Sud de l'Australie s'atténuent rapidement pour disparaître vers l'ouest, le nord et le nord-est.

En Nouvelle-Zélande, on note une disposition remarquable : la série équivalente au Gondwana a le faciès marin mais alors que les restes organiques indiquent un climat chaud dans le nord, ils sont au contraire caractéristiques d'un climat à température nettement inférieure dans le sud ; cependant les dépôts glaciaires ne s'y rencontrent pas, H. LEED écrit à ce sujet que la faune de la Nouvelle-Zélande méridionale se rattache à la faune permienne de l'Australie orientale et par là, à la faune froide de Timor.

Les faits rapportés ci-avant sont de grand intérêt, car ils montrent qu'il pouvait exister à l'époque de Gondwana des relations étroites entre l'Australie du Nord et la Nouvelle Zélande d'une part et le domaine de la Téthys d'autre part. Par contre, le grand développement des glaciers vers le sud avec plusieurs horizons de tillite apparente davantage la masse même du Continent à l'Antarctique.

Sur ce dernier continent, nous possédons déjà des renseignements d'importance bien qu'ils soient beaucoup moins complets que pour l'Amérique du Sud, l'Afrique et l'Australie.

D'après les publications récentes et notamment l'ouvrage de A. CAILLEUX ⁽¹⁾, une tillite très typique se trouve en place au Mont Horlick (85 à 86 degrés latitude sud et 135 à 100 degrés longitude ouest). C'est la tillite de Buckeye, épaisse de 260 mètres reposant directement sur un sol arasé et strié. Elle supporte des schistes épais de 170 mètres, puis l'équivalent de la formation de Beacon, épaisse de 600 mètres, consistant en une alternance de grès arkosique et de pélite avec restes de végétaux et notamment des *Glossopteris*. Cinq couches de charbon, pour le moins, sont intercalés dans cette formation.

L'Antarctique nous apporte des renseignements précieux sur la paléoclimatologie dans les environs du pôle austral actuel. Reportons-nous à cet effet à l'article publié par EDNA P. PLUMSTEAD ⁽²⁾ lors du symposium sur la géologie de l'Antarctique tenu à Cap Town en 1963. Nous y relevons les données suivantes :

a) Les végétaux fossiles du Dévonien révèlent notamment qu'à cette époque vivaient dans l'Antarctique de grands végétaux dont le bois montre des anneaux de croissance annuelle indiquant une croissance lente et des saisons bien marquées ; il est à remarquer que certains échantillons recueillis prouvent l'existence de plantes ayant atteint, pour l'époque, un stade élevé dans leur croissance.

b) A l'époque du Permo-Carbonifère, de nombreux gisements renfermant la flore à *Glossopteris* ont été trouvés en Antarctique ; on y a reconnu aussi la

⁽¹⁾ A. CAILLEUX, *Géologie de l'Antarctique*, Soc. d'éditions d'Enseignement supérieur, Paris, 1963. Voir notamment page 45.

Voir aussi l'ouvrage suivant : *Antarctic Geology*, Proceed. first intern. Sympos. on Antarctic Geol. held in Cape Town. 16-21 sept. 1963 edited by R.J. Adie. North Holland Publishing Cy. Amsterdam, 1964.

⁽²⁾ EDNA P. PLUMSTEAD, *Paleobotany of Antarctica*, Antarctic Geology, Proc. of the first intern. Sympos. on Antarctic geology, 1963.

présence d'une série de couches de houille. Ces gisements sont en relation avec des tillites ou des schistes à varves.

Des bois de gymnospermes provenant du même niveau géologique sont caractérisés par la présence d'anneaux de croissance indiquant, comme à l'époque du Dévonien supérieur, l'existence de saisons bien différenciées. Il semble établi tout aussi bien, par la courbure de ces anneaux de croissance, que certains de ces arbres atteignaient un diamètre considérable.

Parmi les éléments de cette flore, outre le genre *Glossopteris* il y a lieu de citer : *Gangamopteris*, *Annularia*, *Phyllothea*, *Schizoneura*, *Vertebraria*, *Dadoxylon*, etc.

PLUMSTEAD signale que c'est avec l'Afrique et l'Inde péninsulaire que la flore gondwanienne de l'Antarctique présente la plus grande affinité.

c) Les études récentes sur la flore triasique de l'Antarctique semblent conduire à la conclusion suivante : Contrairement à ce que l'on croyait antérieurement, la distinction établie entre la flore permo-carbonifère de l'hémisphère sud et celle de l'hémisphère nord doit être maintenue à l'époque du Trias.

d) A l'époque jurassique, les Cycadophytes et les Conifères trouvés en Antarctique marquent, comme leurs congénères des périodes plus récentes, l'existence d'un climat plus chaud que le climat actuel.

e) Dans ses conclusions, l'auteur écrit : " That the same large plant assemblages should have thrived in India, South Australia and 6° from the South Pole at one and the same time is unthinkable. Only one alternative seems possible, and that is a considerable movement of continents to one another and to the present Pole as to bring all within one climatic zone and near enough to one another for constant interchange and replenishment from one Gondwana area to another, while maintaining for the greater part a separation from all northern floral provinces. "

Cette conclusion paraîtra certainement fondée. Cependant nous voudrions rappeler qu'avant cela l'auteur de l'article déclare :

" If for any reason the temperature at the Poles had been high enough to support the vigorous growth of largeleafed higher plants, then the tropics of this period would have been intolerably hot "

Une telle affirmation est pour le moins exagérée. On sait que la flore du Tertiaire moyen comprenait dans les deux régions polaires des arbres de grande taille qui ne pourraient plus vivre actuellement sous de telles latitudes. A cette époque du Tertiaire on doit admettre que la configuration des régions polaires était sensiblement identique à ce qu'elle est aujourd'hui. D'autre part la croissance des arbres en ces lieux, indice d'un climat plus chaud qu'il l'est actuellement, n'entraînait nullement dans les régions équatoriales une température nettement plus élevée que dans les temps présents. Ce raisonnement n'est-il pas de mise pour le Dévonien, le Permien-Carbonifère comme pour le Quaternaire sans qu'il soit nécessaire d'invoquer un groupement tout autre des masses continentales ?

Tous les faits de la paléontologie s'accordent, au contraire, pour mettre en évidence une plus grande uniformité des climats entre les pôles et l'équateur pendant la majeure partie des temps géologiques.

Il est intéressant d'établir une comparaison entre l'Antarctique et les Falkland où l'on a reconnu également l'existence d'une tillite d'âge permo-carbonifère ; cette formation atteint 650 mètres de puissance ; elle est surmontée par des couches renfermant une flore à *Glossopteris* (1). Dans la direction du nord, c'est-à-dire en territoire américain la tillite diminue de puissance.

D'autre part, dans l'Antarctique occidentale, il y a passage du facies continental de Gondwana à des dépôts marins. C'est une disposition très semblable à celle reconnue en Amérique du Sud lorsqu'on va de l'Atlantique au Pacifique. Ajoutons que, dans cette partie occidentale de l'Antarctique, des dépôts rapportés au Paléozoïque supérieur et au Trias renferment aussi de rares fossiles marins.

Que l'on adopte les déterminations proposées par BARBOSA ou que l'on s'en tienne aux idées quelque peu différentes que nous avons rappelées, il n'en existe pas moins une distribution systématiquement ordonnée, par rapport à un centre où les actions glaciaires avaient leur maximum de développement. Dans la répartition actuelle des masses continentales, ce centre se trouvait en Antarctique ou dans les îles Falkland ou dans l'intervalle compris entre l'Antarctique, l'Amérique du Sud et l'Afrique australe.

De toute manière, on est frappé de voir les dépôts glaciaires aller en s'atténuant dans toutes les directions (sauf évidemment vers le Pacifique) à partir de la zone ainsi définie.

Faut-il y voir un argument en faveur de la thèse fixiste ? Pas nécessairement, si l'on se réfère au groupement des continents autour de l'Antarctique tel que le concevait WEGENER et comme le comprend J.T. WILSON (2). On est frappé de voir que dans ces reconstitutions de la Pangée comme dans la situation actuelle, les variations se font de la même manière.

Il convient maintenant que nous envisagions la distribution des dépôts glaciaires équivalents dans l'Inde péninsulaire.

A la base du système de Gondwana se trouve la tillite de Talchir, présentant tous les caractères des dépôts de cette nature. Son épaisseur n'est pas énorme ; elle n'atteint que localement plus d'une trentaine de mètres.

La figure 28 tirée de l'ouvrage de SCHWARZBACH : *Climates of the Past* (fig. 87) montre la distribution des dépôts inférieurs de Gondwana dans l'Inde. Les principaux d'entre eux se trouvent dans le centre et l'est de la Péninsule entre les latitudes 17 et 24 degrés nord ; toutefois des tillites ont été observées également plus au nord, dans le Kashmir, le Salt Range, le Népal, c'est-à-dire en bordure de l'Himalaya (tillite de Blaini).

(1) HORACIO J. HARRINGTON, *Handbook of South American Geology*, William F. Jenkes, editor. The geol. Soc. of America, Mém. 65, 1956, voir page 140.

(2) J.T. WILSON, *Hypothesis of Earth's behaviour*, Nature, London, vol. 1928, pp. 925-929, 1963.

Les dépôts morainiques de la péninsule sont surmontés par des couches à *Glossopteris*. Par dessus viennent des sédiments avec flore plus riche et couches de charbon, indice d'un réchauffement relativement rapide. En ce qui concerne la bordure de l'Himalaya, il semble que la situation soit quelque peu différente. D'après des observations récentes qui nous ont été rapportées par M. J. LEPERSONNE, les caractères glaciaires y paraissent moins nets ; la tillite de Blaini est très peu épaisse, elle est intercalée dans des formations probablement marines et constitue un niveau très constant. Ce caractère laisse supposer qu'il s'agit d'un dépôt édifié sur le fond de la mer aux dépens de matériaux entraînés par les glaciers descendant de régions plus méridionales, soit de celles où se formait la tillite de Talchir, soit d'un centre de glaciation situé plus au Nord.

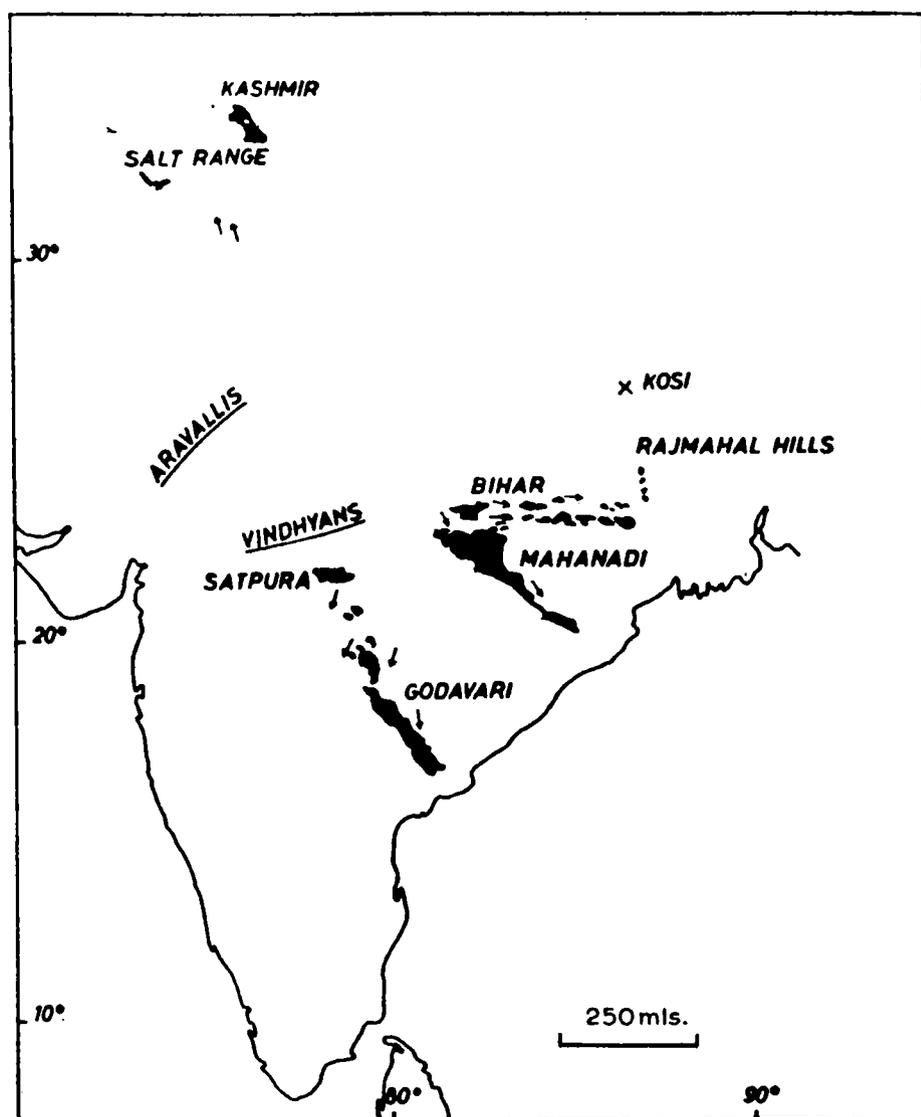


FIG. 28. — La glaciation de Gondwana en Inde péninsulaire, d'après SCHWARZBACH.
La direction du mouvement des glaces est indiqué par des flèches (d'après K. Jacob).
(Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).

Il ressort de là que la limite nord des formations glaciaires de Gondwana en Asie correspond à la bordure de l'Himalaya, c'est-à-dire pratiquement à l'ancien rivage de la Tethys.

Si nous nous reportons une fois encore à l'ouvrage de SCHWARZBACH, déjà cité à maintes reprises, nous relevons un renseignement de grand intérêt. L'auteur écrit, en effet (page 140) :

“ Not far from India, tillites have recently been described from southwest Oman, Arabia, by HUDSON (in KING, 1958). There, the tillites are underlain and succeeded by sandy limestones countaining *Metalegoceras*. The boulders were derived in part from the Precambrian shield ”.

Il s'agit vraisemblablement du prolongement occidental de la tillite de Blaini, c'est-à-dire des formations du Salt Range. Il paraît difficile, dans ces conditions d'accepter un déplacement de quelque importance de la péninsule hindoue par rapport à la masse du Continent asiatique.

Il n'est pas sans intérêt de reproduire ici la carte dressée par A.L. DU TOIT ⁽¹⁾ en vue de délimiter la calotte glaciaire de Gondwana en rapprochant tous les continents de l'hémisphère sud : Amérique, Afrique Australe, Antarctique, Australie ainsi que l'Inde péninsulaire (Fig. 29).

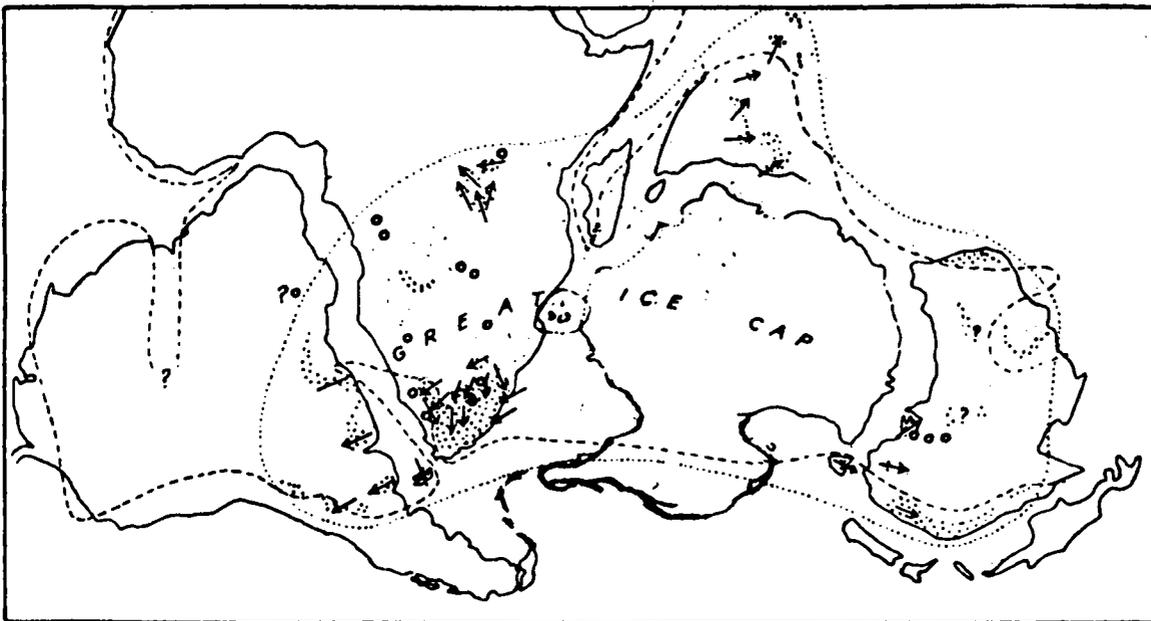


FIG. 29. — La disposition des continents de l'hémisphère sud à l'époque de Gondwana, d'après A.L. DU TOIT. Avec l'indication (ou pointillé) des zones glaciées à la fin du carbonifère. Les flèches indiquent la direction du cheminement des glaciers. Les lignes en pointillé marquent les limites d'extension de la glace. (Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).

On est frappé de l'étrange déplacement supposé pour Madagascar, comme aussi par le fait que l'Inde péninsulaire avec ses dépôts glaciaires est délibérément écartée de la région d'Orman qui, à cet égard en est le prolongement immédiat. Nous y reviendrons au chapitre consacré à la paléogéographie.

(1) A.L. DU TOIT, *Our Wandering Continents*, fig. 9, Oliver and Boyd, Londres, 1937.

On est tout aussi frappé de voir indiquer en Amérique du Sud le mouvement de la glace s'opérant vers l'intérieur du continent actuel, alors que l'étude des facies a établi que le passage des dépôts continentaux aux dépôts marins s'opère dans la direction de l'océan actuel. Dans ces conditions, on est en droit de se demander quelle confiance on peut accorder à de semblables reconstitutions.

Dans toutes les reconstitutions de la Pangeae, l'Amérique du Sud, l'Afrique Australe, l'Inde, l'Australie sont déplacées par rapport à leur emplacement actuel afin de réunir en un seul bloc les formations glaciaires de Gondwana. Mais, répétons-le, est-il rationnel de séparer la glaciation de l'Inde de celle d'Arabie (Oman) par un glissement, parfois de grande amplitude, pour arriver à joindre

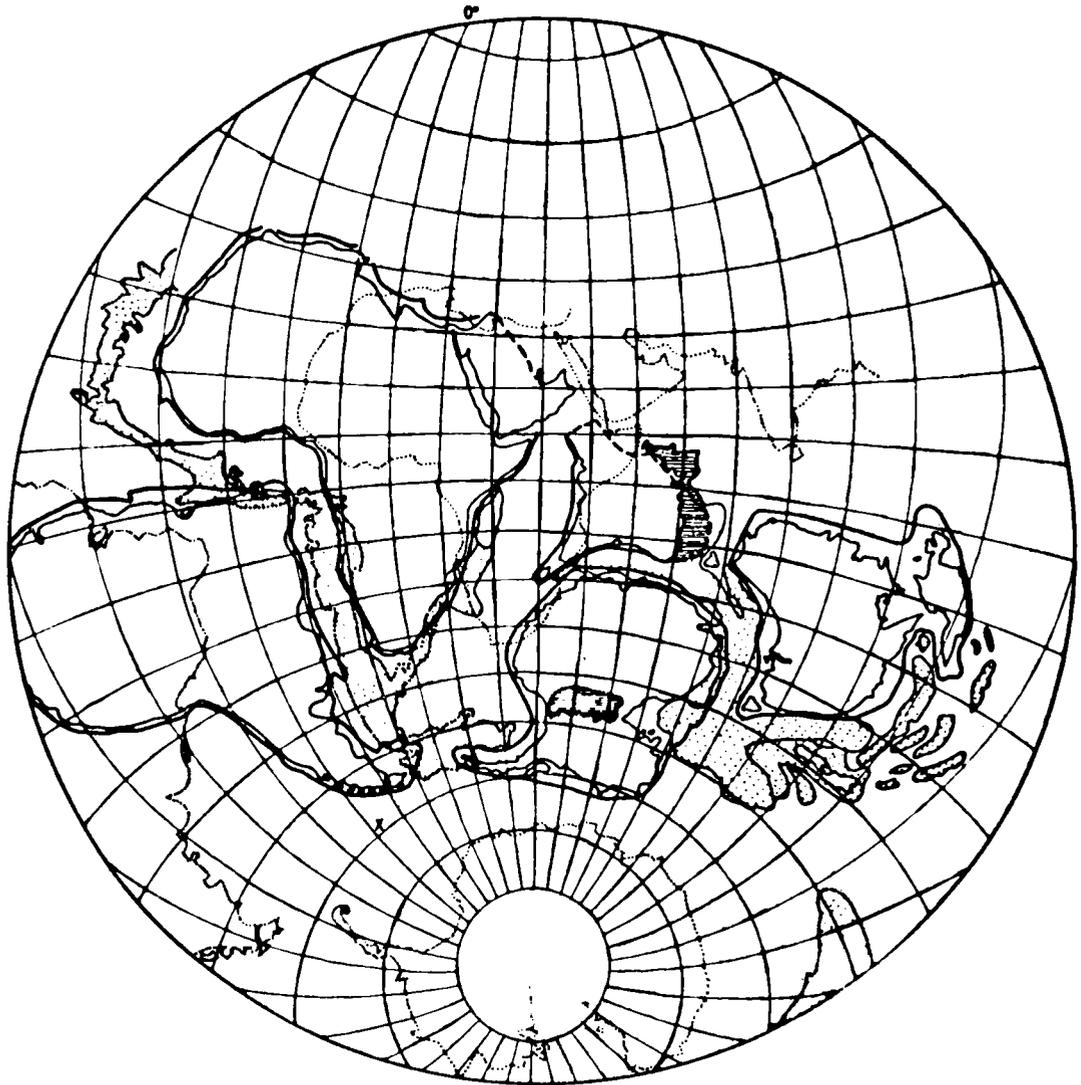


FIG. 30. — Les continents de l'hémisphère sud à l'époque du Crétacé, d'après KING et DOWNARD.

(Figure reproduite avec l'autorisation des auteurs).

les dépôts glaciaires des Falkland à ceux de l'Afrique et de l'Inde ⁽¹⁾ ? Nous hésitons à nous rallier à une telle hypothèse.

Nous nous arrêtons encore un instant aux formations glaciaires de l'Inde, en envisageant les enseignements à tirer de la présence de stries faites par le frottement de la glace sur le substratum rocheux.

Dans son travail sur le système de Gondwana dans l'Inde, K. JACOB ⁽²⁾ indique (planche, fig. 3) que le déplacement de la glace s'est fait, non pas du Sud vers le Nord, comme on pourrait s'y attendre, mais du nord vers le sud dans la

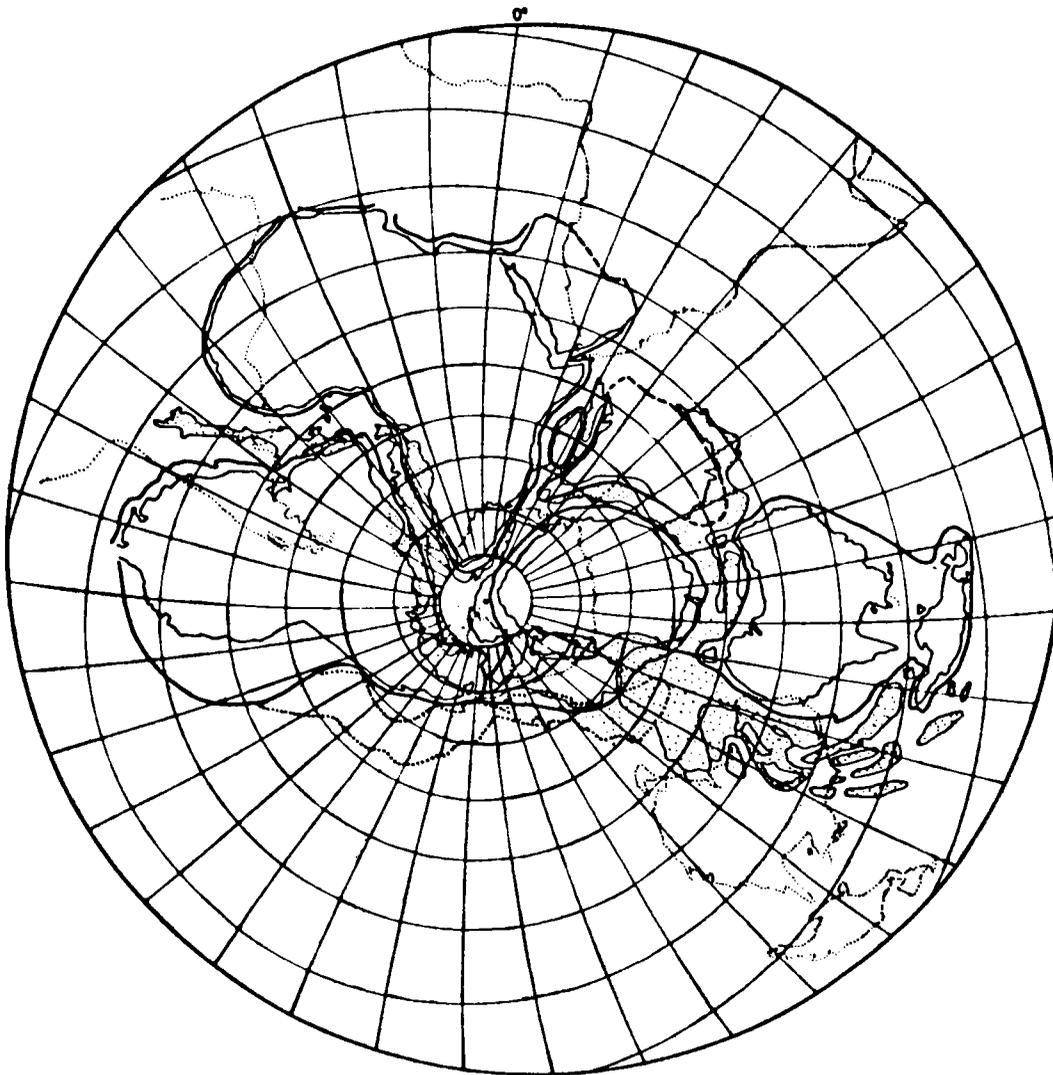


FIG. 31. — Les continents de l'hémisphère sud à l'époque du Carbonifère, d'après KING et DOWNARD.
(Figure reproduite avec l'autorisation des auteurs).

⁽¹⁾ A remarquer qu'il n'en est pas ainsi dans les cartes dressées par Du Toit, ni dans celle de Lester King et T.W. Downard où l'Arabie est déplacée pour rester proche de l'Inde péninsulaire reportée vers le S. W. (*Antarctic Geology*, p. 730). (Figures 30 et 31).

⁽²⁾ Dr. K. JACOB, *A brief summary of the stratigraphy and the paleontology of the Gondwana System*, Publ. Congr. geol. intern. Symposium sur les séries de Gondwana, Alger, 1952.

partie centrale de la péninsule, et de l'ouest vers l'est dans sa partie orientale. Par contre, dans le Salt Range il se serait fait vers le nord, ce qui est conforme au tracé des variations de facies des dépôts glaciaires.

Il est vraisemblable qu'il existait dans la région centrale de l'Inde péninsulaire un ou plusieurs massifs surélevés d'où les glaciers descendaient dans toutes les directions.

Rappelons ici qu'au cours du colloque de paléoclimatologie tenu à Cologne en 1964, il a été affirmé que, dans la partie centrale et méridionale de l'Inde péninsulaire, le mouvement de la glace s'est effectué du sud-ouest vers le nord-est ⁽¹⁾.

De cette revue sommaire des données acquises sur la glaciation de Gondwana nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

a) L'étendue considérable de la zone glaciée qui dépasse l'équateur vers le nord laisse à penser qu'il s'agit d'un phénomène exceptionnel dans l'évolution géologique du monde, si l'on se rappelle le fait sur lequel nous avons insisté au chapitre précédent : la tendance à une plus grande uniformité du climat entre pôles et équateur, beaucoup plus marquée aux époques anciennes qu'à l'époque actuelle, elle-même influencée par la glaciation quaternaire.

b) Le centre de la zone affectée par la glaciation ne correspond pas au pôle austral actuel ; les mesures du paléomagnétisme établissent qu'au Permo-Carbonifère le pôle magnétique était différent de ce qu'il est aujourd'hui. Mais il ne faut pas perdre de vue que la carte de l'étendue maximale de la glaciation quaternaire indique, elle-aussi, que le pôle nord ne coïncide pas avec le centre de la calotte glaciaire, qui se trouve vers 70 à 75 degrés de latitude dans le nord atlantique ⁽²⁾ ou au Groenland. On en connaît la raison : l'inégale distribution des terres et des mers (Fig. 32).

Aussi, lorsqu'il s'agit des périodes anciennes avant de fixer le pôle au centre de l'étendue occupée autrefois par la glace à une époque déterminée, ne faudrait-il pas rechercher si pour quelque raison, le véritable pôle ne devait pas être à une certaine distance du centre de la région couverte par les glaciers ? Il va sans dire qu'une correction de ce genre n'altérerait en rien les conclusions de M. CAHEN rapportées ci-dessus.

c) Dans l'étude des glaciations anciennes une autre constatation est d'importance. La phase glaciaire du Permo-Carbonifère dont il vient d'être longuement question est concentrée dans l'hémisphère sud ; on n'en connaît pas, actuellement, l'équivalent dans l'autre hémisphère ⁽³⁾.

⁽¹⁾ LOTZE, *Die permokarbonische Eiszeit in Mittel und Sud Indien*, Publ. Congrès de Paléoclimatologie. Cologne 1964.

⁽²⁾ La carte des glaciations quaternaires contenue dans l'ouvrage de A. DE CAYEUX, *Trente millions de siècle de vie*, page 127, est très parlante.

⁽³⁾ Il est bon d'ajouter que, si les glaciers permo-carbonifères sont propres à l'hémisphère sud, la flore de Gondwana trouve son équivalent dans l'hémisphère nord. On se rappellera à ce propos que Dalloni a trouvé des *Glossopteris* dans les Pyrénées.

A. VANDERBERGHE, *Contribution à la recherche d'une limite entre le Stéphanien et l'Autunien* (C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLII, n° 8, 20-2-1964) fait remarquer qu'il y a, au sommet du Stéphanien, remplacement de la flore

L'explication de cette particularité apparaît difficile.

Cependant si l'on veut bien se reporter aux cartes dressées par SCHWARZBACH pour la répartition des *évaaporites* et des *récif coralliens* au cours des temps, on est frappé de voir que l'équateur thermique se trouve toujours au nord de l'équateur géographique.

Il n'est pas inutile de rapporter ici une observation de Mr. le professeur Lecompte : Au Carbonifère et au Permien il n'existait pas de véritables récifs coralliens ; les formations calcaires de cette apparence étaient édifiées par d'autres organismes.

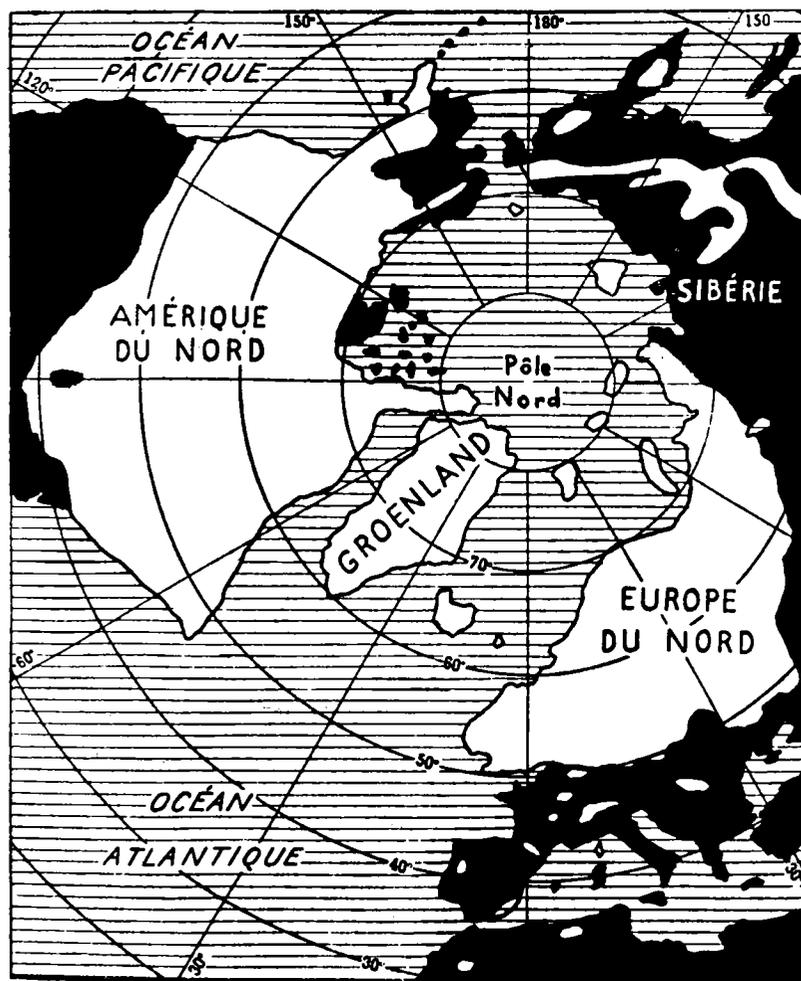


FIG. 32. — La glaciation du Quaternaire, d'après A. DE CAYEUX.

L'étendue couverte par les glaces est laissée en blanc.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'auteur).

par une faune marine ou alternativement marine et lacustre (Koutznetzky). Cette limite correspond à un changement dans les conditions climatiques peut-être en rapport avec la glaciation de Gondwana.

Voir également à ce sujet : M.D. ZALESSKY, *Observations sur l'extension d'une flore fossile voisine de celle de Gondwana dans la partie septentrionale de l'Eurasie*, Bull. Soc. Géol. France, 5^e sér., t. II, 1932, p. 109.

H. Th. TCHIRKOVA et M.D. ZALESSKY, *Sur deux nouveaux végétaux permien*, Bull. Soc. Géol. France, 5^e sér., t. VIII, 1938, p. 207.

Les zones climatiques se sont déplacées méthodiquement au cours des temps, une même zone se rapprochant ou s'écartant de l'équateur. Le développement des glaciations est en rapport avec de tels mouvements.

Les schémas établis par divers auteurs ⁽¹⁾ laissent voir d'une façon systématique un décalage vers le nord des zones climatiques par rapport à l'équateur actuel ; on sait qu'il en est ainsi également à notre époque pour l'équateur thermique dans sa traversée de l'Afrique et de l'Asie.

On ne peut s'empêcher de voir dans cette particularité l'influence d'une inégale distribution des continents et des océans, qui est restée la même au moins depuis la fin du Paléozoïque jusqu'à nos jours.

On peut trouver là l'amorce d'une explication de l'absence de glaciers dans l'hémisphère nord au Permo-Carbonifère, alors que de tels glaciers sont si largement développés dans l'hémisphère sud.

Par contre, la glaciation du Protérozoïque supérieur (Algonkien supérieur) s'étend dans les deux hémisphères. Une telle dissemblance ne s'explique, semble-t-il, que par une cause générale peut-être extérieure à la Terre. Il faut ajouter que les phases glaciaires paraissent aussi avoir été plus fréquentes au Protérozoïque et à l'Éocambrien que dans les périodes plus récentes.

Il n'est pas sans intérêt, à ce propos, de comparer la carte de l'extension des glaciations à l'époque de Gondwana dans l'hypothèse fixiste à d'autres cartes. Nous remarquons d'abord que la limite d'extension des glaciers n'est pas conforme à l'allure des parallèles ; elle est nettement déviée à la rencontre des océans. Certes ce n'est là qu'un essai, un croquis sans doute trop schématique.

Il n'empêche qu'en le comparant à une carte des zones de végétation dans la nature actuelle, on est frappé de voir, sur cette dernière, des déviations de même nature. N'est-ce pas là un argument à faire valoir en faveur de la permanence dans l'emplacement des masses continentales ?

d) On a depuis longtemps ⁽²⁾ attiré l'attention sur l'importance prépondérante de l'alimentation du glacier par les précipitations atmosphériques. On peut comprendre ainsi que des moraines ont pu être recouvertes directement par des dépôts sédimentaires renfermant une flore continentale de région pour le moins tempérée. Tout dépend en l'occurrence de l'importance du relief et de l'alimentation du glacier. Ce sont là deux facteurs dont il ne nous est guère possible de connaître l'intervention dans la nature ancienne. Il n'empêche que l'on doit se garder de tirer des conclusions trop hâtives de la présence de restes glaciaires dans les séries anciennes.

⁽¹⁾ Voir notamment les esquisses figurant dans l'ouvrage P. FOURMARIER, *Principes de Géologie*, 3^e édition, 1950, pp. 1407 à 1422.

⁽²⁾ A. DE LAPPARENT en parle dans son *Traité de Géologie*, 4^e édition, 1900, page 278. Il rappelle l'exemple si remarquable du glacier de Waiiau de la Nouvelle Zélande, situé par 43°35' latitude sud, dans une région où les précipitations atmosphériques sont de 3 mètres/an et qui descend jusque 212 m au-dessus de la mer, là où pousse une végétation luxuriante.

A ce propos faisons observer que la zone centrale de la glaciation quaternaire est située par environ 70 degrés de latitude nord dans le Groenland ; ce territoire avec son vaste inlandsis correspond ainsi approximativement à la zone centrale de l'ancienne glaciation quaternaire.

On verra dans cette disposition l'influence prépondérante de l'Atlantique qui permettait l'arrivée de précipitations atmosphériques importantes ; par contre du côté du Pacifique, tant en Amérique qu'en Asie, les chaînes montagneuses récentes formaient obstacle à l'arrivée de l'eau qui devait permettre aux glaciers de se développer et donner le grand inlandsis du Quaternaire. Aussi peut-on se demander, pour expliquer la grande extension des glaciers à l'époque de Gondwana, si la présence d'océans largement ouverts tels l'Atlantique méridional et l'Océan Indien n'était pas plus favorable à une telle disposition que pouvait l'être un continent massif tel que l'imaginent les partisans d'une Pangée groupant en un seul bloc tous les massifs continentaux actuels.

Il est à noter que, dans de telles reconstitutions, c'est précisément à proximité de la bordure d'une masse continentale que les dépôts glaciaires de Gondwana atteignent leur maximum de développement ; ils y sont, d'ailleurs apparentés à des dépôts à faune marine.

La comparaison que nous venons d'établir entre deux périodes glaciaires de première importance demande réflexion.

Néanmoins, nous nous butons malgré tout à la même énigme : Pourquoi n'a-t-on pas rencontré dans l'hémisphère nord l'équivalent de la glaciation de Gondwana ?

A propos des autres époques de glaciations, il importe de rappeler que l'extension des glaciers durant le Précambrien récent est considérable. On en trouve des restes en Australie, en Asie, dans presque toute l'Afrique, dans le nord de l'Europe et dans le Groenland. C'est là une extension bien plus grande que celle des glaciations quaternaires.

La cause de cette différence nous échappe encore. Peut-être convient-il de rappeler ici l'opinion de HARLAND rapportée par L. CAHEN ⁽¹⁾ :

« M. HARLAND dit que dans ces conditions, on a là une explication de ce qui distingue essentiellement le Précambrien du Cambrien, c'est-à-dire l'absence ou la rareté de la faune au Précambrien et son éclosion assez subite à partir du Cambrien : le développement qui aurait pu se faire rapidement à partir des traces que l'on voit dans le Précambrien, a été arrêté par une période glaciaire, qui n'aurait eu son équivalent à aucune période postérieure, étant donné que ni la glaciation carbonifère, ni la glaciation quaternaire n'aurait eu l'importance de celle-là. »

Il ne semble pas qu'on ait trouvé jusqu'ici une explication satisfaisante de ces faits dans un glissement général de la croûte sur son substratum ou bien dans une dérive des continents.

(1) Procès-verbal de la 12^e séance du groupe de travail.

Il n'en est pas moins remarquable qu'après le Précambrien, des glaciations sont connues en Australie, en Afrique australe et en Amérique du Sud, glaciations qui ne paraissent pas avoir leurs équivalents dans l'hémisphère nord. La situation connue à la fin du Précambrien ne se retrouve qu'au Quaternaire où les glaces s'étendent autour du pôle nord comme autour du pôle sud.

L'existence d'un océan d'âge gondwanien à l'emplacement de l'Océan Arctique actuel pourrait être un des facteurs susceptibles d'en fournir l'explication. Néanmoins au Quaternaire il a existé, dans les pays nordiques, une surface couverte de glace malgré la présence de l'Océan Arctique.

L'influence du Continent Antarctique a fait certainement sentir ses effets comme il le fait encore aujourd'hui. Ne serait-ce pas une raison pour penser à sa permanence ?

Nous aurons l'occasion de reprendre la question de Gondwana au chapitre consacré à la paléogéographie.

Nous pensons utile d'attirer, dès à présent, l'attention sur un bref passage de l'ouvrage d'André CAILLEUX sur l'Antarctique ⁽¹⁾. On y trouve une donnée intéressante : L'auteur remarque, en effet, que l'Antarctique est la seule région du globe qui soit à la fois un continent et polaire. A cet égard il diffère complètement de l'Arctique ; il permet la formation d'un énorme inlandsis dont l'influence se marque nettement sur le climat alors qu'il n'y a rien de comparable dans l'hémisphère nord. Son action sur le climat des îles Kerguelen, par 50 degrés de latitude sud est frappante.

Et cependant avant le Quaternaire, le climat de l'Antarctique, comme celui de l'Arctique était pour le moins tempéré.

e) Un grand pas en avant serait certainement fait si l'on pouvait connaître en toute certitude les causes de la glaciation du Quaternaire. Nous savons qu'elle s'est annoncée progressivement par un abaissement continu de la température dans les régions boréales pendant un temps relativement très court du point de vue géologique. La grande calotte glaciaire a disparu sur la majeure partie de sa surface en un temps plus bref encore.

Pour en trouver l'explication, il ne peut pas être question de dérive des continents ni d'un déplacement quelque peu marqué du pôle magnétique ou du pôle astronomique.

Comme le rapporte SCHWARZBACH dans son ouvrage sur les climats anciens ⁽²⁾ plusieurs hypothèses ont été envisagées pour expliquer le développement de la calotte glaciaire arctique, notamment l'intervention des courants marins, influencés éventuellement par la présence de hauts-fonds.

Nous ne pensons pas devoir nous arrêter longuement à l'examen de cette question, car nous ne trouvons pas, même dans l'ouvrage de SCHWARZBACH, des arguments décisifs en faveur de l'une ou l'autre hypothèse.

⁽¹⁾ André CAILLEUX, *Géologie de l'Antarctique*, Soc. d'édition d'enseignement supérieur, Paris, 1963.

⁽²⁾ *Climates of the Past*, pages 227 et suiv.

Peut-être conviendrait-il d'envisager comme nous l'avons déjà signalé à plusieurs reprises, l'intervention d'un facteur extérieur à la Terre, dont les effets seraient de courte durée par rapport à la longueur des périodes géologiques ⁽¹⁾.

Parmi les explications proposées, celle de la variation d'inclinaison de l'axe des pôles sur le plan de l'écliptique permet d'expliquer de façon assez satisfaisante la tendance à l'uniformité des conditions vitales entre les pôles et l'équateur, qui doit retenir spécialement l'attention car elle paraît être l'une des caractéristiques de la paléoclimatologie, troublée seulement à de longs intervalles par l'instauration d'une phase glaciaire.

Si l'axe des pôles était perpendiculaire au plan de l'écliptique, il y aurait une atténuation considérable de la différence de température moyenne existant entre les pôles et l'équateur. L'insolation permanente des régions polaires compenserait dans une large mesure l'obliquité des rayons solaires.

Actuellement l'inclinaison de l'axe des pôles sur le plan de l'écliptique est bien connue : on pourrait croire nécessaire d'admettre un déplacement de l'axe de $23^{\circ} 27'$ pour passer de la situation climatique ancienne à la situation actuelle et même une valeur plus élevée encore pour expliquer l'extension des phénomènes glaciaires au Quaternaire.

Cependant, d'après les considérations développées par BROOKS ⁽²⁾ ; il n'était peut-être pas nécessaire, pour passer des conditions climatiques relativement uniformes des périodes anciennes aux conditions extrêmes des phases de glaciation, qu'il se produisit un changement d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre de l'ordre de $23^{\circ} 27'$. Un mouvement notablement moindre pouvait amener un changement radical dans la répartition des climats.

Un tel raisonnement ne paraît cependant pas suffisant pour expliquer le développement de la glaciation de Gondwana, essentiellement concentrée dans l'hémisphère sud, bien que le tracé des isoflores conduise à admettre un abaissement parallèle de la température dans les régions nordiques, sans que les glaciers s'y soient cependant manifestés. Il reste là un point obscur que ne peuvent pas élucider les données actuelles du problème, même si l'on groupe en une Pangeae tous les continents de l'hémisphère sud.

f) Une brève comparaison entre la période glaciaire quaternaire et celle de l'époque de Gondwana ne paraît peut-être pas inutile ici.

La glaciation de Gondwana paraît bien s'être avancée progressivement du Sud vers le Nord, pour atteindre la zone équatoriale. Il est à noter cependant que dans l'Inde, comme en Afrique et en Amérique du Sud, le relief a joué un rôle important, car les glaciers gondwaniens de ces régions descendaient de zones de relief ; les grands amas de dépôts glaciaires, alternant par endroits avec des intercalations à faune marine sont cantonnés dans les Falkland, l'extrême sud de l'Afrique, la bordure méridionale de l'Australie, la région antarctique.

⁽¹⁾ Voir à ce sujet : P. FOURMARIER, *Principes de géologie*, 3^e édit., t. II, pp. 1423 et suiv. Paris et Liège, 1950.

⁽²⁾ C.E.P. BROOKS, *Climate through the ages*, Em. Benn Ltd. London, 1926.

La glaciation du Quaternaire répond à une règle quelque peu semblable ; les grands amas morainiques sont proches des pôles, mais la glaciation s'est avancée grâce à la présence de hauts reliefs jusque sous l'équateur ainsi qu'on peut s'en rendre compte en Amérique du Sud (Andes) en Afrique (Ruwendori) pour l'hémisphère sud, dans les chaînes himalayennes pour l'hémisphère nord. Il y a là une analogie entre les deux grandes périodes glaciaires qui mérite d'être signalée.

Toutefois, il y a lieu de montrer quelques réserves à cet égard, tout d'abord parce que nous n'avons pas la preuve qu'il existait aux temps gondwaniens, à proximité de la zone équatoriale, des reliefs comparables à ceux des Andes, du Ruwendori ou de l'Himalaya. On peut cependant émettre une hypothèse à cet égard : A l'époque de Gondwana, au nord de l'Inde péninsulaire s'étendait le grand sillon de la Téthys. Au début du Tertiaire, se sont élevées les chaînes himalayennes. N'est-on pas en droit de supposer que la surrection de celles-ci a provoqué, suivant le principe d'isostasie, la descente du territoire s'étendant au Sud. Ceci expliquerait que les dépôts glaciaires de Gondwana de facies exclusivement continental sont aujourd'hui à une altitude moindre qu'à l'origine. D'autre part, nous nous butons toujours au même obstacle : le grand développement de la glaciation de Gondwana dans l'hémisphère sud sans contrepartie réelle dans l'hémisphère nord.

On est forcé d'en conclure que la glaciation de Gondwana est due à l'intervention d'un facteur exceptionnel tout autre que la dérive continentale ou le déplacement de l'axe des pôles.

Nous avons signalé ci-avant (page 195) l'intérêt que suscite, pour l'évolution des conditions climatiques, la pauvreté des traces de vie dans le Précambrien et l'Infracambrien. Ne faut-il pas voir là un indice en faveur d'un abaissement anormal de la température moyenne sur toute la surface du globe, à l'intervention d'une cause manifestement plus efficace que celle des glaciations du Permo-Carbo-nifère et du Quaternaire ?

Nous croyons devoir signaler encore une étude du professeur P. BELLAIR, intitulée : « Inlandsis et problème des glaciations » ⁽¹⁾. Il ne nous est pas possible d'en exposer ici la teneur. Cependant, nous croyons utile de citer une phrase de cet article : « ...l'Antarctique apparaît dès lors comme le réfrigérateur du globe. A ce titre, son importance est capitale dans le climat général du globe ; c'est probablement le volant d'inertie amortissant les irrégularités climatiques à l'échelle mondiale ».

D'autre part, on a établi que la calotte glaciaire antarctique augmente de deux fois et davantage, la différence normale de température entre l'Antarctique et l'équateur ⁽²⁾.

⁽¹⁾ An. Soc. Géol. Belgique, t. LXXXVII, 1963-1964. Bull. n° 6, Liège, 1964.

⁽²⁾ *Scientific American*, Septembre 1962.

Il serait sans doute exagéré de vouloir en tirer des conclusions pour les variations de climat au cours des périodes géologiques. Si cependant, le continent antarctique avec l'Océan Antarctique et l'Océan Indien était un trait stable de la surface de la Terre, comme le serait aussi, dans cette hypothèse, une grande partie de l'Océan Arctique, c'est-à-dire le bassin canadien, à l'autre extrémité de l'axe des pôles, ne trouverait-on pas là l'amorce d'une explication de la plus grande extension des glaciations dans l'hémisphère sud, sans devoir recourir à des déplacements exagérés des pôles ou des continents ?

Il n'est pas inutile à ce propos d'ajouter une remarque :

Actuellement la calotte glaciaire antarctique fait sentir ses effets sur une surface énorme, comme nous venons de le rappeler. C'est ainsi qu'aux îles Kerguelen, par 50 degrés de latitude sud environ, de grands glaciers subsistent entourés d'une végétation pauvre, caractéristique des terres glacées, contrastant avec la présence de couches de charbon d'âge tertiaire. Sous la même latitude dans l'hémisphère nord, la flore atteint un tout autre développement. Le climat des Kerguelen est, en grande partie, la conséquence du courant froid de l'Océan Indien, courant dont la basse température trouve son origine dans la calotte glaciaire antarctique.

Si pour une raison astronomique ou autre, le climat dans l'hémisphère sud venait à se refroidir encore davantage, au point que des glaciers se développent largement en Amérique du Sud, en Australie, voire même en Afrique Australe, on peut se poser la question : Jusqu'à quelle latitude se feraient sentir les effets de cette extension des glaciers, dans une région du globe où les courants marins peuvent se développer librement ? Ne peut-on pas penser à un phénomène de cette nature à l'époque de Gondwana, sans qu'il soit besoin de modifier sensiblement la position relative des terres de Gondwana ?

Il ne faut pas oublier, d'ailleurs, que la surrection de l'Himalaya a provoqué après la période de glaciation permo-carbonifère, un déplacement relatif de l'Inde par rapport au Continent Asiatique, mouvement que l'on peut supposer s'être fait du Sud vers le Nord.

Dans l'hypothèse de la permanence de l'Antarctique depuis une époque très reculée, nous comprenons sans peine que diverses glaciations se sont étendues selon certaines probabilités dans l'hémisphère sud au Silurien ou au Dévonien sans avoir l'importance des phases principales distinguées ci-avant, sans avoir non plus leurs équivalents dans l'hémisphère septentrional ⁽¹⁾.

A propos des glaciations anciennes, il n'est pas inutile de rapporter une observation de HOLMES ⁽²⁾ :

La distribution des tillites du Précambrien semble indiquer que des régions actuellement distantes de moins de 90° (par exemple : Afrique Centrale et Spitzberg-Norvège, Australie du Sud et Chine-Sibérie) étaient largement séparées dans les temps précambriens, de 120° à 180°.

(1) Voir le tableau 1 annexé au mémoire : L. CAHEN, *Glaciations anciennes et dérive des continents*, Ann. Soc. Géol. Belg., t. LXXXVI, 1961-1962, Bull. p. 19.

(2) A. HOLMES, *A revised Geological Time, Scale*. Trans. Edinburgh geol. Soc., vol. 17, part. 3, décembre 1959.

Que les corrélations proposées soient exactes ou non, nous avons la vision d'un monde dont les traits sont non seulement différents de ceux d'aujourd'hui, mais sont aussi différents de ceux existant au temps des glaciations permo-carbonifères.

Mais pour préciser davantage, il faudrait déterminer plus exactement les relations dans le temps entre les manifestations observées dans les diverses parties du monde.

Nous ne voudrions pas achever ce chapitre de notre rapport sans signaler à l'attention du lecteur le travail du professeur KREMP ⁽¹⁾ sur le climat de l'Antarctique à l'époque tertiaire et une cause possible de la phase glaciaire récente.

Cet auteur note, comme nous l'avons fait, le changement considérable qui s'est fait dans l'Antarctique, compte tenu de la végétation à l'époque tertiaire. A son avis, la cause doit en être cherchée dans la surrection progressive du continent, provoquant un abaissement continu de la température moyenne, sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des phénomènes de dérive.

L'auteur fait remarquer, d'autre part, que la présence de couches de charbon n'est pas nécessairement l'indice d'un climat tropical ; bien au contraire, à l'heure actuelle les dépôts de tourbe sont caractéristiques des climats tempérés ou froids. D'autre part, il semble établi aujourd'hui que la longue nuit polaire n'est pas un obstacle absolu à la croissance de végétaux.

Il suffirait, par conséquent de changements relativement minimes dans le relief de la Terre ou de l'une de ses parties pour provoquer un changement important du climat d'une région déterminée.

Nous retiendrons de cet exposé que des causes multiples peuvent intervenir dans la répartition des anciens climats ; les unes sont propres à la Terre, mais des causes extérieures nous paraissent devoir être prises également en très sérieuse considération.

Nous ne croyons pas pouvoir nous arrêter plus longuement à la question des glaciations anciennes. Nous renvoyons à ce sujet à un article publié récemment par le professeur BELLAIR de l'Université de Paris ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Gerhard O.W. KREMP, *Antarctica. The climat of the Tertiary and a possible cause for our ice age in Antarctic Geology*, Proc. first intern. sympos. on Antarctic geology, Cape Town, 1963, North Holland publishing Cy.

⁽²⁾ P. BELLAIR, *Réflexions sur les glaciations*, Rev. de Geogr. phys. et de Géol. dynam., 2^e série, vol. VIII, fasc. 5, novembre-décembre 1966.

CHAPITRE V

LES ENSEIGNEMENTS DE LA PALÉONTOLOGIE ET DE LA BIOLOGIE

La paléontologie nous a été d'un grand secours pour la reconstitution des anciens climats ; elle nous sera aussi d'une aide précieuse au chapitre consacré à la paléogéographie. Par elle-même, elle peut d'ailleurs contribuer dans une mesure appréciable à serrer de plus près une solution éventuelle du problème de la Dérive des Continents. Nous allons exposer quelques considérations à ce sujet.

1. Les sauriens permotriasiques de Madagascar appartiennent à la branche qui a donné naissance aux oiseaux ; par contre, les sauriens de même âge de l'Afrique Australe se rattachent à la branche d'où sont issus les mammifères. On pourrait en déduire, sur cette seule proposition qu'il y eut une séparation nette entre ces deux parties de l'Afrique à l'époque considérée. Peut-être la fosse du Mozambique existait-elle déjà comme véritable zone de subsidence dès le Permien.

Il est curieux, par contre de noter que le professeur PIVETEAU ⁽¹⁾ a montré la curieuse similitude des faunes ichtyologiques de Madagascar, du Spitzberg, du Groenland et de l'Europe occidentale à l'époque du Permo-Trias.

2. Dans un article présenté au Symposium de 1963 sur la géologie de l'Antarctique, le professeur LESTER KING estime que la flore de Gondwana à *Glossopteris* et *Gangamopteris* découverte en Antarctique présente une ressemblance frappante avec celle de l'Afrique et de l'Inde ; respectivement 27 et 28 formes de plantes de ces deux pays se trouvent aussi en Antarctique.

L'auteur de cette note ajoute qu'au Trias l'analogie entre les flores est encore très marquée dans toutes les parties du Globe dont l'ensemble correspond au continent de Gondwana.

Ce sont là, en apparence tout au moins, des arguments pour admettre l'existence de ce continent suivant les vues de Éd. SUESS, c'est-à-dire l'union en un bloc unique des continents de l'hémisphère sud, y compris l'Inde péninsulaire et une partie de l'Arabie.

(1) C. R. Somm. Soc. Géol. France, 1937, p. 42.

R. FURON, *Géologie de l'Afrique*, 2^e édition, p. 44.

J. PIVETEAU in BESAIRIE, *Quelques résultats nouveaux dans l'étude du Karroo malgache*, Public. Congrès géol. Internat., session Mexico, 1966. Commission de corrélation du système du Karro, page 87.

3. Nous avons signalé dans la première partie que les plus anciens sédiments non plissés connus actuellement sur les fonds océaniques ne paraissent pas plus anciens que le Crétacé. Il serait délicat dans l'état actuel de nos connaissances, d'affirmer qu'il en est ainsi partout.

On pourrait voir là un argument en faveur de la théorie de l'expansion. Cependant dans cette supposition il faudrait admettre que l'expansion a cessé depuis le début du Crétacé pour le moins. L'argument vaut aussi pour la thèse de la dérive, puisque tous les grands océans sont dans une situation comparable.

4. A l'appui de la thèse de la dérive par dislocation de la Pangée au Mésozoïque, on peut avancer un argument tiré de l'ouvrage de Edg. CASIER (1) :

« On sait que des rapprochements ont été faits entre faunes (Lamentins, Poissons) et flores se retrouvant des deux côtés de l'Atlantique. Je voudrais insister un peu sur ce qui a été révélé dans cet esprit par l'étude de la faune ichthyologique éocrétacique du Bassin du Gabon d'une part et celle de Bahia (Brésil) de l'autre. D'après l'étude de la première par W. WEILER (1923) pour la partie de ce bassin située en Guinée Espagnole, puis par C. ARAMBOURG et D. SCHNEEGANS pour Coccobeach, au Gabon, quelques éléments indiquent une telle similitude et cette impression est aussi celle qui se dégage d'un examen auquel je viens de procéder d'un nouveau matériel ichthyologique en provenance du bassin du Gabon. La constitution du genre *Diplomystus* commun aux deux régions suggère des mœurs planctiques et peu d'inclination aux grands déplacements. Pour l'ensemble des poissons, d'ailleurs, les adaptations analogues et le même type d'association engagent plutôt à croire à une proximité bien plus grande des deux régions entre elles au Crétacé inférieur ».

L'auteur ajoute qu'il existe des coïncidences analogues du point de vue ichthyologique pour un Caelacanthidé du genre *Mawsonia* de part et d'autre de l'Atlantique.

5. La partie septentrionale de cet océan fournit aussi quelques données intéressantes. Comme l'a fait remarquer M. LERICHE dès 1940, les auteurs qui ont tenté de paralléliser les terrains tertiaires d'Europe et des États-Unis d'Amérique ont été frappés des différences que présentent les faunes d'invertébrés des deux côtés de l'océan ; aussi semble s'imposer la conclusion que l'Atlantique nord est au moins antérieur au Tertiaire. Pour WEGENER la séparation des deux continents se serait faite dès le milieu du Tertiaire pour se poursuivre encore à l'époque actuelle. Il y a donc là une contradiction évidente.

Cependant l'étude de la faune ichthyologique entreprise par M. LERICHE montre une concordance nette entre les niveaux situés de part et d'autre de l'Océan.

D'autre part, le tracé des isoflores établi par RALPH W. CHANEY pour l'époque éocène dans le Nord Atlantique est très semblable au tracé établi pour l'époque

(1) E. CASIER, *Propos sur l'importance des fluctuations de l'activité solaire dans le déterminisme des transgressions marines et d'autres facteurs physiques de l'évolution de la biosphère*, Bull. Inst. roy. Sc. Natur. de Belgique, t. XXXVIII, n° 45, 1962, p. 23.

actuelle. La répartition des flores est en harmonie avec les isothermes, abstraction faite des modifications apportées du fait des déformations récentes de la croûte terrestre. L'auteur signale qu'il en fut de même dans le Pacifique Nord.

Il en résulte que selon toute vraisemblance les océans et les continents de l'hémisphère nord se trouvaient dans la même situation l'un par rapport à l'autre qu'à l'époque actuelle ; ils avaient aussi la même disposition par rapport au pôle. Comme aujourd'hui, il devait exister dans le Pacifique Nord et l'Atlantique nord de grands courants d'allure cyclonique.

Il y a là un argument contre la théorie des translations continentales, du moins si l'on veut prétendre que la séparation Amérique — Europe s'est faite à une époque plus récente que l'Éocène ⁽¹⁾.

Dans la première partie de l'ouvrage, nous avons signalé un article de NOE-NYGAARD, paru dans le *Quarterly Journal of the Geological Society of London*.

La présence d'une intercalation de dépôts sédimentaires à flore terrestre et couche de charbon, implique une interruption passagère dans des venues volcaniques s'élevant au-dessus du niveau de la mer. Ce fait ne peut que confirmer les conclusions de CHANEY sur la permanence des caractères géographiques de l'Atlantique septentrional, au moins depuis le Tertiaire ce qui est en opposition avec la conception de WEGENER.

6. La répartition de certains groupes animaux peut jeter quelque lumière sur le problème de l'isolement ou de l'accolement des continents durant l'ère secondaire ⁽²⁾.

a) Tel est le cas pour les monotrèmes habitant actuellement l'Australie, la Tasmanie, la Nouvelle Guinée.

Ils dérivent probablement des mammifères très primitifs mésozoïques du groupe ou du niveau morphologique des Dicotodontidés voisin des Triconodontes du Jurassique, représentés notamment par Morganucodon (issus des Teroptides) et qui, cosmopolite au Jurassique, ont survécu en Australie grâce à son isolement géographique avant l'expansion des vrais mammifères.

Le Morganucodon existe au Pays de Galles au Jurassique supérieur ; le Docodon se rencontre au Wyoming à l'époque du Jurassique.

b) Les marsupiaux méritent aussi de retenir l'attention. Actuellement les uns sont cantonnés dans l'Amérique du Sud, d'autres en Australie, Tasmanie, voire dans les îles de Célèbes, Nouvelle Guinée.

Ils dérivent probablement des Triconodontes du Mésozoïque (Crétacé supérieur) connus en Amérique du Nord et en Asie et qui existaient encore en Europe à l'Éocène et à l'Oligocène.

⁽¹⁾ Voir à ce sujet : P. FOURMARIER, *L'intérêt des études de paléontologie dans l'examen du problème de la dérive des continents*, Ann. Soc. Géol. Belgique, t. LXIV, Bull. 1941.

⁽²⁾ D'après une note manuscrite du professeur P. BRIEN.

Le peuplement du globe par les marsupiaux à la fin du Crétacé et au début du Tertiaire est parfaitement compatible avec une géographie voisine de la nôtre. Le peuplement de l'Australie s'est fait avant l'expansion des vrais mammifères ; on sait que ce continent n'a pas de vrais mammifères, si ce n'est ceux introduits par l'homme, mais exclusivement des monotrèmes et des marsupiaux.

Ces divers organismes sont venus de l'hémisphère nord, les uns se rendant en Australie et îles voisines, les autres en Amérique du Sud. Par contre, ils semblent faire défaut en Afrique. On pourrait peut-être voir là une indication intéressante pour prétendre que l'Afrique était, dès la fin du Crétacé pour le moins, nettement séparée de l'Amérique d'une part, de l'Australie d'autre part.

Nous avons trouvé des renseignements de grand intérêt dans un petit ouvrage publié par J. MILLOT ⁽¹⁾ en 1953. Ce savant admet que, de façon générale, pour un grand nombre de groupes d'animaux le peuplement s'est fait au départ des régions nordiques.

La figure 2 de cet ouvrage ⁽²⁾ que nous reproduisons ici (Fig. 33) est significative à cet égard en ce qui concerne la provenance de l'extension des grands Dinosauriens depuis le Jurassique.

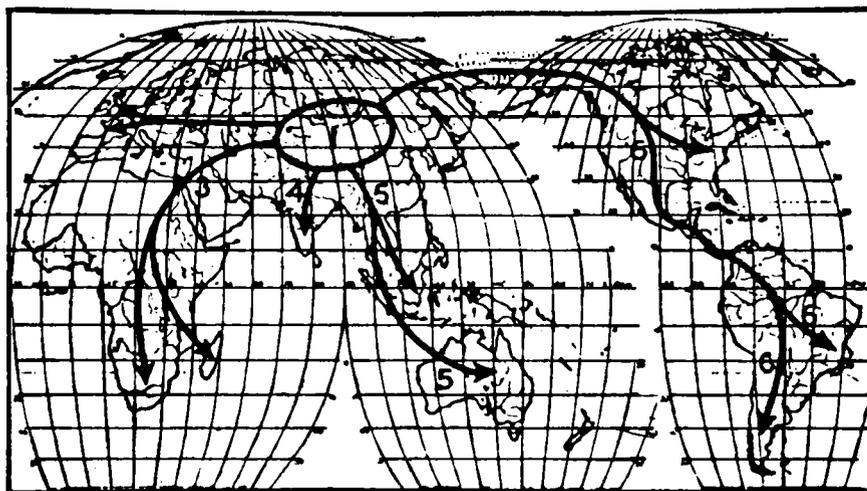


FIG. 33. — L'origine des Dinosauriens, d'après OSBORN.

MILLOT étend à de nombreux organismes sa conception de l'origine nordique ; il se pose la question :

« Pourquoi l'hémisphère nord aurait-il été pour beaucoup de groupes la source principale des formes évolutives ? »

⁽¹⁾ J. MILLOT, *Le continent de Gondwana et les méthodes de raisonnement de la biogéographie classique*, Ann. des Sc. Natur. Zoologie, II^e sér., 1953.

⁽²⁾ Cette figure est tirée de l'ouvrage : H.F. OSBORN, 1929, *The revival of Central asiatic Life*, Nat. Hist. XXIX, 4.

En réponse à cette question, il admet que deux facteurs dominants sont intervenus :

a) l'existence de grands espaces holarctiques propices à l'épanouissement des espèces ;

b) des changements climatiques successifs plus marqués dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, propices à la fois à la variation et à la sélection.

L'auteur termine son travail par cette phrase : « Si certains problèmes particuliers restent à résoudre, la répartition des invertébrés dans son ensemble est loin d'être totalement inexplicable dans l'acceptation de la permanence des continents sous leur forme approximative actuelle ».

Ces considérations n'apportent pas de preuve absolue ; cependant elles semblent plutôt défavorables à la théorie de la dérive.

7. Arthur HOLMES ⁽¹⁾ fait remarquer que les enseignements de la paléontologie n'ont pas apporté de preuve décisive en faveur de la théorie de la dérive des continents. Il rapporte à ce propos l'opinion exprimée en 1943 par G.G. SIMPSON : sur les reptiles connus du Trias en Amérique du Sud, 43 des familles et 8 % des genres sont connus en Afrique, aucune espèce n'est commune aux deux continents. Et il cite la phrase de SIMPSON : " These figures are decidedly inconsistent with any direct union of corresponding part of South-America and Africa ".

Toutefois, HOLMES, rapporte, à la page suivante de son ouvrage que près du sommet du Carbonifère en Afrique du Sud comme en Amérique méridionale, il existe une mince formation argileuse, d'origine lacustre ou de delta, renfermant les ossements d'un petit saurien, le *Mesosaurus* qui n'a été rencontré nulle part ailleurs dans le Monde.

Nous concluerons des faits rapportés dans le domaine de la paléontologie qu'il y a lieu de montrer beaucoup de prudence lorsqu'on veut tirer des conclusions positives des restes d'êtres fossiles, ou tout au moins de certains d'entre eux. Il serait hasardeux de vouloir leur accorder la priorité dans l'étude de la théorie de la dérive.

Ajoutons encore un renseignement tout récent relatif à cette question. Il découle d'une note présentée le 26 avril 1965 à la Société Géologique de France par M. ÉLIE CAROSA, qu'il est possible d'établir des corrélations précises entre le Nord-Ouest de l'Europe et la province indo-malgache sur la base de la répartition des genres *Indosplinctes* et *Indocephalites* ; ces fossiles caractérisent deux horizons parfaitement distincts du Callovien. L'auteur de la note a pris comme type le Callovien du Poitou.

8. Dans le même domaine, un fait retiendra encore notre attention. Dans son ouvrage « Géologie de l'Antarctique », André CAILLEUX ⁽²⁾ écrit, à propos de l'endémicité des êtres vivants et des restes fossiles :

⁽¹⁾ A. HOLMES, *Principles of Physical Geology*, New edition, p. 1221, 1965.

⁽²⁾ A. CAILLEUX, *Géologie de l'Antarctique*, Soc. d'édit. d'Enseign. Sup., Paris, 1963.

« Un inventaire de toutes les espèces nommées conduit pour 3.000 espèces antarctiques actuelles à 60-65 % ce qui plaiderait pour un certain isolement ; et pour 240 espèces du Cambrien au Cénozoïque à 65-70 %, ce qui plaiderait, par une sorte de réitération, pour l'ancienneté de cet isolement ».

Ces estimations, toutes provisoires qu'elles soient encore, ne portent pas moins à réfléchir. On y trouvera sans aucun doute un argument contre toute conception de dérive au sens Wégenérien. Hâtons-nous d'ajouter qu'elle n'est pas en contradiction avec un glissement d'ensemble de la croûte terrestre. Elle s'oppose, de toute manière à la reconstitution d'une Pangée à l'époque de Gondwana et antérieurement à celle-ci.

9. Dans un autre ouvrage ⁽¹⁾, André CAILLEUX signale encore que l'endémicité est plus forte pour les grandes terres que pour les petites ; elle est de 90 pour l'Australie-Tasmanie, de 85 pour Madagascar, de 81 pour la Nouvelle Zélande, et il écrit : « Ainsi se confirme l'ancienneté de l'isolement des trois terres que l'étude des richesses avait clairement désignées comme refuges de groupes archaïques »

Le même auteur prend nettement position dans le problème qui nous occupe ; dans ses conclusions, il écrit en effet (page 120) :

« La pauvreté des faunes et flores des îles océaniques, surtout des plus petites, leur composition différente de celles des continents, attestent qu'elles proviennent d'apports par dessus les océans et les bras de mer. Les îles en cause ne sont ni les débris de ponts aujourd'hui effondrés, ni les témoins ou reliquats d'une dérive qui aurait séparé des continents jadis réunis. Toute la répartition actuelle est explicable en admettant que les grandes masses continentales et océaniques ont gardé dans l'ensemble au cours des temps, du moins au cours des temps récents la même configuration ».

D'aucuns trouveront peut-être cette conclusion trop absolue. Nous avons cru bien faire en la soumettant à l'appréciation de ceux qui liront ce rapport, comme nous l'avons fait pour des travaux à tendance tout opposée.

Notre savant confrère, le professeur J. LEBRUN, a bien voulu nous donner son avis sur la question de l'endémisme dans les îles atlantiques ; il nous écrit à ce sujet :

« L'ancienneté de cette flore archipélienne et son endémisme élevé, ne peuvent en aucune façon, fonder un argument en faveur — pas plus qu'en défaveur d'ailleurs, — de la théorie de la dérive des continents. J'ajoute que cette théorie n'est que rarement invoquée — parmi de très nombreux travaux — à propos de l'analyse des particularités de cette « flore atlantique ».

10. Sans vouloir nous étendre trop longuement sur ces questions dépendant du domaine de la biologie, nous attirerons encore l'attention du lecteur sur deux travaux.

(1) A. CAILLEUX, *Biogéographie mondiale*, Presses universitaires de France, 1961, Paris, page 118.

L'un est relatif à la faune et à la flore des îles Galapagos. Son auteur M. DORST ⁽¹⁾ cherche à établir par l'étude des êtres vivant dans ces îles que celles-ci n'ont jamais été reliées directement au continent ; on y trouve des affinités plus étroites avec l'Amérique Centrale et même avec la région antillaise qu'avec l'Amérique du Sud.

L'autre note est due à M. A. AUBREVILLE ⁽²⁾ ; son auteur tente une comparaison entre diverses grandes régions du Globe. Dans ses conclusions, il écrit :

« 1° La grande forêt dense guyano-amazonienne comme la forêt dense guineo-congolaise est caractérisée par une grande richesse en Légumineuses arborescentes et arbustives. C'est un caractère commun essentiel de la flore des deux régions équatoriales qui n'est pas partagé par les forêts denses asiatico-malaises et australo-papoues, et qui, par conséquent, peut servir de critère à une distinction chronologique à l'échelle de ces grandes régions.

2° » Les Caesalpiniées arborescentes sont beaucoup plus nombreuses (en genres) dans la flore équatoriale que dans la flore américaine homologue.

3° » La représentation en nombre de genres des Mimosées dans les deux régions est équivalente.

4° » La grande abondance des Papilionacées arborescentes dans la forêt de l'Amazonie et des Guyanes est un fait caractéristique : un peu plus du double des Papilionacées africaines de la forêt équatoriale.

5° » Les distinctions dans la répartition des genres de Légumineuses entre sous-familles de l'Afrique à l'Amérique équatoriale sont beaucoup plus accusées lorsque la comparaison est faite à l'échelle des tribus et de certains genres.

6° » Quelques genres tropicaux, constituant apparemment les éléments d'une vieille flore tropicale humide, sont communs à l'Amérique et à l'Afrique : Copaïfera-Guibourtia, Cassia, Cynometra, Crudia, Parkia, Albizzia, Pithecellobium (s.l.), Dalbergia, Pterocarpus, Erthrina, Monchocarpus-Derris.

A ceux-là doivent être ajoutés ceux qui ne sont représentés que par des lianes dans les forêts denses humides : Acacia, Entada, Bauhinia.

7° » Ces éléments communs pantropicaux, la richesse commune dans certain groupements, peuvent être considérés comme le signe d'une liaison des flores équatoriales américaines et africaines, mais dans des temps très anciens, car les faits de divergence dans la répartition entre tribus et l'endémisme générique sont très accentués. »

Il serait évidemment hasardeux de vouloir tirer de ce travail une conclusion pour le problème que nous avons à étudier. On pourrait peut-être voir dans certaines conclusions de M. AUBREVILLE des arguments en faveur d'une connexion

⁽¹⁾ J. DORST, *Quelques affinités de la faune des îles Galapagos*, C. R. somm. Séances Soc. Biogéographie. Assemblée générale du 16 avril 1959.

⁽²⁾ A. AUBREVILLE, *Étude comparée de la famille des Légumineuses dans la flore de la forêt équatoriale africaine et dans la flore de la forêt amazonienne*, même publication.

ancienne relativement étroite entre l'Afrique et l'Amérique méridionale ; à l'opposé, on pourrait déduire du 1^o que l'Afrique et les régions australiennes étaient séparées par l'océan depuis très longtemps. Les données paraissent toutefois encore insuffisantes pour permettre de prendre position. Encore une fois, la prudence s'impose.

A cet égard, l'avis du professeur J. LEBRUN mérite d'être rapporté.

11. D'après ce que nous avons exposé précédemment, l'existence du continent de Gondwana, réunissant en un bloc unique les masses continentales de l'hémisphère sud est l'un des arguments de première importance à l'appui de la dérive des continents. Les protagonistes de cette conception ne manquent pas d'insister sur l'analogie très grande de la flore dite à *Glossopteris* sur cette vaste étendue de la surface du globe. Nous avons mentionné notamment l'opinion du professeur LESTER KING appelant l'attention sur la ressemblance de la flore gondwanienne de l'Antarctique avec celle de même âge de l'Afrique et de l'Inde.

Il était intéressant de savoir si, aux époques plus récentes, on observe de semblables analogies entre les territoires de l'ancien continent de Gondwana.

D'une lettre du professeur LEBRUN nous tirons les indications rapportées ci-dessous :

a) Dans la bande tropicale et subtropicale, « l'affinité floristique est manifeste. Il apparaît un fond commun entre l'Amérique tropicale (zone des forêts denses amazoniennes), l'Afrique tropicale (bassin du Congo) et le N.W. de l'Australie qui appartient déjà à la région indo-malaise. Mais cette affinité se restreint au niveau des genres et des familles. De part et d'autre, ceux-ci ont évolué indépendamment. »

En fait, il n'existe qu'un petit nombre d'espèces communes. Notre confrère conclut en écrivant :

« Le fond tropical humide des trois continents est très ancien. Il a évolué sur place et depuis longtemps d'une manière différente. *La spéciation s'est faite d'une manière indépendante dans des territoires qui, d'ailleurs, étaient climatiquement isolés de longue date* ».

b) Dans le cas des zones tropicales sèches (forêt claire et savane), la conclusion est la suivante :

« La conclusion est ici assez claire : la communauté de ces diverses flores sèches est très ancienne et leur mise en place, leur spéciation n'implique aucun rapport récent. »

c) « Les flores extratropicales si caractéristiques de l'Amérique du Sud, de l'Afrique du Sud et de l'Australie *ont très peu de choses en commun* ».....

« Actuellement les flores des trois continents austraux sont, au total, bien plus différentes qu'elles l'étaient à l'époque permo-carbonifère. »

Cette dernière phrase est d'importance primordiale ; les partisans de la dislocation du continent de Gondwana au début du Mésozoïque y trouveront un argument en faveur de leur hypothèse.

Mais peut-on comparer la spéciation des plantes du Permo-Carbonifère à celle des flores plus récentes, du Tertiaire par exemple ?

A propos des flores à l'époque de Gondwana, nous trouvons un travail récent dû à EDNA P. PLUMSTEAD ⁽¹⁾. Son auteur fait observer que, depuis le Dévonien inférieur jusqu'au Jurassique inférieur, l'Inde, l'Antarctique orientale, l'Australie, l'Afrique au Sud du Sahara et la partie orientale de l'Amérique du Sud appartiennent à une même province quant aux caractères de la flore. Cette flore diffère nettement de celle de l'Amérique du Nord, de l'Europe et de la masse principale de l'Asie.

Une telle situation implique forcément la rupture et la disjonction d'une masse continentale unique dès après le Jurassique inférieur ; elle vient à l'appui des résultats obtenus par l'étude du paléomagnétisme, pour soutenir la thèse mobiliste.

12. Dans les recherches sur les déplacements éventuels des continents, l'emploi des données de la biologie est extrêmement délicat. Que faut-il penser par exemple des résultats auxquels est arrivé A. LOURTEIG par ses recherches sur la distribution géographique des Mayacacées ⁽²⁾.

Toutes les espèces sont propres à l'Amérique du Sud et aux Antilles à l'exception d'une seule qui se rencontre, dans un espace fort étroit, en bordure de la côte atlantique de l'Afrique, à Benguella. N'y aurait-il pas là un problème curieux s'il s'agissait de fossiles du Mésozoïque. La distribution générale du genre ferait pencher la balance en faveur de l'écartement des continents ; la seule espèce trouvée à Benguella paraîtrait, au contraire, un argument en faveur de l'accolement ou de la plus grande proximité des deux masses continentales !

Sur la base de la découverte de petits organismes cavernicoles dans la région cantabrique, le professeur A. VANDEL de Toulouse croit tenir un argument de quelque valeur en faveur de la thèse de la dérive des continents ⁽³⁾.

En effet, ce nouveau type, le plus primitif que l'on connaisse de la famille des *Trichoniscidae* a des affinités incontestables avec un autre type cavernicole recueilli dans une grotte du Mexique Central. A ce sujet, VANDEL écrit :

« Cependant ces deux genres dont le premier est cantonné dans une grotte du nord de l'Espagne, tandis que le second n'est connu que d'une caverne du Mexique Central sont actuellement séparés par toute la largeur de l'Océan Atlantique.

« Pour interpréter cette situation, il convient tout d'abord de rappeler que ces deux genres représentent des relictés fort anciennes qui n'ont pu subsister que parce qu'elles se sont réfugiées dans le milieu conservateur constitué par le monde souterrain.

⁽¹⁾ Edna P. PLUMSTEAD. *Evidence of vast lateral movements of the Earth's Crust provided by fossil floras*, Intern. Union of Geol. Sciences, The Upper Mantle Symposium. New Delhi, 1964.

⁽²⁾ A. LOURTEIG, *Distribution géographique des Mayacacées*, C. R. Somm. Séances Soc. Biogéographie, 42^e année, Numéro spécial, décembre 1965.

⁽³⁾ A. VANDEL, *Sur l'existence d'Oniscoïdes très primitifs menant une vie aquatique et sur le polyphylétisme des isopodes terrestres*, Ann. de Spéléologie, t. XX, fasc. 4, 1965. Édition du centre national de la Recherche scientifique.

» C'est pourquoi on ne saurait interpréter la distribution de ces deux genres en faisant appel à la configuration actuelle de la terre. Pour rendre compte de la répartition des relictés, il convient de remonter dans le passé. »

Le professeur VANDEL fait appel aux théories mobilistes. Il admet, sur la base des reconstitutions de A.B. BAKER que, conformément aux idées de WEGENER, l'Amérique du Nord et l'Europe se sont écartées progressivement l'une de l'autre pour permettre la formation de l'Atlantique Nord. Il admet notamment que l'Espagne se trouvait dans le prolongement de Terre Neuve (Fig. 34).



FIG. 34. — Les relations de l'Espagne et de l'Amérique, d'après BAKER.

(Figure reproduite avec autorisation du C.N.R.S.)

Divers auteurs se sont ingéniés à réaliser de semblable essais. Nous ne croyons pas devoir nous y attarder pour le moment. Nous ferons part cependant de deux remarques :

La première est que, en bordure de l'océan, tout le long de la Chaîne des Appalaches, affleure le Trias. Au Groenland, au Spitzberg, dans les îles Lofoten, le Mésozoïque est également bien représenté. On peut affirmer que l'Atlantique Nord existait sous une forme proche de sa forme actuelle depuis le début des temps secondaires. Les genres cavernicoles d'Espagne et du Mexique, remontent-ils aussi loin dans le passé ?

La seconde remarque est la suivante : Jusqu'à quel point est-il permis de mettre l'Espagne en connexion étroite avec la côte orientale de l'Amérique du

Nord ? Si l'on se reporte à divers ouvrages publiés sur le continent américain ⁽¹⁾ on est tenté de répondre par la négative. D'autre part, il ne faut pas oublier qu'il a existé durant le Paléozoïque un arrière pays de la chaîne appalachienne, actuellement effondré sous les eaux de l'Océan et recouvert par du Mésozoïque. Est-il raisonnable, dans ces conditions, d'établir une reconstitution paléogéographique comme celle qui a retenu l'attention du professeur VANDEL et que nous reproduisons ici ?

Dans ces conditions, nous hésitons à nous rallier aux conclusions du savant zoologiste français lorsqu'il écrit :

« 4) Les ressemblances incontestables que l'on relève entre les deux genres *Cantabroniscus* et *Typhlotricholigioides* nous conduisent à faire remonter leur origine à l'époque où l'Espagne était contiguë aux côtes de l'Amérique du Nord, c'est-à-dire au Carbonifère ».

Il y a là une pétition de principe que nous admettrons bien difficilement.

⁽¹⁾ Voir notamment : Philip B. KING, *The evolution of North America*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1959.

Marshall KAY, *North American geosynclines*, The Geol. Soc. of America, Memoir 48, 1951.

CHAPITRE VI

LES ENSEIGNEMENTS DE LA PALÉOGÉOGRAPHIE

Les reconstitutions paléogéographiques doivent retenir spécialement l'attention de ceux qui s'attachent à l'étude de la Dérive des continents et, de façon plus générale, aux transformations de l'aspect géographique de la surface du Globe au cours des temps.

Certes, il ne nous est pas possible de reprendre l'étude de la paléogéographie dans toute son ampleur. Nous porterons spécialement notre attention sur la période correspondant à la fin du Paléozoïque et au début du Mésozoïque.

C'est sur la base de l'analogie si remarquable des flores dans l'hémisphère sud, qu'Éd. SUESS ⁽¹⁾, comme nous l'avons déjà rapporté, avait imaginé l'existence, à cette époque, d'un vaste continent dit « Continent de Gondwana » qu'il serait peut-être plus correct d'appeler Terres de Gondwana, à l'exemple d'André CAILLEUX.

Il s'agit en l'occurrence de vastes étendues de l'hémisphère austral joignant en un bloc continental unique l'Amérique du Sud, l'Afrique Centrale et Australe, Madagascar, une partie de l'Arabie, l'Inde péninsulaire, l'Australie et l'Antarctique. Ces territoires présentent à l'époque du Permo-Carbonifère deux caractères communs pour le moins : d'une part, la présence d'importantes formations glaciaires et, d'autre part, une grande uniformité de la flore caractérisée notamment par les *Glossopteris* et *Gangamopteris*, dans des formations sédimentaires fort semblables dans toute cette vaste étendue.

Suivant les idées de SUESS la dislocation de cet immense continent se serait faite au cours des temps mésozoïques pour réaliser progressivement la disposition géographique actuelle. Les océans séparant aujourd'hui les parties disjointes de cet énorme continent résulteraient d'après lui, de vastes effondrements à l'endroit de l'Atlantique, de l'Océan Antarctique et de l'Océan Indien.

Cette conception d'immenses blocs effondrés et recouverts actuellement par les eaux marines ne cadre plus avec ce que l'on sait de la nature des fonds océaniques. Dans ces conditions, la transformation d'un éventuel continent unique en une série de blocs isolés peut résulter soit d'une action de dérive au sens de WEGENER, soit de l'expansion du globe avec déchirures de sa croûte solide, à moins que l'on s'en tienne simplement à la thèse de la permanence des masses continentales et des fosses océaniques.

(1) Ed. SUESS, *La Face de la Terre*, Traduction française par Emm. de Margerie.

L'hypothèse de la Dérive comme celle de l'Expansion part de l'idée de l'existence à la fin du Paléozoïque d'une vaste entité continentale ou Pangée formée de la juxtaposition de toutes les masses continentales actuelles, bien plus vaste par conséquent que le seul continent de Gondwana. La dislocation de cet ensemble se serait opérée durant l'ère mésozoïque. Le problème consiste pour une large part à savoir dans quelle mesure est acceptable la conception de la Pangée. Il en a déjà été question à propos de la glaciation de Gondwana. Nous reprendrons l'examen de ce problème dans toute son ampleur sur la base des données de la paléogéographie.

De très sérieuses réserves ont été présentées par TEICHERT en ce qui concerne l'Australie (1). Ce savant écrit notamment :

“ During the last 20 years however, it has been shown that the principal original premise on which the Gondwanaland concept rested is no longer true. Western Australia is not covered by continental deposits carrying the *Glossopteris* flora. Instead there exist, along the western margin of Australia huge sedimentary basins with geosynclinal characteristics, filled with Paleozoic and Mesozoic, predominantly marine rocks from 15000 to 24000 feet thick. Any ideas of a former westward extension of the Australian Continent across the present Indian Ocean are thus disproved. If there was a restricted Gondwanaland further west, Australia never formed part of it. ”

Un examen quelque peu attentif des variations de facies du système de Gondwana en Inde conduit à des conclusions tout aussi remarquables. Si les dépôts glaciaires de TALCHIR sont relativement bien développés dans la partie centrale de la péninsule, ils s'atténuent progressivement vers ses rivages. Comme nous l'avons vu dans un chapitre précédent, en bordure de l'Himalaya, ils semblent bien consister en un étalement de cailloux transportés par la glace et dispersés sur un fond marin, le long d'un rivage ; celui-ci ne peut être que le rivage de la Téthys.

Les éléments de ces dépôts glaciaires de la bordure de l'Himalaya provenaient d'une chaîne de hauteurs située dans le centre de la péninsule. A cette époque, le massif ancien de l'Inde devait donc être émergé ; il appartenait à l'avant pays du vaste géosynclinal de la Téthys. S'il en est bien ainsi, il apparaît impossible de séparer la région himalayenne de l'Inde et déplacer celle-ci vers le sud sur une distance de 80 degrés de latitude, comme il est impensable, d'ailleurs, de dissocier l'Inde et la région d'Oman, où se trouvent les mêmes formations d'origine glaciaire de la base du système de Gondwana.

L'alignement des massifs continentaux situés aujourd'hui à la bordure méridionale de l'ancien domaine mésogéen semble bien devoir être considéré comme un trait permanent de la surface du Globe.

De même dans leur ensemble, les dépôts de Gondwana montent jusqu'au Crétacé ; ils passent du facies continental dans l'intérieur de la péninsule à une

(1) C. TEICHERT, *Australia and Gondwanaland*, Publ. XX^e session Congr. Géol. Intern. Mexico D. F. 1958, Commission para la correlacion del sistema Karroo (Gondwana) p. 115.

alternance de couches à faune marine et de couches à fossiles terrestres, au fur et à mesure que l'on s'avance davantage vers ses rivages ⁽¹⁾. Les cartes paléogéographiques annexées au travail de K. JACOB sont très parlantes, bien que certains tracés restent encore douteux ⁽²⁾.

Les données sur la géologie de l'Himalaya contenues dans le bel ouvrage de A. GANSSER ⁽³⁾ complètent très heureusement celles que nous avons données page 187. On est frappé de voir notamment la grande extension vers le nord des dépôts glaciaires du Permo-Carbonifère. On y verra sans doute la preuve d'une union intime entre l'Inde péninsulaire et le vaste bassin de sédimentation qui a fait place à la chaîne himalayenne proprement dite. Aussi, nous apparaît-il de moins en moins probable que l'on puisse dissocier ces deux régions et accepter qu'à un moment donné l'Inde péninsulaire se trouvait au Sud de son emplacement actuel à une distance de l'ordre de 80 degrés de latitude.

Pour compléter ces données, on peut faire état d'une publication récente du Service géologique de Madagascar, dont les auteurs sont M. BESAIRIE et son collaborateur M. COLLIGNON. Cette publication a pour titre : « La géologie de la province de Diego-Suarez ».

D'après cette note, les formations glaciaires du Permien (ou du Permo-Carbonifère) ne semblent pas exister dans cette partie septentrionale de l'île. D'autre part, compte tenu de leur facies, le Permien y est essentiellement d'origine marine, les facies continentaux ne jouant qu'un rôle très accessoire.

Dans le bassin d'Ankitokazo, les auteurs signalent la présence d'un polypier. Ils croient pouvoir en tirer la conclusion suivante : « La présence du polypier est intéressante car elle fixe le régime climatique en indiquant une mer chaude ». Plus loin, ils ajoutent : « La faune présente des affinités avec celle de Timor et de l'Himalaya ».

Tenant compte de ces données et de celles rappelées antérieurement, il est possible d'établir une esquisse de la répartition des zones de glaciation à l'époque de Gondwana tout autour de l'Océan Indien actuel. Comme nous l'avons vu antérieurement, à l'emplacement de chacun des massifs continentaux (Afrique, Inde, Australie), les dépôts tillitiques passent latéralement vers l'Océan à des formations marines alternant avec des dépôts glaciaires.

D'après les données que l'on possède actuellement ; on peut penser que les zones à formations glaciaires de l'époque de Gondwana étaient séparées par des mers largement ouvertes comme le montre le croquis annexé (fig. 35).

En confirmation de ce qui précède, nous signalerons encore le fait suivant : le Précambrien d'Éthiopie a été érodé au cours d'une longue période paléozoïque

⁽¹⁾ K. JACOB, *A brief summary of the stratigraphy and paleontology of the Gondwana system*, Congr. Géol. Intern. Alger, 1952. Symposium sur les Terres de Gondwana, page 153.

⁽²⁾ On trouvera des compléments d'information pour la côte orientale de l'Inde dans l'article : C. MAHADEVAN and A. SRIRAMADAS, *The Gondwanas of the East Coast of India*, Publ. Congr. Géol. Intern., session Mexico, 1956. Commission pour la corrélation du système du Karroo, p. 105.

⁽³⁾ Augusto GANSSER, *Geology of the Himalayas*. Interscience publishers a division of John Wiley and Sons Ltd. Londres, 1964.

et durant une partie du Mésozoïque. Il a été ensuite recouvert en discordance de stratification par du Jurassique, du Crétacé et du Quaternaire. La mer du Jurassique s'est avancée en transgression du Sud Est vers le Nord Ouest. Le maximum de la transgression jurassique s'est avancée jusqu'à l'Ouest du Nil Bleu.

Ces indications viennent confirmer l'existence de l'Océan Indien à son emplacement actuel, au moins depuis le Jurassique et probablement à une époque antérieure, en conformité avec l'âge des dépôts recouvrant le socle ancien à la bordure occidentale de l'Inde péninsulaire.

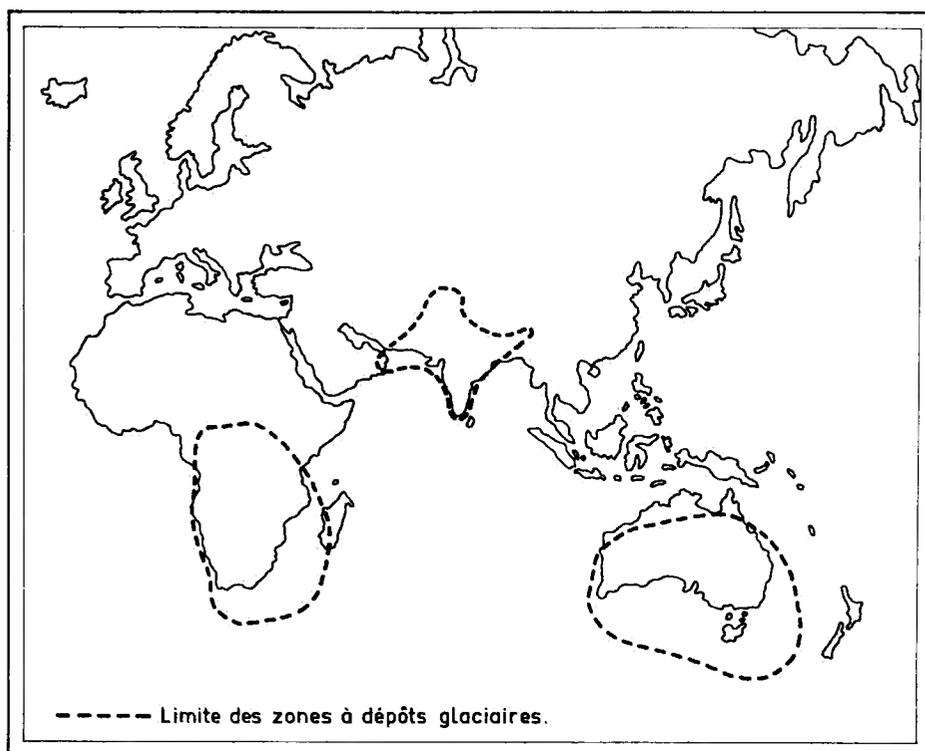


FIG. 35. — La répartition des zones glaciaires à l'époque de Gondwana en Afrique, Eurasie et Australie.

En faveur de la dérive, on a souvent invoqué le fait qu'à l'époque de Gondwana, les formations glaciaires se sont étendues jusque sous les régions équatoriales. Si l'on veut bien se reporter aux belles cartes d'ensemble dressées par notre confrère L. CAHEN, il existait, à l'époque quaternaire, une situation analogue en Amérique du Sud et en Afrique Centrale. C'est une question d'altitude. On imagine aisément qu'à l'époque de Gondwana, il pouvait exister en Inde Péninsulaire, des reliefs bien plus marqués qu'aujourd'hui et que les glaces se sont établies à une altitude plus élevée que celle où on en trouve les restes dans l'état actuel du globe. Mais il ne faut pas perdre de vue que, depuis cette époque, la chaîne himalayenne a surgi. Par contre-coup, suivant le principe d'isostasie, son avant pays, c'est-à-dire l'Inde, s'est abaissé.

La chose la plus étonnante pour l'époque de Gondwana n'est pas d'avoir connu des glaciers sous l'équateur, mais de n'avoir pas eu de glaciation dans l'hémisphère nord alors que l'hémisphère sud en était si largement pourvu.

Des observations rapportées ci-avant on est tenté de conclure à une disposition transgressive des formations qui se sont succédées dans l'Inde depuis la phase glaciaire de Gondwana jusqu'au Jurassique et au Crétacé pour le moins. Ceci implique forcément l'existence d'un océan tout autour du bloc à soubassement précambrien qui constitue actuellement l'essentiel de l'Inde péninsulaire. Dans ces conditions, il paraît difficile d'admettre que l'Inde et l'Australie furent accolées à l'époque de Gondwana pour faire partie de la Pangée.

En conformité avec ces données relatives à l'Inde, des renseignements très intéressants sont apportés par l'abbé A. F. DE LAPPARENT à la suite de ses explorations en Afghanistan ⁽¹⁾. Ce savant signale, en effet, la découverte, dans la vallée de Kahmard de couches à Orbitoïdes du Maestrichtien permettant d'établir la connexion avec les régions circumvoisines où un Maestrichtien semblable est connu : Iran méridional, Beloutchistan, Inde péninsulaire et Thibet. La transgression maestrichtienne déjà connue en Égypte et en Arabie se marque aussi en Afghanistan.

Il y a là des faits troublants si l'on veut bien les rapprocher de ce que nous avons dit antérieurement à propos de la présence de dépôts glaciaires à Oman, en Arabie (page 189).

Un autre renseignement précieux nous est fourni à cet égard par les recherches du professeur J. AVIAS ⁽²⁾ en Nouvelle Calédonie. A propos de la formation de Mara-Hugon il écrit :

« En conclusion, la revue qui précède montre que l'on a une frappante analogie de facies paléontologique et pétrographique ainsi qu'une frappante similitude de position stratigraphique entre la formation de Mara-Hugon et les formations dévono-permiennes de l'Inde, de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande. La formation des « tufs polychromes » de Mara-Hugon dans son ensemble paraît être en particulier l'équivalent des séries de Maïtaïa et de Te Anau de Nouvelle-Zélande ».

On se rend compte ainsi de la continuité paléontologique de toutes ces régions à l'époque permienne. Il paraît difficile dans ces conditions d'écarter délibérément ses divers éléments pour constituer une Terre indépendante du continent eurasiatique, d'autant plus que tout le long de la Téthys, de l'Europe à l'Australie, l'étude des faunes indique une similitude remarquable.

L'identité des faunes du Silurien entre l'Australie et les îles voisines d'une part, et le domaine de la Méditerranée d'autre part, a attiré depuis longtemps

⁽¹⁾ A.F. DE LAPPARENT, *La série stratigraphique de la vallée de Kahmard (Hindoukouch-Afghanistan)*.

Pour l'extrême nord de l'Afghanistan, on consultera : A. DESIO, E. MARTINA et G. PASQUARE, *On the geology of central Padakhsan (North-east Afghanistan)*, Quart. Journ. geol. Soc. of London, n° 478, vol. 120, part. 2, avril 1964.

⁽²⁾ J. AVIAS, *Contribution à l'Étude Stratigraphique et Paléontologique des formations antécrotacées de la Nouvelle-Calédonie Centrale*, Sciences de la Terre, tome I, n° 1-2, Nancy, 1953.

l'attention des géologues. En outre au Dévonien l'Australie centrale semble avoir été continentale. Le Dr. EDMUND D. GILL, du National Museum of Victoria a soumis au symposium de Tasmanie en 1958, un article intitulé : « Australian lower devonian palaeobiology in relation to the concept of continental Drift.

Nous en avons tiré les indications suivantes :

a) " The Australian faunas are closely related to those of New Zealand and South-east Asia ".

b) " Abundant evidence is available in both Mesozoic and certain Paleozoic rocks of the presence of a marine migration route connecting the European and Australasian areas, across the Asian continent. This has been named the Tethys seaway ".

c) MANSUY a décrit une faune d'Indochine ayant de grandes affinités avec le Dévonien inférieur d'Australie.

d) " The Australian Lower Devonian fauna has a marked endemic element, a strong European element and a small North American element...

There is thus strong evidence of a seaway that connected the Australasian area with the European area in Lower Devonian time ".

L'auteur conclut en disant que dans l'état actuel des connaissances paléobiologiques, il n'est pas possible de décider s'il y a eu dérive ou non. A notre avis ses indications sur la relation entre les faunes du Dévonien inférieur depuis l'Europe jusqu'en Nouvelle Zélande plaident plutôt en faveur de la thèse fixiste.

Dans la même publication, J.M. DICKINS et G.A. THOMAS par leur étude de la faune en relation avec les tillites dans l'Australie occidentale semblent plaider en faveur de la dérive. Les arguments de TEICHERT rappelés ci-avant nous paraissent de valeur supérieure.

Il faut encore signaler que le Permien à facies de calcaire marin à Fusulines semble continu entre la Tunisie, la Sicile, la Grèce, la Turquie, l'U.R.S.S. (Doubass, Bachkirie), l'Afghanistan, le Viet-Nam et Timor ⁽¹⁾.

Dans le même domaine, le professeur AVIAS attire l'attention sur la similitude des faunes à l'époque hettangienne entre la Nouvelle Calédonie et les territoires correspondant à la Mésogée, jusque la région des Alpes. Il y a là une donnée d'importance pour le sujet qui nous occupe.

Les études récentes sur les régions himalayennes apportent des résultats qui tendent à confirmer les conclusions précédentes ⁽²⁾.

Aussi paraît-il difficile de se rallier à l'opinion exprimée par DEUTSCH après discussion des résultats obtenus sur le paléomagnétisme des roches de l'Inde.

(1) On consultera notamment à ce sujet deux ouvrages récents : A.F. DE LAPPARENT, J. DE LAVIGNE, J. BLAISE et M. LYS, *Sur les gisements à Fusulines de l'Afghanistan Central*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLX, n° 19, 10 mai 1965, p. 5073.

A.F. DE LAPPARENT et M. LYS, *Le Permien à Fusulines de l'Afghanistan*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLX, n° 20, 17 mai 1965, p. 5313.

(2) Voir à ce sujet : P. BORDET, D. KRUMMENACHER, R. MOUTERDE et M. REMY, *La stratigraphie de la série secondaire de la Thakhhola (Népal Central)*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLIX, n° 7, 17 avril 1964.

Il écrit (1) : " It can be assumed that Central India was at least 60° south of the Upper Carboniferous equator and as it is 20° north of the present equator a value of 80° has been chosen for the total northward movement since the Upper Carboniferous.

" The results thus indicate that India on the average has moved northward through 0.4 to 0.9 degrees of latitude per million years since the Jurassic period "

On pourrait certes faire valoir à l'appui du glissement de l'Inde vers le nord, les constatations faites en Afrique par le professeur L.C. KING : Dans la région de Durban les formations glaciaires de la série de Dwijska permettent de dire que le glacier venait de la direction de l'Océan Indien ; la forme des traces qu'il a laissées sur le bed-rock le prouvent de façon indiscutable. On a trouvé là, évidemment, un argument en faveur d'une disjonction d'avec un autre massif continental, c'est-à-dire de la dérive, et cela d'autant plus que la côte correspond à une faille rectiligne (2). Si on l'accepte, on se rallie assez facilement à un déplacement de l'Inde vers le Nord, en accord avec la dérive de l'Afrique. On s'étonnera d'autre part de ce que l'Afrique aurait cheminé vers le nord de 30° de latitude seulement par rapport au continent antarctique alors que l'Inde se serait déplacée dans le même sens de 80 degrés de latitude. Et cependant dans les reconstitutions proposées pour le groupement des continents à la fin du Paléozoïque, l'Inde et l'Afrique étaient jointives.

A l'époque du Permo-Carbonifère, l'Amérique du Sud semble s'être trouvée dans des conditions analogues à celles rappelées ci-avant pour l'Inde péninsulaire.

En 1940 RUDERMANN signalait la présence de fossiles marins dans les couches du Permien de l'État de Parana et de Sao Paulo, alors que toute faune marine semble inexistante dans l'intérieur du Brésil (3). Cette seule observation permet de supposer qu'à cette époque l'Océan s'étendait à l'est de l'Amérique du Sud, de même que, suivant les vues de TEICHERT, il baignait l'Australie du côté de l'Ouest.

Nous trouvons confirmation de cette opinion en consultant l'ouvrage publié sur la géologie de l'Amérique du Sud par la Geological Society of America (mémoire 65). Nous croyons pouvoir en déduire qu'au Permo-Carbonifère une aire continentale s'étendait approximativement du Paraguay à l'Uruguay ; par contre, dans toutes les directions, on voit apparaître d'abord des formations marines alternant avec des formations continentales ; plus près de l'Océan, la faune marine devient prédominante. La situation est ainsi tout à fait comparable à celle décrite ci-avant pour l'Inde et l'Australie.

(1) E.R. DEUTSCH, *Recent palaeomagnetic evidence for the northward movement of India*, Journ. Alberta Soc. Petroleum Geologists, vol. 5, n° 6 (June 1958), pp. 155-162, et *Symposium of Polar Wandering and Continental Drift*, Alberto Soc. of Petroleum Geologists Reprinted 1960.

(2) Voir à ce sujet : P. BELLAIR, *Réflexions sur le glaciaire de Dwijska (Afrique du Sud)*, C. R. Séances Acad. Sciences Paris, t. CCLVII, n° 23, 4 décembre 1963.

(3) R. RUDERMANN, *Fossils from the permian tillite of Sao Paulo, Brazil and their bearing on the origin of tillite*, Bull. Geol. Soc. of America, vol. 40, n° 2, juin 1940.

En 1958, J. PIMIENTA ⁽¹⁾ a fait connaître l'existence des facies de Gondwana dans la dépression de l'Amazone au nord du bouclier brésilien, alors qu'antérieurement les dépôts de cette nature n'étaient connus qu'au Sud de ce massif. D'après cet auteur, les dépôts d'âge permien de l'Amazone ne renferment pas de charbon exploitable, mais des couches bitumineuses et des bois silicifiés ; au cœur de la dépression de l'Amazone, le Permien renferme des dépôts salins, marquant ainsi le passage du facies gondwanien au facies germanique.

Il est bon de souligner ici que la situation était sensiblement la même au Dévonien supérieur ; au Pérou et peut-être en Écuador, il existe une lacune correspondant au Dévonien supérieur ; il en est de même en Bolivie, Uruguay, Paraguay, République Argentine et dans l'état de Parana au Brésil.

Ces quelques données suffisent à souligner la tendance à l'état continental de la partie centrale de l'Amérique du Sud (bouclier brésilien) dès le Dévonien supérieur.

Le continent africain souligne lui aussi par certains de ses caractères la tendance à la permanence des formes des masses continentales, voire leur isolement comme l'a montré TEICHERT pour l'Australie à l'époque de Gondwana.

Le Karroo africain pris dans son ensemble est une grande série compréhensive allant du Carbonifère supérieur au Jurassique. Sur la majeure partie du Continent son facies est continental ; toutefois au Tanganyika (Kidodi) apparaissent de minces intercalations marines malgré la grande ressemblance des séries du point de vue lithologique. Les intercalations marines se développent davantage à Madagascar. En effet, d'après BESAIRIE ⁽²⁾, le Karroo de cette grande île est formé de niveaux alternants à facies marin et à facies continental. Comme TEICHERT l'a fait remarquer pour l'Australie, il faut en conclure qu'un océan s'étendait à l'est de l'Afrique et de Madagascar ; selon toute vraisemblance, il se confondait avec l'Océan supposé exister à l'ouest de l'Australie d'après les vues de TEICHERT rappelées ci-avant ⁽³⁾. Un tel océan séparait probablement aussi l'Afrique de l'Inde péninsulaire comme l'indique la distribution des facies des dépôts de Gondwana dans ce dernier territoire.

Il n'est pas sans intérêt de rappeler l'opinion de F. DIXEY sur les relations entre Madagascar et le Continent africain. L'auteur apporte des arguments permettant de réfuter l'opinion que Madagascar joignait autrefois la côte de l'Afrique. D'après lui, un géosynclinal s'étendait entre les deux territoires ; si l'on constate des analogies remarquables entre les facies des dépôts du Karroo de part et d'autre du canal de Mozambique, il faut noter par contre que l'Afrique et Madagascar étaient suffisamment éloignés l'un de l'autre pour que le volcanisme

⁽¹⁾ J. PIMIENTA, *Sur l'extension vers l'équateur des facies du Gondwana brésilien*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCXLVI, n° 10, 10 mars 1958, p. 1575.

⁽²⁾ H. BESAIRIE, *Quelques résultats nouveaux dans l'étude du Karroo malgache*, Congrès géol. intern. XX^e Sess. Mexico D.F. 1956. Commission pour la corrélation du système du Karroo, p. 95.

⁽³⁾ Voir aussi : P. FOURMARIER, *Principes de Géologie*, 3^e édition, tome II, Liège-Paris, 1950.

y fut différent. DIXEY admet aussi qu'à certains moments, il a pu exister une ride exondée entre le Cap St André et le Continent ⁽¹⁾.

C'est aussi sur la base du tracé des zones isopiques que nous avons cru pouvoir rejeter l'hypothèse de l'accolement de Madagascar à l'Afrique à l'époque de Gondwana ⁽²⁾. Dans la communication personnelle signalée antérieurement, M. BESAIRIE écrit :

« Les arguments que vous avez présentés autrefois contre la dérive avec les zones isopiques du Karroo doivent être reconsidérés. En accolant Madagascar sur le Tanganyika-Kenya les analogies du Karroo deviennent très précises, en particulier pour le Karroo/Permien. Elles ont été récemment mises en évidence par Mc KINLAY (1958) ⁽³⁾. Les couches de la Sakoa ont une ressemblance remarquable avec les couches K 1, K 2 et K 3 de la série de Songea et les schistes de K 1 sont analogues à nos schistes noirs périglaciaires accompagnant notre tillite. Sans doute cette dernière ne s'est-elle pas étendue au Tanganyika mais, à Madagascar, le phénomène glaciaire est somme toute assez réduit ».

Les remarques de M. BESAIRIE sont tout à fait pertinentes puisque depuis l'époque où fut publiée la note rappelée ci-avant ⁽⁴⁾, plusieurs intercalations marines ont été trouvées dans le Karroo du Tanganyika (Kidodi), dans les couches de la Sakamane inférieure. L'analogie avec Madagascar est ainsi précisée ; il semble toutefois que les niveaux marins sont mieux développés dans cette île que sur le continent. Les conséquences à tirer des variations de facies restent valables mais leur valeur en est quelque peu amoindrie.

Dans le sud-ouest africain, des horizons à faune marine sont intercalés dans la série de Dwycka de la base du Karroo. Nous avons rappelé, à la suite de BELLAIR, qu'il en est ainsi dans le Dwycka de la région de Durban. N'est-on pas en droit de conclure de tout cet ensemble de faits qu'à l'époque de Gondwana la mer s'étendait à l'est, au sud-est, au sud-ouest de l'Afrique australe et qu'elle était, par ce fait, en liaison vers l'ouest avec celle dont l'existence est probable à l'est de l'Amérique méridionale à la même époque ?

Ces données sur la paléogéographie des trois grands continents de l'hémisphère sud (Amérique du Sud, Afrique, Australie) ne sont peut-être pas en accord avec la conception toute théorique de la Pangeae ; elles s'harmonisent davantage avec la thèse de la permanence des continents et des océans.

On peut, certes, prétendre que de tels arguments ne sont pas absolument démonstratifs. AL. DU TOIT écrit notamment à ce sujet ⁽⁵⁾ :

⁽¹⁾ F. DIXEY, *The geology and geomorphology of Madagascar and a comparison with Eastern Africa*. Quart. Journ. Geol. Soc. of London, vol. CXVI, 1960, n° 403, p. 255.

⁽²⁾ P. FOURMARIER, *Quelques conséquences des dernières recherches sur la géologie de Madagascar*, Ann. Soc. Géol. Belgique, t. LX, Liège, 1937.

⁽³⁾ A.C.Mc KINLAY, *Records of the Geological Survey of Tanganyika*, vol. VIII, 1958.

⁽⁴⁾ Sur la carte géologique internationale de l'Afrique, le Karroo est figuré comme ayant essentiellement le facies continental sur le continent lui-même tandis qu'à Madagascar il est représenté avec le facies marin alternant avec le facies continental.

⁽⁵⁾ AL. DU TOIT, *Our wandering Continents*, p. 58.

“ For example, no marine strata of age between Devonian and Lower Triassic have yet been found on either side of the mid sections of Africa and Peninsular India or on the southern side of Australia.

” Such strongly supports the hypothesis of the former closer union of those masses into the single continent ”.

Un pareil raisonnement est sujet à caution car, comme le reconnaît DU TOIT lui-même, ces masses continentales ont été affectées de mouvements épéirogéniques qui peuvent, par une sorte de mouvement de bascule, avoir facilité la transgression de la mer de façon inégale sur le pourtour des masses émergées.

Al. DU TOIT s'est efforcé encore d'établir qu'il existait, à l'époque du Karroo-Gondwana, un vaste géosynclinal (Samfrau) s'étendant des îles Falkland à l'Australie en passant par l'extrême sud de l'Afrique, intéressant aussi le rivage de l'Antarctique ⁽¹⁾. Ce savant a apporté, sans aucun doute des données importantes en faveur de cette thèse. Il est évident qu'il semble y avoir des relations étroites du point de vue stratigraphique entre les parties du monde que l'auteur raccorde ainsi. Est-ce suffisant cependant pour aller jusqu'à déplacer ces régions sur une grande distance alors que d'autres faits semblent s'y opposer ?

A cet effet, reportons-nous aux régions où s'étendait autrefois la Mésogée ou Téthys entre l'Atlantique et l'Océanie.

D'après la nature des sédiments déposés dans ce vaste domaine depuis le Précambrien jusqu'au Cénozoïque, on peut admettre que cette mer était de type épicontinental, sorte de large dépression comprise entre les massifs continentaux du nord et ceux de l'hémisphère austral. Il ne paraît pas possible de la confondre avec l'Océan Indien tel qu'il existe actuellement au sud de l'Arabie, de l'Inde et de l'Australie.

Les données de la géologie sont en faveur de cette manière de voir. Les faits d'observation rapportés ci-avant sur les Terres de Gondwana, notamment en ce qui concerne le passage latéral des formations continentales à des sédiments marins dans la direction du nord, tant en Australie qu'en Inde péninsulaire et en bordure de l'Himalaya sont conformes à cette interprétation.

D'autre part, les données de la paléoclimatologie et celles relatives aux glaciations anciennes confirment ces indications. En Inde péninsulaire, les dépôts glaciaires de Gondwana, compte tenu de leur passage à des sédiments complexes, renfermant des couches à faune marine, sont descendus de zones de relief situées vers la partie centrale de la péninsule. C'est de là que proviennent les cailloux étalés par la mer en bordure de la zone himalayenne (voir page 213). Un tel argument suffit pour établir la permanence de l'emplacement du massif ancien de l'Inde vis-à-vis de la Mésogée d'où est sortie la chaîne de l'Himalaya.

Cette conclusion reste entièrement valable même si l'on accepte l'existence d'un grand accident géologique, une grande faille de charriage par exemple,

⁽¹⁾ Al. DU TOIT, *Our wandering Continents*, fig. 10.

mettant en contact la bordure de l'Himalaya plissé avec son avant-pays, ainsi que la figure P. BORDET ⁽¹⁾.

Ces remarques sur la distribution des dépôts glaciaires en Inde Péninsulaire, de leur continuité avec ceux du Golfe d'Oman, la parenté des structures géologiques sur les deux rives de la Mer Rouge, de même que la continuité des chaînes himalayennes vers l'Ouest, s'accolant au massif ancien de l'Inde, à celui de l'Arabie, et, de là, bordant le grand bouclier africain nous a conduit à admettre qu'il existait autrefois non pas une suite de môles pratiquement indépendants les uns des autres : Inde, Arabie, Afrique, mais un massif unique allant de l'Afrique à l'Inde péninsulaire. A ce massif, il convient de rattacher la grande île de Madagascar en tenant compte de l'étroite crête de nature continentale qui en forme le prolongement sous-marin vers le sud. Dans la direction du nord, parallèlement à la côte africaine, les îles Seychelles sont la continuation du socle ancien de Madagascar ; en outre le plateau sous-marin de Mascarène prolonge la crête des Seychelles jusqu'à l'endroit où passe la dépression qui la sépare de l'Inde péninsulaire, dépression dont l'axe est souligné par le passage de la branche nord de la crête sous-marine de l'Océan Indien, laquelle est peut-être en relation avec le fond basaltique reconnu dans la Mer Rouge. De l'autre côté de la crête médiane de l'Océan Indien s'étend alors l'Inde péninsulaire avec ses vieux terrains, disposée symétriquement par rapport aux Seychelles, Mascarène et Madagascar.

Le croquis de la figure 36 représente la disposition des masses telle que nous la concevons.

Les faits sur lesquels est basée cette reconstitution plaident en faveur de la thèse de la permanence ; on peut y voir un argument contre la théorie de la dérive. Rappelons, en effet que, suivant les tracés de plusieurs auteurs, la reconstitution d'une Pangée, qui en est le prélude, conduit à séparer délibérément ces diverses parties des continents actuels ou du moins deux d'entre elles : l'Inde et l'Arabie, d'une distance incompatible avec les phénomènes géologiques normaux.

Dans les pages qui précèdent, nous nous sommes attachés avant tout à esquisser les conditions paléogéographiques à l'époque de Gondwana. La raison en est que l'existence d'un continent unique dans l'hémisphère austral à cette époque est l'une des bases de la théorie de la Dérive wegenérienne.

Il convient cependant de remonter plus loin dans le Passé, avant que se soient formés les dépôts si caractéristiques de Gondwana, avec les manifestations d'origine glaciaire, les couches de charbon, la flore si particulière à *Glossopteris*. Nous nous efforcerons de trouver quelques données intéressantes sur la paléogéographie des époques antérieures, c'est-à-dire au Paléozoïque, afin de pouvoir dire si elle a eu quelque influence sur la répartition des Terres de Gondwana.

Ainsi que nous l'avons signalé ci-avant, en Amérique du Sud, nous avons à ce point de vue quelques renseignements intéressants concernant le Dévonien et

⁽¹⁾ P. BORDET, *Recherches géologiques dans l'Himalaya du Népal. Région du Makalu*, Centre nat. de la Recherche Scient., 1961, voir fig. 6.

le Carbonifère. En Amazonie et dans le bassin de Parnaíba, le Dévonien se trouve au complet et surmonté par le Carbonifère. Le facies est essentiellement marin, mais avec des intercalations de formations continentales.

Vers le Sud, c'est-à-dire dans la région de Parana et de Sao Paulo au Brésil, en Argentine, au Pérou, en Uruguay, Paraguay, Falklands, le Dévonien inférieur existe seul et supporte le Permo-Carbonifère dont nous avons parlé précédemment.

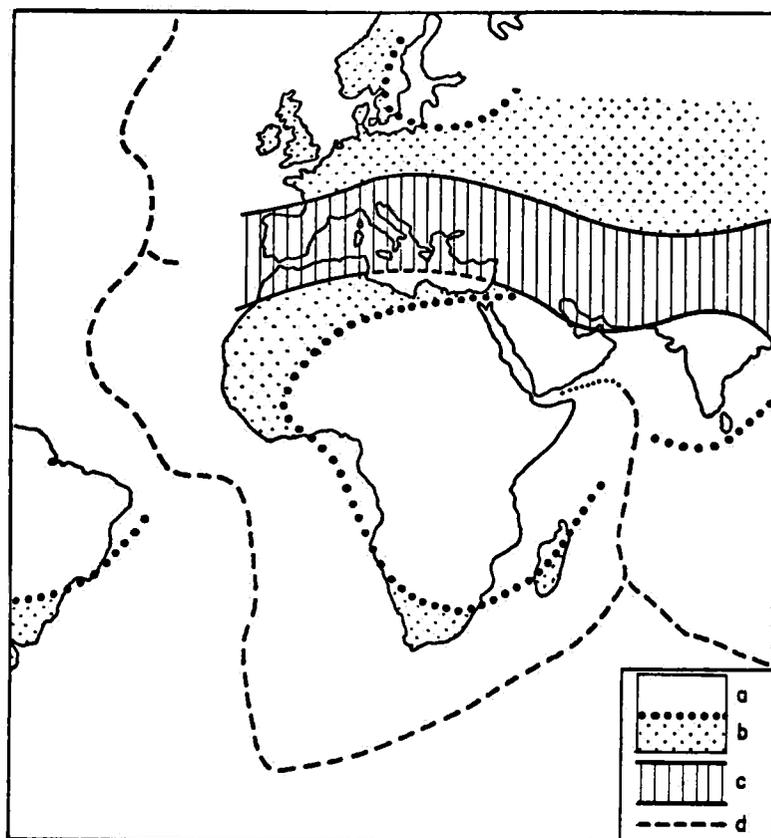


FIG 36. — Le bouclier afro-arabo-indien.

a : massifs précambriens ; b : plis calédoniens et hényniens ; c : plis alpins ; d : crête médiane des océans.

Il semble ainsi établi que la sédimentation était plus continue au voisinage de la Téthys et en relation avec elle, tandis que la tendance continentale se manifestait dans la partie principale du bouclier brésilien dès la fin du Dévonien inférieur. C'est en relation assez étroite avec ce que nous avons pu déduire de la répartition des facies à l'époque de Gondwana.

Ajoutons encore que la faune marine du Dévonien inférieur présente des caractères particuliers qui permettent de la séparer des faunes de l'hémisphère nord. Il faut y voir une influence du climat, selon toute probabilité puisque des dépôts glaciaires sont intercalés dans la série dévonienne de la partie méridionale du continent.

En Afrique, sans entrer dans le détail et en s'en tenant uniquement aux grandes lignes structurales, on peut dire que les dépôts du Karroo, équivalents des séries de Gondwana, reposent sur le Précambrien dans toute la partie centrale du continent ; ce n'est qu'en bordure de celui-ci, dans le sud-ouest africain, dans le territoire du Cap et à Madagascar qu'ils sont transgressifs sur des terrains paléozoïques, généralement à facies marin, comme dans les territoires au nord du Sahara. On en tire la conclusion que les conditions paléogéographiques exposées ci-avant pour la série de Gondwana étaient déjà ébauchées aux époques antérieures.

Les données acquises sur la géologie de l'Amérique du Sud et de l'Afrique peuvent nous conduire à la solution d'une question cruciale : l'Atlantique sud n'est-il apparu à la surface du globe que par la dislocation du continent de Gondwana ?

Ce que nous venons de rappeler à propos des formations antérieures au Carbonifère nous porte déjà à croire qu'il a existé une dépression océanique en cet endroit du Globe avant la période de Gondwana-Karroo. Le croquis tectonique dressé par R. DEARNLEY ⁽¹⁾ pour la période allant de la fin du Précambrien à la fin du Phanérozoïque est très parlante. On y voit sur un large espace en Amérique du Sud, des plis antérieurs au Karroo se mouvant sur le bouclier brésilien et, de l'autre côté de l'Atlantique, des plis de même âge épousant la forme du bouclier africain. Nous savons que la majeure partie de ces sédiments sont d'origine marine. Même si l'on rapproche l'Amérique du Sud de l'Afrique pour les rendre presque jointifs comme le fait DEARNLEY, il faut accepter qu'il existait, du Précambrien Supérieur au Carbonifère, un océan séparant ces deux continents. Tout le problème revient alors à savoir s'il s'agissait d'une mer épicontinentale, du type de la Téthys par exemple, ou bien si entre les deux plates-formes continentales sur lesquelles se sont sédimentés les terrains du Paléozoïque ancien, il existait une fosse profonde, à fond de basalte, comme il en existe une aujourd'hui.

La question est délicate. Toutefois on doit se dire que les formations géologiques se sont édifiées dans des conditions comparables, sur les deux rives opposées, au Paléozoïque, au Karroo-Gondwana et aux époques plus récentes ; les variations de facies se faisaient dans le même sens par rapport au massif ancien. N'est-il pas rationnel, dans ces conditions d'admettre que les conditions générales sont restées à peu près identiques et que l'Océan Atlantique avec sa zone axiale basaltique est un trait permanent de la surface du Globe ? Cette conclusion paraît rationnelle si l'on se rallie à la thèse de la grande ancienneté du réseau des rides médianes océaniques.

En Asie, nous trouvons aussi des renseignements intéressants à propos de la paléogéographie. A l'époque du Cambrien, il s'est déposé des sédiments rouges à la bordure méridionale de l'Himalaya, tandis que dans la partie centrale de la chaîne et en Birmanie il se formait des sédiments à faune marine ; il en fut de même à l'époque de l'Ordovicien et du Silurien. De même en Iran au voisinage

(1) R. DEARNLEY, *Orogenic fold-belts and continental Drift*, Nature, vol. 206, n° 4991, 26 juin 1965.

du Golfe Persique le Cambrien renferme des roches rouges, tandis que, plus au nord, notamment dans la dépression centrale de l'Iran, il est constitué uniquement de dépôts marins ⁽¹⁾

On peut en conclure qu'au Cambrien, à l'Ordovicien et au Silurien la mer s'étendait vers le nord en Eurasie tandis que vers le sud devait se trouver un continent ; ce ne peut être que l'amorce de l'Inde péninsulaire.

Il en était probablement de même à l'époque dévonienne dans le Sud de l'Asie. En effet, ce terrain est marin dans l'Himalaya, mais il ne semble pas avoir existé en Inde.

L'Océanie confirme, du moins en partie, ce que nous venons de dire : le Silurien-Ordovicien s'y présente sous le facies marin ; toutefois, dans l'Ouest du Continent australien on a rapporté au Silurien, sans preuve absolue cependant, des conglomérats et des schistes rouges. On peut y voir un indice de la présence d'un continent dans la direction du sud-ouest, à l'époque silurienne.

Dans les îles de la Sonde, partout où il a été reconnu, le Dévonien a le facies marin, continuation de la sédimentation du Silurien. Sur le continent australien, le Dévonien marin a été reconnu dans les États de Victoria, de Nouvelle Galles du Sud, et du Queensland ; toutefois le Dévonien supérieur contient des restes de plantes terrestres. Dans l'ouest de l'Australie le Dévonien supérieur à *Rhynchonella cuboides* semble seul exister. Le long de la côte occidentale, TEICHERT signale la présence d'une forte épaisseur de Paléozoïque à facies marin prédominant sur lequel repose une importante masse de Mésozoïque où domine également le facies marin. Par contre dans le centre de l'Australie, il n'a pas été signalé jusqu'à présent, semble-t-il.

Cette répartition des facies des terrains antérieurs à la série de Gondwana confirme la tendance à la permanence de conditions continentales dans la partie centrale du continent, comme nous l'avons indiquée pour le Permo-Carbonifère.

On se trouve ici, comme en Afrique, en présence d'un bel exemple de la tendance à la permanence dans l'évolution de la croûte terrestre. Par contre, comme nous l'avons rappelé ci-avant, vers la bordure du continent, la sédimentation marine semble avoir été de règle durant une grande partie des temps géologiques. Ceci vient à l'appui de ce que nous avons noté précédemment pour la continuité des facies paléontologiques du Dévonien entre l'Europe et la Nouvelle-Zélande, c'est-à-dire à l'endroit de la Téthys.

Cette observation est confirmée par la répartition des facies du Carbonifère. Aussi une telle concordance porte à croire que, dès le Paléozoïque, la Téthys était bordée du côté sud par des masses en partie continentales, transformées par moments en reliefs sous-marins. C'était l'Afrique avec l'Arabie, l'Inde péninsulaire et l'Australie.

Les considérations qui précèdent sont utilement complétées par un extrait d'un article publié par le professeur A. HOLMES ⁽²⁾. Nous y notons qu'au

⁽¹⁾ P. FOURMARIER, *Principes de Géologie*, 3^e édition, 1950, t. II, p. 913, Paris et Liège.

⁽²⁾ A. HOLMES, *A revised Geological Time-Scale*, Trans. Edinburgh geol. Society, vol. 17, part. 3, décembre 1959.

Précambrien supérieur la partie de l'Afrique au sud de l'équateur était entourée par un géosynclinal majeur qui fut renouvelé et agrandi pendant le Cambrien. Étendant ces données à une région plus vaste, HOLMES écrit :

“ Cambrien Seaways appear to have been present along many of the coastal regions now bordering the Indian and South Atlantic Oceans ” et il ajoute :

“ I should like to indicate the probability that late Precambrian paleogeography must have been very different from anything resembling WEGENER'S Pangaea ”.

Cette observation du savant britannique porte à réfléchir : Il est permis de se demander, en effet, s'il est bien indiqué de reconstituer une Pangaea pour expliquer certaines particularités de la géologie du Permo-Carbonifère alors qu'à une époque plus ancienne, comme aux temps présents, les continents pouvaient être séparés les uns des autres par de larges étendues marines.

Les données fournies par l'étude des terrains de Gondwana conduisent à supposer aussi que les continents avaient déjà leur aire centrale à son emplacement actuel. On doit forcément en déduire que l'Océan Indien existait aussi entre l'Afrique, l'Arabie, l'Inde et l'Australie.

Reste la question de l'Antarctide ; nous aurons à y revenir à propos de la géologie structurale.

Si l'on doit accepter l'ancienneté de l'Océan Indien est-il raisonnable de défendre la thèse de l'accolement de l'Amérique du Sud et de l'Afrique sur la base bien peu solide d'une concordance, remarquable il est vrai, dans la forme des côtes ; nous avons rappelé ce que JEFFREYS pense de cette similitude (page 115). Nous avons établi, d'ailleurs, qu'il y a des arguments tout aussi sérieux pour mettre en doute la jonction de l'Amérique du Sud et de l'Afrique à l'époque de Gondwana, hypothèse basée, répétons-le, sur une simple analogie dans la forme des côtes ou de la limite de la plate-forme continentale.

Les partisans du mobilisme intégral présenteront sans aucun doute une objection à la thèse de la permanence telle qu'elle paraît résulter de l'exposé qui précède sur la constitution des massifs continentaux de l'hémisphère sud. Ils ne manqueront pas de dire que le passage de sédiments continentaux à des sédiments marins vers le rivage des continents actuels s'explique tout aussi bien par la présence d'étroits chenaux en rapport avec la mer que par l'existence d'océans largement ouverts.

On peut répondre à ce sujet que, dans certaines reconstitutions d'une Pangée, on sépare très largement des dépôts identiques, comme les dépôts de Gondwana de l'Inde, des dépôts similaires d'Oman, qui leur sont cependant étroitement apparentés. C'est là un argument en faveur de la permanence, de même que les relations entre l'Australie et l'Inde par les îles de la Sonde.

Nous voudrions rappeler ici les arguments de caractère paléogéographique invoqués par REINHARD MAACK lors du Congrès géologique international (XXI^e session) à Copenhague en 1960, à propos du Continent de Gondwana. Nous en donnons ici une analyse sommaire :

Le continent de Gondwana devait s'étendre sur une distance de 25.000 kilomètres si l'on admet que la situation actuelle résulte de l'affaissement de ponts continentaux aux endroits occupés par les larges étendues marines de l'Atlantique sud et de l'Océan Indien. De ce fait et compte tenu des glaciations, on se voit obligé de penser à une variation dans l'axe de rotation de la Terre.

En se basant sur les connaissances acquises au sujet des glaciations sur le continent de Gondwana, l'auteur admet que le centre principal de glaciation à la fin du Carbonifère se trouvait au Transvaal d'où il a rayonné dans toutes les directions, s'épendant jusque sur le substratum cristallin dans l'État de Sao Paulo au Sud du Brésil : dans les tillites de cette région on a trouvé des débris de quartzites entièrement cristallins de teinte violet foncé, rouge et gris bleu, qui semblent devoir provenir du Précambrien ou de formations du début du Paléozoïque du Transvaal.

Ce serait évidemment là un argument de poids en faveur de l'accolement de l'Amérique du Sud à l'Afrique avant le début du Mésozoïque ; cependant il faut être très circonspect dans l'emploi de semblables caractères. Il nous paraît devoir en être de même pour l'utilisation des dépôts désertiques dont l'auteur essaie de tirer parti.

A la suite de l'exposé du professeur R. MAACK, divers orateurs donnèrent leur avis. C'est ainsi que le professeur Th. ROWEN fit observer que la mince couverture de sédiments sur le fond des océans, telle qu'elle est décelée par les recherches séismologiques, et dont l'âge ne semble pas dépasser 160 millions d'années est en faveur de la dérive. Toutefois, il paraît difficile de se rallier à cette conclusion si l'on pense qu'il en est de même pour le Pacifique dont la grande ancienneté ne paraît pas douteuse.

Dans l'hypothèse de la dérive, toutes les reconstitutions d'une Pangée originelle conduisent à admettre l'existence d'un vaste océan à l'emplacement du Pacifique.

On s'étonne alors de ce que l'exploration des fonds océaniques n'a révélé nulle part, la présence de dépôts non tectonisés, antérieurs au Crétacé. Dans la thèse mobiliste, il est facile de comprendre qu'il en soit ainsi dans l'Atlantique et dans l'Océan Indien, où des sondages ont confirmé la chose. A l'emplacement du Pacifique, il semblerait que la situation dût être tout autre. Dans la première partie du rapport nous avons rapporté l'opinion de HOLMES à ce sujet.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il y a là un problème troublant ; il faut reconnaître que nous manquons de données suffisantes pour arriver à le résoudre. Peut-être des explorations plus poussées dans les grands fonds du Pacifique apporteront-elles des renseignements plus précis pour que l'on puisse reprendre avec succès l'examen de cette question.

CHAPITRE VII

LES ENSEIGNEMENTS DE LA GÉOLOGIE STRUCTURALE

A l'heure actuelle, les données acquises sur la géologie structurale des masses continentales, comme aussi, mais de façon beaucoup plus sommaire, des fonds océaniques, sont susceptibles de jeter quelque lumière sur le problème de la dérive des continents.

Dans un chapitre antérieur il a été question des données de la paléogéographie s'appuyant sur la stratigraphie et les variations de facies ; c'est maintenant aux déformations de la croûte terrestre : larges ondulations, plissements, charriages, fractures, qu'il convient d'avoir recours. Il ne serait guère possible de donner ici un exposé complet de la question. Nous sommes forcés de nous en tenir aux faits les plus marquants.

Les grandes dislocations de l'écorce terrestre capables d'avoir facilité ou engendré le déplacement relatif de ses fragments sont : *a*) les *orogènes* ou zones plissées, propres au domaine continental. Il convient d'y annexer les mouvements épéirogéniques, larges ondulations de la croûte terrestre, qui manifestent leurs effets sur toute la surface du Globe ; *b*) les grandes failles radiales du type des *décrochements horizontaux* (Strike slip faults) qui intéressent toute la surface de la Terre, aussi bien le fond des océans que les continents ; *c*) les déformations des grands fonds océaniques connues sous le nom de *crêtes médianes des océans*.

Nous envisagerons successivement ces trois catégories de dislocations.

A. LES OROGÈNES.

Il est peut-être utile de rappeler ici qu'il ne faut pas confondre les orogènes ou zones plissées avec les rides médianes océaniques comme on l'a fait parfois. Il paraît bien établi aujourd'hui qu'il s'agit de déformations de nature différente : les orogènes font partie presque exclusivement du domaine continental. Comme leur nom l'indique, les crêtes médianes des océans appartiennent à un tout autre domaine.

Comme nous l'avons montré dans la première partie, chacun des continents a réalisé progressivement sa structure actuelle autour d'une zone centrale, rigide, faite de terrains précambriens (*boucliers*) recouverts, au moins en partie, de

terrains restés horizontaux ou peu inclinés depuis une époque très ancienne, soit depuis l'Algonkien ou le début du Paléozoïque ; cette partie d'aspect tabulaire est désignée sous le nom de *plate-forme*.

C'est en bordure de ces boucliers et de leur plate-forme que se sont édifiés d'autres orogènes, ceux-ci étant d'autant plus jeunes qu'ils sont plus éloignés du massif rigide central. Nous rappelons ici les réserves que nous avons faites dans la première partie en ce qui concerne l'édification des massifs continentaux par empiètement progressif sur le domaine océanique, comme le supposait Éd. SUESS.

Cet arrangement si remarquable vient à l'appui de l'idée que les zones plissées ou orogènes (tectogènes) sont bien les traits structuraux les plus marquants des masses continentales.

Comme nous l'avons rappelé dans la première partie, la construction de chaque orogène est complexe si l'on en fait l'analyse détaillée. Un orogène correspond, en réalité, à l'accolement de rides qui ne sont pas nécessairement synchroniques ⁽¹⁾. Il en résulte forcément que dans un continent formé d'orogènes juxtaposés, les déformations ont été en quelque sorte subcontinues et ont pu marquer leur influence presque sans arrêt sur le déplacement éventuel d'une partie du continent ou de sa masse tout entière.

La question se pose de savoir si, par leur structure et par leur distribution à la surface du globe, les orogènes peuvent apporter quelque indication pour ou contre la thèse de la dérive continentale.

A leur origine, les orogènes se présentent pour la plupart sous l'aspect d'une ride compliquée de plis secondaires tendant à se déverser de part et d'autre vers les parties rigides qui l'encadrent. On ne voit pas, dans ces conditions, qu'un tel édifice puisse apporter quelque indication utile pour l'objet qui nous occupe.

Par contre, il est bien établi aujourd'hui que tout orogène se continue en profondeur sous la forme d'une « racine » descendant d'autant plus bas que la chaîne plissée s'élève davantage au-dessus du niveau moyen des mers. C'est l'application du principe d'isostasie.

Le professeur V.V. BELOUSSOV ⁽²⁾ écrit à ce sujet :

“ All we know at present about the relation between the crust and the mantle that there is a close connection between the crust and the upper mantle and that these two layers constitute one joined geosphere which may be called Tectonosphere. The upper mantle is remarkably different below the continents and

⁽¹⁾ Nous trouvons une idée semblable exposée par le professeur L.U. de Sitter au cours du Symposium sur la Dérive des Continents organisé par la Royal Society of London (page 205). Notre collègue écrit en effet :

“ A much more important structural feature is the mountain chain, with which we geologists are mostly concerned. An ortho-orogen consists of a metamorphic core and marginal external zones on one or on both sides. The total compression is of the order of 200 Km perhaps and the history of its formation stretches over many folding phases of at least 20 to 50 My. The energy needed for such a compression of a narrow belt of the Earth's crust is at least 100 times larger than that needed for a rift or even a wrench fault and the heat energy for the metamorphism is even larger ”.

⁽²⁾ V.V. BELOUSSOV, *The relationship between the Earth's crust and the deeper layers of the Earth*, Journal of the Indian geophysical Union, vol. II, n° 2, 1965.

oceans. Recently it was established that the low velocity layer in the upper mantle is very variable from place to place. It is less pronounced under the crystalline shields, but under the young folded ridges its thickness increases, so that the roots of mountain are complemented by the antiroots on the top of the layer. It is quite obvious that the causes of large vertical movements of the crust embracing the areas of many hundreds of kilometers in diameter are located within the upper mantle. Meanwhile the location of most of such large subsidences and uplifts have been very stable through long periods of geologic periods... Such examples demonstrate that the crust cannot be separated in our theories from the upper mantle. This signifies that the drift must involve not only a thin sheet of granitic layer as it was originally supposed by WEGENER but a block 1000 Km thick ”.

D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que tout orogène est soumis aux forces d'érosion dès qu'il dépasse le niveau moyen des mers. La décharge qui en résulte à son endroit a pour résultat de provoquer un mouvement ascensionnel dont la réalité a été mise en évidence par les nivellements successifs.

C'est donc essentiellement suivant la verticale que se font les mouvements le long des orogènes une fois achevée la phase tectonique majeure.

Les orogènes n'apportent ainsi aucune indication en ce qui concerne la dérive continentale. Dans l'ouvrage dont nous venons de reproduire un extrait, BELOUSSOV dit qu'en tenant compte de l'enracinement de ces édifices jusque dans le manteau, les courants de convection devraient se manifester dans le manteau inférieur. Or, selon lui, d'après ce que l'on sait de ses propriétés, le manteau inférieur est la partie la plus homogène et la plus tranquille de l'intérieur de la Terre. Et il ajoute :

“ Besides, it would be impossible to imagine how the layer 1000 Km thick may be dragged in a horizontal direction without destroying its internal structure. ”

Cette conclusion confirme ce que nous avons dit plus haut à savoir que, par eux-mêmes, les orogènes ne peuvent pas apporter d'arguments en faveur de la dérive des continents, bien au contraire.

La distribution des orogènes dans les masses continentales conduit à une observation d'importance primordiale : Les plissements récents, d'âge cénozoïque-mésozoïque sont disposés uniquement en bordure du Pacifique y compris son prolongement au-delà du détroit de Behring, c'est-à-dire le bassin canadien, ainsi qu'à l'emplacement de la Téthys ; ils ne s'insinuent pas entre les massifs résistants (boucliers et plates-formes) en dehors de ces deux grands alignements ; à cet égard, ils diffèrent des plissements plus anciens et l'on est tenté de dire que la partie rigide des continents a été en s'accroissant depuis le Précambrien jusqu'à l'époque actuelle (1).

(1) Le professeur L. Cahen a signalé à ce sujet qu'en Afrique Centrale les zones d'instabilité successives dans une même grande région se restreignent progressivement en étendue ; par exemple, les failles encore actives d'un graben sont plutôt centrales que bordières, ce qui évoque, dit notre confrère, l'idée d'une progression vers un état figé.

Dans de telles conditions, on s'explique mal qu'il ait pu exister une Pangée réunissant en une masse unique l'ensemble des continents jusque vers le milieu de l'ère mésozoïque, alors que la rigidité de l'ensemble de la croûte avait déjà, semble-t-il, augmenté de façon très sensible.

Il est loisible évidemment de prétendre qu'il y eut au cours des périodes géologiques des phases alternantes d'accrétion et de séparation des continents, en d'autres termes une série de Pangées successivement disloquées. C'est là pure hypothèse en faveur de laquelle il nous paraîtrait bien difficile d'apporter un argument décisif.

En conclusion, du point de vue particulier d'une dérive éventuelle des continents au sens de WEGENER et de ses adeptes, il ne semble pas que les connaissances acquises sur les orogènes puissent apporter une preuve décisive soit pour confirmer soit pour infirmer l'hypothèse. Certes les déformations structurales de cette nature indiquent qu'il y eut, au cours des périodes géologiques, des mouvements de masses énormes en diverses parties de la croûte terrestre, sans qu'il faille leur accorder une importance exagérée.

Nous avons rappelé à ce sujet, dans la première partie, les chiffres cités par CADISH pour le rétrécissement de la surface de la Terre consécutif au plissement des Alpes. Nous avons rappelé aussi l'estimation, plus problématique sans doute établie pour la chaîne himalayenne (page 39). Nous n'avons pas manqué de faire observer que ces chiffres sont sujets à caution, car d'autres facteurs que le rapprochement des massifs rigides voisins interviennent pour donner à une chaîne plissée sa forme définitive, avec ses plis complexes et ses nappes. Il n'en est pas moins vrai que toute zone plissée correspond pour le moins au soulèvement d'un bourrelet de la croûte ou plus exactement à plusieurs bourrelets juxtaposés, de structure plus ou moins complexe, impliquant forcément une diminution de la longueur d'un grand cercle normal à leur direction.

Si pour diverses raisons cette diminution est nettement inférieure à celle évaluée par certains critères pour de grandes chaînes plissées comme l'Himalaya et les Alpes, elle n'en est pas moins réelle et peut permettre de comprendre qu'il y eut à certains moments des déplacements minimes en certains endroits de la surface du globe ; elle permet de comprendre aussi que des serrages différentiels provoquent un mouvement de rotation plus ou moins accusé.

Côtes du type Pacifique et Côtes du type Atlantique.

Dans la première partie de ce travail, nous avons rappelé les idées d'Éd. SUESS sur la distinction qu'il convient de faire entre l'aspect des côtes de l'Océan Pacifique d'une part et celles de l'Océan Atlantique d'autre part. Nous avons dit qu'à notre avis cette distinction n'a pas l'importance que SUESS lui attribuait.

Il y a néanmoins une dissemblance marquée à la fois par la présence de chaînes très jeunes en bordure du Pacifique et, par contre, de chaînes anciennes, fortement démantelées le long de la plupart des côtes de l'Atlantique, comme aussi de l'Océan Indien. Il faut y ajouter que sur la bordure occidentale et septentrionale du Pacifique et localement le long des rivages américains, il existe des fosses profondes, que nous avons appelées les fosses marginales.

C'est peut-être là que se trouve la cause d'une différence d'aspect des rivages. D'autre part ne faut-il pas voir dans l'âge relatif très différent des chaînes bordières du Pacifique et des chaînes bordières des autres océans, une cause de la dissemblance observée ?

Dans chacune des chaînes marginales de l'Atlantique et de l'Océan Indien, il ne subsiste qu'une partie de la zone plissée originelle, c'est-à-dire la partie axiale du tectogène et son flanc tourné vers le continent, c'est-à-dire vers l'avant-pays ; l'autre versant que l'on peut rattacher à l'arrière pays s'est effondré et est actuellement recouvert par l'océan ou par des sédiments peu ou pas tectonisés qui le recouvrent en discordance de stratification. C'est ce que l'on peut voir dans les îles Lofotea en bordure de la chaîne scandinave, dans les Appalaches, les chaînes anciennes du Mayumbe en Afrique occidentale, comme aussi dans la zone plissée plus jeune qui longe l'extrémité méridionale de l'Afrique ; la situation est très semblable à la bordure orientale de Madagascar, le long de la côte occidentale de l'Australie.

Une telle structure est tout à fait comparable également à celle que l'on connaît dans des zones plissées appartenant au domaine continental, en dehors des grands océans. Les chaînes alpines sont dans ce cas avec les zones affaissées notamment à l'intérieur des grands arcs tels les Carpathes ; il en est de même pour la bordure ouest de l'Apennin ; la chaîne de l'Oural semble bâtie sur le même modèle, avec son versant oriental affaissé par rapport à la masse principale de l'orogène, et recouvert par une épaisseur considérable de sédiments postpaléozoïques.

La règle paraît donc être la même, qu'il s'agisse de tectogènes inclus dans les massifs continentaux ou de chaînes en bordure de l'Atlantique et de l'Océan Indien.

Suivant les vues de BELOUSSOV il s'est vraisemblablement produit des réactions entre le Sima et le matériau de nature sialique qui s'y enfonçait et qui était digéré par lui. C'est ainsi que l'on peut expliquer à titre d'exemple, la présence d'un substratum de nature basique à très faible profondeur sous la zone pannonique affaissée à l'intérieur de l'arc des Carpathes, comme c'est le cas aussi dans la mer Noire, au voisinage de la Caspienne et du lac d'Aral, etc. Cette disposition est en tout comparable à celle reconnue au nord ouest des Bermudes où un sondage a révélé l'existence d'un substratum de nature basique sous une mince couverture de sédiments récents non tectonisés : or, d'après ce que l'on sait de la genèse de la chaîne des Appalaches, on devrait s'attendre à trouver là l'avant-pays du versant oriental de cette chaîne, descendue sous le niveau de l'Océan.

Nous avons rappelé, en effet, que l'origine de certains sédiments du Dévonien supérieur de la chaîne actuelle doit être cherchée non pas dans l'avant-pays de celle-ci, c'est-à-dire en plein continent nord américain, mais dans une région située à l'est, qui émergeait à cette époque et qui est aujourd'hui affaissée sous le niveau de l'océan.

Devant la généralité de la règle que nous venons de rappeler, tant pour les orogènes continentaux que pour les orogènes en bordure de l'Océan, nous pouvons admettre que les chaînes plissées anciennes en bordure de l'Atlantique et de l'Océan Indien sont caractérisées par l'affleurement, suivant les rivages, de la zone axiale du tectogène, fortement érodée ; vers l'intérieur du continent se développe la zone plissée passant progressivement à l'avant-pays ; du côté de l'Océan se trouvait originellement l'autre flanc de l'orogène, actuellement affaissé sous les eaux et dont les matériaux ont été profondément modifiés sous l'influence du sima en relation avec la partie supérieure du manteau, conformément à la thèse de BELOUSSOV.

La présence des anorthosites en Scandinavie, en Afrique Australe, à Madagascar, en Australie occidentale confirme cette manière de concevoir les choses, conformément aux travaux du professeur P. MICHOT.

Ces considérations sont importantes pour qui cherche à résoudre la question de la dérive des continents au sens de WEGENER. En effet, les chaînes plissées marginales de la bordure orientale de l'Atlantique, sont caractérisées par une apparence de poussée vers l'est c'est-à-dire vers les boucliers ; d'autre part l'axe de l'orogène avec les terrains les plus anciens, voire le socle cristallophyllien est en bordure immédiate du continent, coupé du côté de l'océan par une zone failleuse d'effondrement.

Du côté ouest de l'océan la disposition est la symétrique de celle que nous venons de rappeler. Entre les deux bords s'étendent les grands fonds formés de sima. On est tout naturellement tenté d'admettre que l'on se trouve en présence des deux versants opposés d'un même tectogène, autrefois jointifs, actuellement disjoints par un phénomène de dérive au sens de WEGENER.

Par contre, si l'on tient compte des données rappelées ci-avant, on doit conclure que de part et d'autre d'un même bassin océanique il y avait originellement un orogène complet avec l'allure en éventail de ses plis, orogène dont le versant tourné vers la dépression océanique s'est affaissé et a été digéré ou remplacé par le sima au point de disparaître entièrement.

La bordure occidentale de l'Océan Pacifique avec ses fosses marginales est en quelque sorte l'image de ce qui a pu se passer à une époque antérieure le long des côtes atlantiques. Reportons-nous, en effet, à l'opinion de VENING-MEINESZ, rappelée antérieurement (page 84). Le regretté savant hollandais a établi de façon indiscutable que les grandes fosses marginales du Pacifique sont caractérisées par un déficit de gravité. Pour qu'une telle situation puisse se maintenir, il y a lieu de faire appel à l'action d'un courant de convection obligeant la croûte superficielle à s'incurver vers le bas au contact de la masse continentale.

Sur la base de cette explication, on peut supposer qu'en bordure de l'Atlantique et de l'Océan Indien, il y eut autrefois un dispositif comparable aux fosses marginales du Pacifique, provoquant ou facilitant la descente du versant d'orogène tourné vers la mer, conduisant ainsi à sa disparition par réaction avec le sima. La différence entre Atlantique et Pacifique serait due à ce que, dans le premier l'évolution est achevée alors qu'elle est en cours dans le second.

Cette explication se conçoit si l'on accepte l'ancienneté du fond de sima de ces océans, sans qu'il faille recourir à une action de dérive continentale.

Il ne faut cependant pas voir là une preuve en faveur d'une thèse déterminée, mais une simple indication susceptible d'apporter quelque lumière dans le débat.

Au cours d'une conférence donnée le 29 février 1966, devant la Geological Society of London ⁽¹⁾, le professeur V.V. BELOUSSOV a envisagé tout spécialement la question de la croûte et du manteau supérieur à l'endroit des continents. Toutefois à l'occasion de la discussion qui a suivi son exposé, il a déclaré que le problème est bien plus complexe à l'endroit des océans. Il admet toutefois qu'il peut y avoir, dans les océans, transformation d'une croûte de nature continentale en une croûte de nature océanique par destruction et dissolution de la première à l'intervention de magmas à haute température, de nature ultrabasique ou basique. Il ne voit pas la possibilité d'expliquer autrement l'histoire de la Mer Noire, de la Méditerranée, de la Mer des Caraïbes, de la Mer d'Okhotsk, de la Mer du Japon et de bien d'autres et il ajoute : " The same process should also take place on the margins (at least) of oceans where truncation of the continental structures was observed. The hypothesis of horizontal displacements of continental masses could not be applied here, if we proceeded on the basis of data on the thermal field of the Earth and on the connexions between processes in the crust and processes in the Upper Mantle ".

Il est permis de se demander s'il n'y a pas une certaine analogie entre l'affaissement des arrières pays des zones plissées et les fosses marginales de la bordure de l'Océan Pacifique. On connaît l'explication donnée pour ces dernières par le professeur VENING-MEINESZ ; nous l'avons rappelée dans la première partie de ce travail (page 84).

On pourrait supposer par exemple qu'en bordure des continents à tectonique ancienne, les fosses marginales ont disparu par l'établissement d'une sorte d'équilibre alors qu'elles peuvent subsister dans les zones océaniques bordières à tectonique récente parce que la partie de nature continentale de la croûte affaissée sous le niveau de l'océan n'a pas encore été digérée par un magma de nature ultrabasique.

La formation d'un orogène peut donc être, en partie tout au moins, la cause d'une non coïncidence dans la position du pôle magnétique d'une époque donnée suivant qu'elle est déterminée d'après les roches prélevées d'un côté ou de l'autre de cette surélévation tectonique.

⁽¹⁾ V.V. BELOUSSOV, *Modern concepts of the structure and development of the Earth's crust and the Upper mantle of the continents*, Quarterly Journal of the Geological Society of London, n° 487, vol. 122, part. 3, 30 nov. 1966.

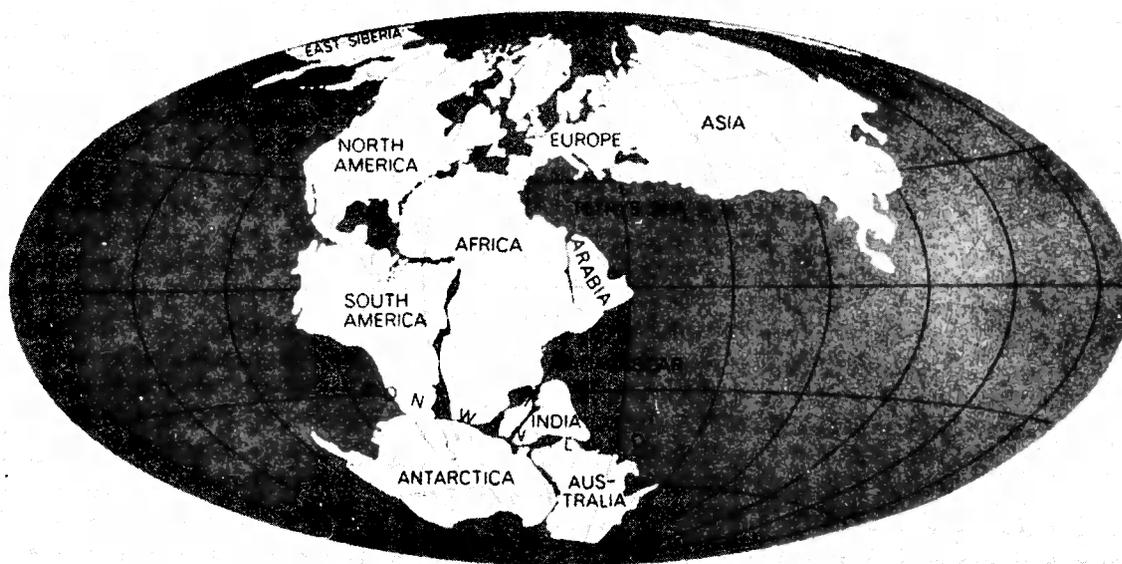
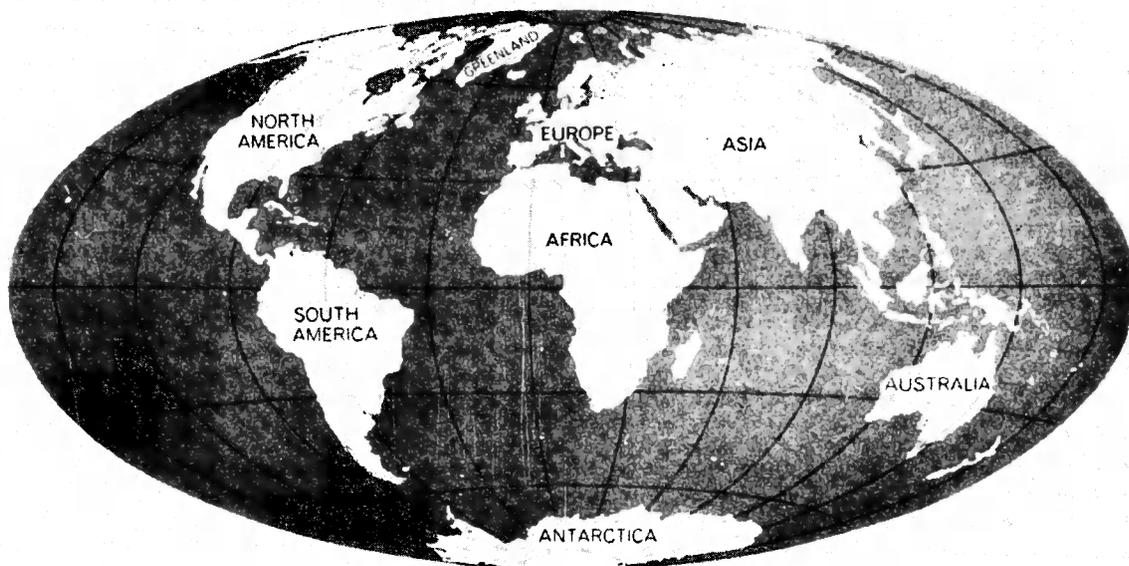


FIG 37 et 37bis. — La disposition actuelle des continents (en haut) comparée à la Pangée (en bas), d'après Tuzo WILSON.

(Figures reproduites avec l'autorisation de l'Auteur.)

A cet effet, reportons-nous au tracé de la Pangée tel qu'il est conçu par TUZO WILSON ⁽¹⁾ (Fig. 37 et 37^{bis}).

On remarque que, l'auteur a écarté l'Asie de l'Amérique du Nord, non pas en élargissant le détroit de Béhring, mais en créant une disjonction suivant approximativement le tracé des Monts Verskhoïansk. On sait, d'autre part, grâce au paléomagnétisme, que l'emplacement du pôle au Crétacé n'est pas le même suivant que les déterminations sont faites sur roches asiatiques ou sur roches nord-américaines. Il est permis de penser que cette différence relativement minime peut tenir au déplacement relatif des blocs de l'écorce terrestre à la suite de la surrection de cette zone plissée datant de la fin du Crétacé. Ce serait là un exemple intéressant de l'intervention des orogènes pour expliquer certaines non coïncidences relevées par les mesures du paléomagnétisme.

L'édification d'un tectogène ne se réalise pas sans la production de fractures. Les principales d'entre elles, c'est-à-dire les failles de charriage, impliquent le déplacement de masses parfois énormes sur une distance notable, le long d'une surface peu inclinée ; c'est tout le problème de la formation des « nappes ». Leur rôle ne peut être dissocié de celui des plissements proprement dits lorsqu'on envisage le déplacement de blocs étendus de la croûte terrestre avec comme conséquence un mouvement relatif des pôles d'autrefois. Il n'est pas nécessaire que nous nous y arrêtions.

D'autres fractures méritent également de retenir l'attention ; ce sont les grandes failles qui, dans beaucoup d'orogènes font la limite entre la partie axiale de la chaîne et son arrière pays ⁽²⁾. Nous aurons l'occasion d'en parler à propos de cas particuliers.

B. LES DÉFORMATIONS ÉPÉIROGÉNIQUES.

Indépendamment des grandes zones plissées, les continents ont été le siège de déformations de faible amplitude, larges ondulations anticlinales ou synclinales, telles les *antéclises* et *synéclises* décrites par le professeur Al. BOGDANOFF ⁽³⁾ en Europe orientale, le bassin de Paris en France, les larges dépressions séparées par des crêtes si typiques de la structure du Continent Africain, ou même les déformations plus accusées du Weald et de l'île de Wight en Angleterre, de l'anticlinal du Pays de Bray en France. etc.

⁽¹⁾ J. TUZO WILSON, *Continental Drift*, Scientific American, W.H. Freeman and Cy, San Francisco, California 1963.

Voir aussi du même auteur : *Evidence from ocean islands suggesting movement in the Earth*, Philosoph. Trans. of the Royal Society, vol. 258, 1965.

⁽²⁾ P. FOURMARIER, *Asymétrie structurale des tectogènes*, Ann. Soc. Géol. Belg., t. LXXI, Bull., p. 179, Liège, 1948.

⁽³⁾ Al. BOGDANOFF, *Sur certains problèmes de structure et d'histoire de la plate-forme de l'Europe Orientale*, Bull. Soc. Géol. France, 7^e sér., t. X, 1962.

Il faut y voir l'indice d'influences tectoniques, très modérées sans doute, qui n'en affectent pas moins la surface entière des continents en dehors des zones de plissement.

Tout aussi bien que les continents, les fonds océaniques ont subi les effets des mouvements épéirogéniques. C'est par leur influence que Ch. DARWIN expliquait la présence d'épaisseurs anormales de calcaire corallien à l'endroit des atolls, voire la possibilité de la présence de ces constructions à l'endroit des grandes profondeurs océaniques. De même, c'est dans l'affaissement de la croûte terrestre que l'on explique la formation des « guyots » avec leur surface arasée et recouverte parfois par des récifs de coraux. C'est par des mouvements en sens inverse que s'explique la présence de constructions édifiées par des coraux et situées aujourd'hui à hauteur notable au-dessus de la surface de l'Océan.

Les larges déformations de caractère épéirogénique ajoutent sans aucune doute leurs effets à ceux des orogènes proprement dits, comme à ceux des failles radiales dont il va être question. Toutefois eu égard à leur ampleur très faible, on admettra volontiers que leur influence a été négligeable en ce qui concerne des déplacements quelque peu marqués de panneaux de la croûte terrestre les uns par rapport aux autres.

Une remarque s'impose cependant, qui n'est pas sans intérêt pour le sujet qui nous occupe. Sans avoir modifié la structure même de la croûte terrestre au même titre que les zones plissées et les grandes failles radiales et les décrochements horizontaux, les mouvements épéirogéniques ont pu modifier l'aspect géographique de parties plus ou moins étendues de la surface du globe, par le fait de transgressions ou de régressions. Tel est le cas, par exemple, pour l'Atlantique sud où l'allure des rivages s'est fortement modifiée depuis le Crétacé et le Tertiaire, comme il a été exposé au chapitre I de la 2^{me} partie de cet ouvrage.

C. LES FAILLES RADIALES (Décrochements horizontaux).

Il convient que nous envisagions avec beaucoup d'attention les grandes failles radiales, dites aussi failles profondes (Wrench-faults ou strike-slip faults des auteurs de langue anglaise).

Dans la première partie de ce rapport, nous avons donné les caractéristiques de quelques-uns de ces grands accidents. Nous avons eu ainsi l'occasion d'insister sur un fait d'importance primordiale : Les grandes fractures du type des décrochements horizontaux s'étendent en un vaste réseau sur toute la surface du globe ; ce réseau intéresse non seulement les masses continentales mais aussi les grands fonds océaniques malgré la différence de composition de leurs matériaux constituants.

A ce propos nous avons souligné un fait important : le déplacement des rides océaniques médianes par ces grandes fractures ⁽¹⁾. Qu'il s'agisse des fonds marins ou du domaine continental, elles sont disposées de manière semblable. Peut-être pourrait-on penser que le déplacement horizontal suivant les décrochements a plus d'ampleur sur les fonds marins ou en bordure des continents qu'à l'intérieur des masses continentales. Il faudrait sans doute en chercher la cause dans la différence d'épaisseur de la zone superficielle rigide entre ces deux domaines si différents de la croûte terrestre.

Il est établi également que les déplacements le long des décrochements horizontaux visibles sur les continents ou à leur bordure se sont faits petit à petit et pendant une très longue durée ⁽²⁾. Pourrait-on penser qu'il n'en fut pas de même pour les décrochements qui affectent le fond des océans ? La comparaison des déplacements mesurés de part et d'autre est très suggestive et permet de croire qu'il s'agit dans les deux cas de traits structuraux très anciens, bien antérieurs à l'époque assignée à l'hypothétique dérive des continents.

La production de grandes failles de cette nature implique forcément le glissement relatif des massifs qu'elles séparent. En l'occurrence, il ne peut être question de mobilisme au sens de WEGENER, mais du déplacement relatif de massifs rigides suivant les règles normales de l'évolution géologique de la croûte terrestre.

Nous avons rappelé antérieurement que, selon toute probabilité, le réseau des grands décrochements affectant le fond de l'Atlantique est en connexion étroite avec le réseau de cassures de même nature reconnu sur le territoire africain, et peut-être même aussi avec les grands décrochements du fond du Pacifique. On est enclin actuellement — nous avons insisté sur ce point — à attribuer une origine très ancienne à ce vaste réseau qui s'est accentué peu à peu au cours des périodes géologiques.

Dans ces conditions on est porté à admettre qu'il n'y a pas eu séparation de l'Amérique et de l'Afrique par glissement des masses sialiques sur un fond de sima, c'est-à-dire dérive. Bien au contraire, la disposition relative de la masse continentale africaine et de son homologue de l'Amérique méridionale était acquise lorsque ces grandes fractures se sont produites et accentuées par la suite.

Comme nous l'avons fait remarquer précédemment, la croûte terrestre a acquis une température très proche de sa température actuelle depuis le début des périodes géologiques sinon la vie eut été impossible à la surface de la Terre. Aussi peut-on être certain que le fond des océans doit avoir depuis la même époque atteint une rigidité telle que le glissement des blocs sialiques continentaux sur sa surface faite de sima fut rendu impossible.

⁽¹⁾ Pour l'Atlantique, voir notamment la carte publiée par Bruce C. Heezen et Marie Tharp (Geol. Soc. of America. Spec. paper, n° 65, 1959). La faille transversale principale accuse un rejet horizontal de l'ordre du millier de kilomètres ; pour l'ensemble des failles, proches les unes des autres, reconnues en cet endroit du globe, il est de l'ordre de 3000 kilomètres.

⁽²⁾ Rappelons à ce sujet aux observations de Crowell dont nous avons fait mention antérieurement (première partie, page 57).

On dira peut-être qu'il faut faire à ce sujet une distinction entre les effets des efforts très lents et ceux des efforts brusques. Nous avons envisagé cette question au début de la première partie de ce rapport (page 16) ; cette distinction s'impose pour les matériaux situés à une certaine profondeur sous la surface de la Terre. Il faut se garder d'appliquer la même règle aux zones proches de la surface.

Ajoutons encore une remarque à ce propos :

S'il est exact comme d'aucuns l'ont prétendu que les grands décrochements transatlantiques n'ont plus été actifs depuis 200 M.A. la théorie de WEGENER tombe d'elle-même puisque ce savant faisait remonter à l'époque du Crétacé la séparation de l'Amérique du Sud et de l'Afrique, c'est-à-dire à 150 millions d'années seulement.

En conclusion, la mise en mouvement des fragments de la croûte terrestre par le jeu des failles radiales et tout spécialement de celles du type des décrochements horizontaux peut expliquer la non concordance des emplacements du pôle magnétique établis par des mesures prises sur des roches situées de part et d'autre de la ligne de fracture, donnant ainsi l'impression d'une dérive, il en a été question au chapitre réservé au paléomagnétisme.

Nous croyons bon de rappeler à ce propos que G. DUBOURDIEU ⁽¹⁾ a insisté sur le fait que, par la présence d'une série de failles de décrochement de direction SW-NE, la région marocaine s'est déplacée vers le nord-est par rapport à la Tunisie.

Il attribue un tel déplacement à une sorte de dérive conforme à la conception Wegenerienne.

Ce même savant a repris l'examen de cette question en 1962, à l'occasion du grand séisme d'Agadir ⁽²⁾.

Il y a dans ces accidents la preuve du déplacement relatif de blocs de la croûte terrestre dont l'importance peut être grande. Il est prudent cependant d'éviter de surestimer le déplacement de l'Afrique par rapport à l'Europe en totalisant les rejets horizontaux de tous ces décrochements ; une disposition en relais de ces cassures est sans doute plus conforme à la réalité.

Dans la première partie de ce rapport, nous avons signalé la présence d'une grande zone de fractures radiales s'étendant du Groenland à la Mer Rouge suivant une direction moyenne SE-NW ; nous avons proposé de l'appeler *zone de dislocation transeuropéenne*.

L'intérêt de cette observation ne peut échapper à qui s'intéresse à la théorie de la dérive continentale.

Cette zone disloquée, de direction presque rectiligne a manifesté son action pendant une très longue période de temps ; il est probable qu'on peut la faire remonter au Précambrien ; ses effets sont encore sensibles localement à l'heure actuelle.

⁽¹⁾ G. DUBOURDIEU, *Réactions wegeneriennes en Afrique du Nord*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLI, n° 25, 19 décembre 1960.

⁽²⁾ G. DUBOURDIEU, *La leçon du séisme d'Agadir*, C. R. Acad. Sc. Paris, vol. 256, n° 3, 14 janvier 1963.

Si la thèse de WEGENER était exacte, on devrait s'attendre à voir cette zone s'élargir progressivement au cours des temps, suivant un processus analogue à celui supposé pour la dérive de l'Amérique par rapport à l'Eurafric. Or, il n'en est rien. D'autre part, par son ancienneté elle est en contradiction avec l'hypothèse Wegénérienne.

De toute manière, les grandes failles radiales du type des décrochements horizontaux sont d'une importance capitale dans l'examen du problème de la dérive des continents : Tout d'abord, le rejet de certains d'entr'eux est d'un ordre de grandeur comparable au déplacement de l'Europe par rapport à l'Amérique du Nord tel qu'il est révélé par le paléomagnétisme. D'autre part, leurs effets se font sentir pendant une très longue période de temps ; plusieurs de ces grands accidents ont manifesté leurs effets dès avant le Mésozoïque et sont encore en action ; pour beaucoup d'autres il semble qu'il en fut de même bien que l'on ait moins de certitude à cet égard. En fait, la plupart des grandes failles de décrochement sont antérieures à la dislocation de la Pangée telle que la concevait WEGENER. Comme elles déplacent les crêtes médianes des océans, celles-ci leur sont antérieures ; ce sont là des arguments en faveur de la thèse de la permanence, ou tout au moins en opposition avec la notion d'une dérive relativement récente géologiquement parlant

On se rend compte par là du rôle important qui peut être attribué dans certains cas au jeu des décrochements pour expliquer les anomalies apparentes relevées dans l'emplacement du pôle magnétique aux diverses époques de l'histoire géologique de la Terre.

Nous croyons bien faire en reproduisant ici un extrait de l'exposé fait par le professeur L.U. DE SITTER durant le symposium sur la Dérive des Continents organisé par la Royal Society of London en 1965.

" The horizontal slip of many hundreds of miles which are postulated on ground of the magnetic pattern to have happened along the fracture zones of the eastern Pacific looks rather improbable, because these faults butt against the continent and can not be traced as major faults on land.

" The horizontal slip along the fracture zones crossing the Mid-Atlantic Ridge between Brazil and Africa seems to be well proved, but this does not substantiate the drifting of Africa away from south America ; on the contrary "

Nous aimons signaler ici la parution récente d'une brève étude de M. l'Abbé J. GRAINDOR ⁽¹⁾ sur les cisaillements crustaux dans le socle varisque de la France. On y trouve un exemple très net de fractures disposées suivant un réseau régulièrement disposé et dont le jeu s'est opéré à divers stades de l'évolution du massif paléozoïque.

Nous croyons utile de faire observer que les travaux de plus en plus poussés de cartographie géologique mettent en évidence l'existence de semblables décroche-

(1) M.J. GRAINDOR, *Analyse de cisaillements crustaux dans le socle varisque de la France*, C. R. Séance Acad. Sc. Paris, t. CCLXII, série D, n° 3, 17 janvier 1966.

ments en maintes régions où leur présence n'avait pas été signalée. Nous en voulons pour preuve l'article que Richard L. NIELSEN vient de faire paraître sur le Walker Lane, West Central Nevada ⁽¹⁾. Il signale la présence d'un grand décrochement sensiblement parallèle à la Faille de San Andreas et suivant lequel le rejet horizontal est de l'ordre de 12 miles.

En complément de cet exposé sur les déplacements horizontaux le long de nombreuses fractures radiales de la croûte terrestre, il n'est pas sans intérêt de rappeler la notion des oroclins tels que les a définis le professeur S.W. CAREY ⁽²⁾.

On peut penser, en effet, que la déformation des plis originels dans leur orientation, si ces déformations sont réelles, peut jouer un rôle comparable à celui des décrochements horizontaux. Peut-être convient-il, dans des cas particuliers tel l'ouest du continent nord-américain, de leur attribuer un certain rôle dans le déplacement du pôle magnétique suivant que sa position est établie d'après des mesures faites dans la partie occidentale ou dans la partie orientale du continent. Toutefois, il faut se garder d'attribuer une importance exagérée à ce mode de déformation post-orogénique.

Remarque. — Avant de procéder à l'examen de quelques particularités locales de la tectonique, nous désirons exposer une observation d'ordre général.

Nous avons déjà fait remarquer que les déplacements le long des décrochements horizontaux ont débuté parfois très tôt au cours des périodes géologiques et qu'ils se sont accentués jusqu'à une époque très récente. Nous trouvons dans la *Quarterly Journal of the Geological Society of London* (vol. 121, part. V, n° 484, nov. 1965) des faits intéressants rapportés par F.W. SHOTTON. Nous savons aussi qu'en Belgique, des éléments de la grande zone failleuse du Rhin inférieur se sont accentués à diverses reprises jusque pendant le Quaternaire, affectant même les alluvions du fond des vallées.

On sait aussi que des plis superficiels tels l'anticlinal du Pays de Bray se sont accentués à une époque récente comme l'ont mis en évidence MM. A. BLONDEAU, Cl. CAVELIER et Ch. POMEROL ⁽³⁾. Les mouvements dont il est question ici ont influencé les alluvions de l'Oise dans le prolongement de cet anticlinal.

Bien d'autres exemples de déformations récentes ont été observés sur toute l'étendue de la surface du globe, notamment par le Dr. LAUGHTON qui signale la formation d'une fosse sous-marine dans le golfe d'Aden, la Mer Rouge et le golfe d'Akaba ⁽⁴⁾ pour se diriger vers la Mer Morte.

⁽¹⁾ Richard L. NIELSEN, *Right lateral strike-slip faulting in the Walker Lane, West Central Nevada*, Geol. Soc. of America Bull., vol. 76, n° 11, novembre 1965.

⁽²⁾ S.W. CAREY, *The orocline concept in Geotectonics*, Part. I, The papers and proceedings of the Royal Society of Tasmania, vol. 89, pp. 255-288, 1955.

⁽³⁾ Bull. Soc. Géol. France (7) IV, p. 357.

Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynamique, vol. VII, fasc. 3. juillet-septembre 1965.

C. R. Séances Acad. Sciences Paris, 9 juin 1965.

⁽⁴⁾ New Scientist, 1965.

D'autre part, nous trouvons un article récent de Thomas W. DONNELLY ⁽¹⁾ dans lequel l'auteur s'efforce d'établir par une étude détaillée de la morphologie du fond marin qu'une activité tectonique s'est développée dans la partie orientale des Grandes Antilles à l'époque post-pléistocène.

Ce sont certes là des exemples de déplacements de minime importance. Ils doivent cependant être pris en considération par ceux qui s'intéressent à l'évolution de la croûte terrestre tout au long des périodes géologiques.

Ils mettent en évidence la *continuité des manifestations tectoniques*. Ces déformations récentes sont, de façon très générale, apparentées à des dislocations anciennes de plus grande importance, qu'il s'agisse de plis ou de fractures ; elles en sont en quelque sorte l'accentuation. On est en droit d'en conclure que la croûte terrestre est toujours en mouvement. Aussi peut-on s'étonner de ce que d'aucuns croient pouvoir soutenir l'opinion d'une Pangée, restée stable jusqu'au début du Mésozoïque et dont la division avec écartement des fragments se serait opérée seulement depuis cette époque relativement très récente. Et cela d'autant plus que dans la Pangée supposée se sont produites des déformations de premier ordre telle la surrection de zones de plissement.

Un tel argument ne peut pas à lui seul être utilisé contre la théorie de la Dérive wegenérienne. Par contre, il peut étayer un raisonnement basé sur des faits d'une valeur supérieure.

Dans un article présenté au Congrès de New Delhi, A.V. PAYNE, H. BAADEGEARD, R.A. BURWASH, G.L. CUMMING, C.R. EVANS et R.E. FOLINSBEE ⁽²⁾, ont fait connaître l'existence au Canada d'une série de dykes de nature simatique dessinant sur la carte un réseau assez régulièrement disposé. Ils en tirent un argument en faveur de la théorie de la Dérive.

Nous remarquerons tout d'abord que ces dykes sont cantonnés dans le Précambrien et ont, eux-mêmes un âge extrêmement ancien pouvant aller de 1900 à 2300 millions d'années.

Dans ces conditions et compte tenu de la disposition en réseau de ces fractures ne semblerait-il pas plus rationnel d'y voir des éléments très anciens du grand champ de fractures radiales qui couvre toute la surface du globe ? Leur largeur parfois notable peut tenir à des réouvertures successives par la remise en action des forces qui ont provoqué la formation du réseau de fractures, sans qu'il faille faire appel à une véritable action de dérive du type wegenérien.

D. OSBERVATIONS À PROPOS DE LA SÉISMICITÉ.

Les tremblements de terre sont une manifestation de l'activité tectonique de la croûte terrestre. Sans vouloir nous y attarder, nous désirons cependant

⁽¹⁾ Bull. Geol. Soc. of America, vol. 76, n° 11, nov. 1965, p. 1291.

⁽²⁾ *A Line of evidence supporting continental drift*, Intern. Union of Geol. Sciences. The Upper Mantle Symposium, New Delhi, 1964, Copenhague, 1965.

signaler quelques remarques que nous a présentées à leur sujet M. le professeur E. LAHAYE (1).

Le fond de l'Océan Pacifique peut être considéré comme pratiquement aséismique ou tout au moins ne l'être qu'à un degré extrêmement minime. Par contre sa bordure se caractérise sur toute sa longueur par une séismicité très marquée. La géologie nous apprend que, selon toute vraisemblance, l'Océan Pacifique est un trait permanent ou tout au moins extrêmement ancien de la face de la Terre. Sa ceinture, au contraire, correspond à une zone à déformations tectoniques très récentes du point de vue géologique, tant du côté américain que du côté australo-asiatique.

La relation apparaît ainsi évidente entre la séismicité et la tectonique. Nous en trouvons une preuve supplémentaire dans le fait, bien mis en évidence dans les cartes dressées par M. LAHAYE, que les massifs anciens ou boucliers situés de part et d'autre du Pacifique sont aussi des parties de la croûte terrestre à séismicité extrêmement faible. La carte des masses continentales stables, avec leur ceinture séismique, intercalée dans l'atlas de M. LAHAYE est des plus parlantes à cet égard.

Sans vouloir prétendre que ce soit une règle absolue, il semble donc que les zones aséismiques de la nature actuelle soient l'héritage d'une situation très ancienne. Aussi peut-on penser que les zones stables d'aujourd'hui correspondent à des zones relativement rigides de la nature ancienne.

Une réserve s'impose cependant. En étudiant les décrochements reconnus en bordure du Pacifique, notamment la faille San Andreas, en Californie, CROWELL est arrivé à la conclusion qu'il s'agit vraisemblablement d'une fracture très ancienne qui s'est accentuée progressivement jusqu'à l'époque actuelle. Il en est vraisemblablement de même pour d'autres accidents de même nature.

S'il en est bien ainsi — et nous n'avons aucune raison d'en douter — la séismicité de la bordure du Pacifique n'est pas due uniquement à la jeunesse relative des chaînes bordières du Pacifique. Ce serait au contraire une particularité permanente de cette zone de contact entre l'Océan et les continents ; elle se serait maintenue cependant grâce à la surrection de chaînes plissées de plus en plus récentes en bordure du Grand Océan.

Si les considérations qui précèdent nous conduisent à confirmer l'ancienneté du fond de cet océan, le même raisonnement paraît être de mise pour l'Atlantique et l'Océan Indien. Pour le premier, la séismicité paraît être localisée principalement le long de la crête océanique médiane, laquelle semble, comme nous l'avons rappelé précédemment, montrer des traces incontestables d'activité tectonique en rapport avec le flux de chaleur anormal et les appareils volcaniques disposés suivant son axe.

De toute manière, en appliquant le même raisonnement que pour le Pacifique, nous pouvons trouver là un indice en faveur de la stabilité de l'Atlantique

(1) On consultera à ce sujet . Edm. LAHAYE, *Atlas des régions séismiques avec brochure explicative*, Université libre de Bruxelles.

et de son ancienneté relative. Certes l'argument de la séismicité serait sans valeur à lui seul ; en concordance avec d'autres arguments il peut avoir quelque intérêt.

Le même raisonnement s'impose pour l'Océan Indien.

Si nous nous reportons une fois encore à l'Atlas du professeur LAHAYE, nous constatons que dans l'Atlantique la zone des Caraïbes et celle des Antilles du Sud tranchent sur le reste par leur séismicité relativement grande. Cette constatation n'est pas pour nous surprendre si nous acceptons que ces deux zones à plis récents, sont en étroite connexion avec les chaînes de la bordure occidentale des deux Amériques ; elles représentent en quelque sorte des intrusions de la ceinture à plis récents du Pacifique dans le domaine atlantique.

En ce qui concerne ce dernier, il est à noter également que la densité des foyers de tremblements de terre paraît être plus grande dans la partie de l'océan située entre le Cap des Palmes (Golfe de Guinée) et la mer des Caraïbes, c'est-à-dire là où les océanographes ont décelé la présence des principales failles (décrochements) de direction sensiblement Ouest-Est qui déplacent la ride médiane de l'Atlantique.

Toutes ces coïncidences sont remarquables et ne doivent pas être laissées dans l'ombre lorsqu'on essaie de préciser l'évolution de cette partie du globe.

En ce qui concerne l'Océan Indien, il semble s'apparenter à l'Océan Atlantique plutôt qu'au Pacifique si l'on tient compte notamment de la nature de ses rivages. Pour les particularités de son fond, nous pouvons nous reporter à ce qu'ont écrit à ce sujet BRUCE C. HEEZEN et MARIE THARP : L'un des caractères les plus marquants du fond de l'Océan Indien est la présence de plateaux et de crêtes généralement de direction méridienne et qui sont aséismiques. Il en est ainsi notamment de l'île de Madagascar avec son prolongement sous-marin méridional et sa continuité vers le nord par les Seychelles et le plateau de Mascarenne ; le plateau des Kerguelen peut rentrer dans la même catégorie.

La présence de ces reliefs aséismiques de nature continentale de l'Océan Indien marque une différence appréciable avec l'Atlantique méridional.

Les considérations émises à propos de l'ancienneté de l'Atlantique paraissent pouvoir s'appliquer à l'Océan Indien.

En conclusion, l'aséismicité relative des trois grands océans : Pacifique, Indien, Atlantique pourrait être un argument en faveur de leur ancienneté et de leur permanence. Nous faisons toutefois toute réserve quant à la valeur de cet argument ainsi que nous l'avons déjà souligné précédemment.

E. PARTICULARITÉS LOCALES.

Il n'est pas sans intérêt d'envisager certaines particularités de structure susceptibles d'aider à la compréhension plus exacte d'un déplacement éventuel des masses continentales par une action de dérive.

a) La formation de l'Océan Arctique a été interprétée comme le résultat d'une déchirure dans les terres boréales, conséquence de la dérive de l'Amérique du Nord, à l'époque où celle-ci s'écartait progressivement de l'Europe aux temps tertiaires suivant la théorie de WEGENER ⁽¹⁾.

C'est là une hypothèse conforme aux idées de CAREY sur la signification des oroclins. Des objections peuvent, sans aucun doute, y être présentées. Il convient, en effet, de faire la distinction entre le Bassin Canadien compris entre l'Archipel Canadien, les côtes de l'Alaska et les côtes sibériennes (entre le Détroit de Behring et l'Archipel de la Nouvelle Sibérie) d'une part et la crête Lomonosov, qui le sépare du reste des mers boréales, d'autre part.

La présence de cette crête, parfaitement continue, prolongeant les plis de la Nouvelle-Sibérie, permet de croire que, depuis les temps mésozoïques pour le moins, il n'a pu se produire de déplacement des masses continentales situées en bordure (Amérique et Eurasie) depuis une époque datant au moins du Mésozoïque. C'est là un argument à opposer à la conception wegenérienne.

L'Océan Arctique, ou tout au moins le Bassin Canadien à fond de sima peut être considéré comme le prolongement normal du Pacifique ; il a évolué de la même manière que ce dernier ; il a la même signification dans l'ensemble de la croûte terrestre ⁽²⁾ ; il n'est pas interdit d'y voir un trait permanent, très ancien, de la face de la Terre.

Le professeur Ph. KUENEN ⁽³⁾ semble s'être rallié à cette idée de l'analogie très grande entre l'Arctique et le Pacifique. Il écrit : " It is curious that the Arctic Basin is found to be decidedly of Pacific character,..." "

Les observations récentes sur la constitution du fond de l'Océan Arctique ne font que confirmer cette opinion.

b) Les données acquises sur la géologie structurale du Groenland, du Spitzberg, de la Scandinavie et le nord des Iles Britanniques ne sont pas non plus en faveur de la théorie de la dérive. Au Spitzberg et dans les îles voisines, le Paléozoïque est disposé en allure anticlinale. Selon toute probabilité, la ligne axiale de ce grand pli se prolonge vers le Sud séparant ainsi les chaînes d'Écosse des plissements d'âge calédonien de Scandinavie, sous réserve de l'influence des grandes dislocations radiales prolongeant la zone bien connue du Rhin inférieur.

D'autre part, les plis de même âge de la côte orientale du Groenland se prolongent, en apparence tout au moins, par les plis des Alleghanys et des Appalaches ; ils peuvent être regardés comme esquissant avec le flanc ouest de l'anticlinal du Spitzberg une large allure synclinoriale cachée en partie sous l'Océan. De toute

⁽¹⁾ Voir à ce sujet : A. J. EARDLEY, *History of geologic thought on the origin of the Arctic Basin*, Geology of the Arctic. University of Toronto Press, 1961.

⁽²⁾ Indépendamment de l'ouvrage déjà mentionné : " Geology of the Arctic " voir également : P. FOURMARIER, *La géologie de l'Arctique d'après quelques publications récentes. Comparaison avec l'Antarctique*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belg., 5^e sér., t. XLIX, n^o 10, 1963.

⁽³⁾ Ph. KUENEN, *Marine geology*, 1950, p. 122.

manière, il ne paraît pas possible de prolonger les chaînes plissées d'Europe jusqu'en Amérique au travers de l'Atlantique (1).

Il est sans doute plus correct en l'occurrence d'envisager une disposition symétrique des chaînes de l'est du continent nord-américain et des chaînes plissées de la Scandinavie, l'espace compris entre ces deux zones tectoniques était divisé en deux parties par une aire anticlinoriale, dont l'axe passe un peu à l'est du Spitzberg.

Rappelons encore que, selon WEGENER la disjonction entre l'Europe et l'Amérique se serait faite plus tard que celle de l'Afrique et de l'Amérique du Sud, c'est-à-dire au Tertiaire, par agrandissement progressif du sud vers le nord de la fissure originelle, prélude de la genèse de l'Atlantique.

D'autres faits géologiques s'opposent à cette manière de voir. Du côté de l'océan, les Appalaches sont bordés par du Trias marquant une transgression marine sur l'arrière pays effondré de la chaîne. Le Trias est bien représenté au Spitzberg comme sur la côte du Groenland; dans les îles Lofoten, arrière pays de la chaîne scandinave, on connaît des lambeaux de Crétacé et de jurassique préservés de l'érosion par le jeu de failles radiales.

Ces terrains mésozoïques ont été à leur tour recouverts par des dépôts tertiaires comme on peut le voir au Spitzberg.

En conséquence, les données acquises sur l'extension des mers du Mésozoïque en bordure de l'Atlantique nord sont en faveur de l'hypothèse de l'existence d'un Atlantique septentrional à une époque bien plus ancienne que le supposait WEGENER.

Comme nous l'avons signalé dans la première partie de ce rapport, des sondages sous-marins ont révélé l'existence du Crétacé inférieur sur le fond de l'Atlantique à hauteur de l'Amérique du Nord. On doit en conclure que cette partie du bassin atlantique existait réellement à cette époque. Cette constatation cadre parfaitement avec les données acquises sur la géologie de la zone côtière de l'Amérique du Nord, du Goernland, du Spitzberg et des îles Lofoten. Elle est en contradiction avec la thèse de WEGENER suivant laquelle l'Amérique du Nord ne se serait séparée de l'Europa que durant l'ère tertiaire.

En rappelant cette information, VOISEY (2) rapporte qu'un sondage foré à 120 miles au nord-ouest des Bermudes a traversé des sédiments non consolidés sur 1 Km.37, sédiments reposant directement sur le sima.

L'Atlantique nord apparaît donc comme ayant la même signification structurale que les grandes plaines de la Sibérie occidentale disposées symétriquement par rapport au grand cercle eur-africain.

c) A hauteur de la Méditerranée, on atteint la région de l'ancienne Mésogée ou Téthys; on peut y comparer les plissements récents des Antilles entre les deux

(1) Voir à ce sujet : P. FOURMARIER, *Op. cit.*, *La géologie de l'Arctique*, fig. 2.

(2) Alan H. VOISEY, *Some comments on the hypotheses of Continental Drift in Continental Drift. A symposium*, Geology Department University of Tasmania, Hobart, 1958 et 1959.

continents américains. A première vue, il paraît certainement rationnel de prendre ces deux régions à plissements récents comme représentant deux parties d'un même complexe originel, qui furent disjointes par l'ouverture de l'Atlantique, vers la fin du Mésozoïque ou le début du Cénozoïque.

Cependant J.P. ROTHÉ ⁽¹⁾ attire l'attention sur le fait que la ligne des foyers séismiques de la région méditerranéenne ne se prolonge pas à l'ouest de la crête médiane de l'Atlantique, pour se rattacher à celle des Antilles comme on serait tenté de le croire à première vue, en prenant uniquement pour base l'analogie structurale entre la zone méditerranéenne d'une part et celle des Antilles d'autre part.

Certes la forme de l'arc des Antilles est étroitement apparenté au style des ovales méditerranéens. Aussi est-on tenté d'accepter que les Antilles étaient autrefois en connexion étroite, voire en continuité directe avec l'ouest de la Méditerranée. Cependant si l'on veut bien examiner la question du point de vue géologique, la solution paraît devoir être tout autre. Par un glissement des Amériques vers l'Europe et l'Afrique, on arriverait assez facilement à mettre en contact l'arc antillais avec l'arc de Gibraltar. Remarquons cependant que l'arc des Antilles est complexe et que la chaîne des Petites Antilles, l'élément le plus jeune de l'ensemble est caractérisé par des venues volcaniques abondantes ; malgré l'apparence, elle ne se raccorde en aucune façon à la chaîne du Rif et du Sud de l'Espagne.

Il paraîtrait, d'ailleurs, tout aussi difficile d'accoler le massif ancien de l'Espagne et du Portugal à l'ensemble des formations géologiques qui, sur le continent américain, se situent au nord de la région antillaise ⁽²⁾.

Nous renvoyons aux travaux des divers auteurs qui se sont efforcés de démontrer la possibilité d'accoler les continents américain et aurafricain en admettant que l'Atlantique est de formation récente. Nous ne pouvons pas discuter ici de la valeur de ces divers essais. Nous renvoyons à un article récent publié par la Royal Society of London ⁽³⁾.

A son propos signalons simplement que l'accolement de la côte orientale de l'Amérique septentrionale à la côte nord-ouest de l'Afrique ne résiste pas à un examen quelque peu soigné de la constitution géologique de ces territoires. Il est inadmissible d'accoler des terrains anciens de l'est des États-Unis à la bordure de Jurassique et de Crétacé qui du Maroc au Sénégal entoure le massif de Paléozoïque situé vers l'intérieur du continent, en épousant parfaitement la forme massive du bloc africain.

D'un autre côté, nous ferons remarquer que, dans son essai de reconstitution de la Pangée, TUZO WILSON a mis l'Espagne en contact avec la Tunisie ;

⁽¹⁾ J.P. ROTHE, *La structure de l'Atlantique*, Annali di Geofisica, vol. IV, n° 1, 1951.

⁽²⁾ Voir à ce sujet la note suivante : N. LLOPIS LLADO, *Sur la structure hercynienne de l'Espagne et ses rapports avec la chaîne hercynienne de l'Europe occidentale*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLXII, 20 juin 1962.

⁽³⁾ Sir Edward BULLARD, J.E. EVERETT and A. Gilbert SMITH, *The fit of continents around the Atlantic in A Symposium on Continental Drift*, London, The Royal Society, 1965.

ceci implique qu'au moment de la dislocation de ce super-continent, l'Europe s'est déplacée vers l'Ouest par rapport à l'Afrique. Or la présence de l'arc hispano-rifain, parfaitement continu depuis le Jurassique, s'oppose absolument à une telle conception.

d) Dans un chapitre précédent, nous avons essayé de montrer que l'un des arguments essentiels en faveur de la dérive à l'endroit de l'Atlantique austral ne résiste pas à un examen détaillé de la stratigraphie en bordure des deux continents qu'il sépare.

La géologie structurale conduit à la même réserve.

Il est bien connu qu'en Mauritanie et Sénégal, la zone de Jurassique, de Crétacé et de Tertiaire en bordure de l'Océan repose sur un substratum de Paléozoïque fortement plissé et affecté par des charriages ; ces dislocations s'atténuent vers l'intérieur du Continent, pour passer à une structure tabulaire. C'est la disposition normale du contact d'un orogène et du massif ancien sur lequel il s'est modelé, les charriages étant poussés vers l'avant pays, c'est-à-dire vers le bouclier (1).

De l'autre côté de l'Atlantique, sur le continent sud-américain, le Paléozoïque marin couvre de larges surfaces dans le bassin de l'Amazone et dans les états de Parnaïba et de Parana au Brésil. Il est établi à l'heure actuelle que ces formations sont restées en couches horizontales ou n'ont été que très légèrement inclinées. Il en est de même dans les hauteurs situées en Argentine au Nord de Buenos Ayres ; c'est seulement au Sud de cette ville que les affleurements de Paléozoïque proches de la côte atlantique sont caractérisés par des plis à tendance de déversement vers l'est.

Il y a, du point de vue tectonique une différence notable entre la structure des mêmes formations en Amérique du Sud et en Afrique. Ce seul fait est à prendre en sérieuse considération dans l'examen du problème de la dérive des continents et spécialement de l'un de ses arguments, le plus solide en apparence : le parallélisme presque parfait entre les rivages de part et d'autre de l'Océan.

En Afrique centrale, J. DELHAL et C. FIEREMANS ont montré récemment (2) la présence d'une large bande de roches charnockitiques de direction W.S.W. — E.N.E. s'étendant de la côte atlantique à la vallée du Lualaba, soit sur une distance de 1200 kilomètres pour le moins. Vers l'ouest, au delà de l'Atlantique il ne semble pas qu'il existe l'équivalent de cette formation dans le massif ancien du Brésil, tout au moins au voisinage de l'Océan. Il est à souhaiter que des études plus approfondies puissent être entreprises à ce sujet, car ce serait un argument de haute valeur pour le problème à l'examen.

e) Si nous passons à l'extrémité sud de l'Atlantique, rappelons que l'éminent géologue sud-africain Al. DU TOIT avait imaginé l'existence d'un vaste géosyn-

(1) Voir à ce sujet : J. SOUGY, *West African Fold Belt*, Bull. Geol. Soc. of America, vol. 73, 1962.

(2) J. DELHAL et C. FIEREMANS, *Extension d'un grand complexe charnockitique en Afrique Centrale*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLIX, 18 octobre 1964.

clinal réunissant, à l'époque de Gondwana, le sud-ouest de l'Amérique méridionale, les îles Falkland, l'extrême sud de l'Afrique, l'ouest de l'Antarctique et les chaînes plissées de la bordure orientale de l'Australie ⁽¹⁾ ; il partait tout naturellement de l'idée qu'à cette époque toutes ces terres étaient rassemblées en un bloc unique, suivant la manière de voir de WEGENER (Fig. 38).

Il n'est certes pas interdit d'envisager de semblables reconstitutions, si l'on accepte *a priori* que les masses continentales ont pu se déplacer librement à la

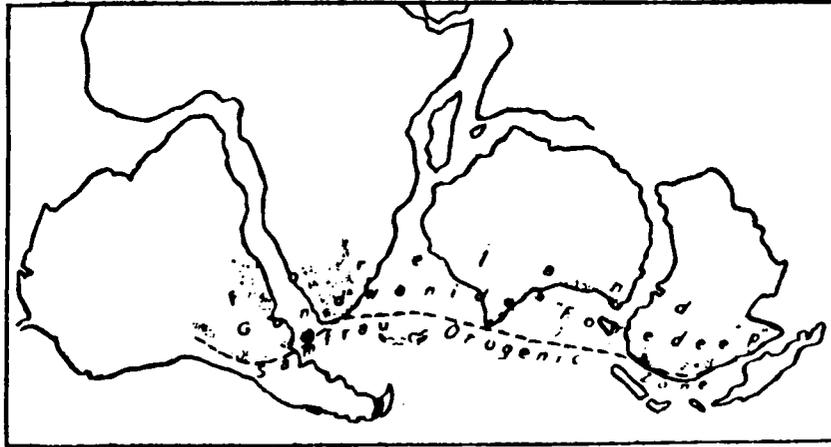


FIG. 38. — Le « Samfrau », d'après AL. DU TOIT.

surface du globe sans aucune règle logiquement ordonnée. Nous devons reconnaître que certains arguments présentés par DU TOIT sont bien faits pour frapper l'imagination.

Nous croyons bon cependant de présenter quelques remarques à propos de cette reconstitution d'un trait caractéristique de la géologie structurale de l'hémisphère sud.

La chaîne plissée d'âge jurassique de l'extrémité méridionale de l'Afrique a la direction est-ouest ; à l'est elle bute contre la côte de l'Océan Indien ; vers l'ouest, par contre, en approchant de l'Atlantique, les couches redressées de la série de Gondwana-Karoo changent brusquement de direction pour s'orienter suivant le méridien parallèlement à la côte ; elles sont bordées vers l'Océan par des terrains de plus en plus anciens dont les plis ont aussi la direction méridienne pour s'atténuer progressivement et passer au flanc nord de la grande cuvette du Karoo ; elles se prolongent ainsi parallèlement à la rivière des Éléphants jusqu'au 24^e degré de latitude sud.

Dans ces conditions, est-il raisonnable d'établir un raccord avec les îles Falkland ? Rien ne prouve d'ailleurs que, vers l'est, sous les eaux de l'Océan, la chaîne ne change pas de direction pour épouser l'allure des plis de Madagascar,

(1) Il désignait le trait structural sous le nom de Samfrau.

comme elle le fait de l'autre côté du continent, de façon à suivre l'allure des vieilles chaînes longeant la côte atlantique. Une telle conception n'est pas à rejeter car elle est en harmonie avec l'allure en cuvette des formations plus récentes dans l'extrême sud du continent africain ; elle s'accorde avec la forme même du continent et son bâti précambrien.

C'est là une raison qui peut inciter les géologues à ne pas accepter la conception de la Samfrau d'Al. DU TOIT. Nos réserves trouvent encore un appui dans les observations faites par DU TOIT sur le sens de cheminement des glaciers permo-carbonifères dans le sud de l'Afrique et, par d'autres, dans les îles Falkland. Dans le premier cas, il se fait vers le sud-ouest, dans le second vers le nord ⁽¹⁾.

Une telle divergence s'explique sans difficulté si l'on s'en tient à la disposition actuelle des masses continentales. Les îles Falkland peuvent être regardées comme étant en étroite connexion avec les structures tectoniques de l'extrémité méridionale de l'Amérique du Sud. Or, nous avons montré que, dans ce dernier territoire, à l'époque de Gondwana, le facies essentiellement continental de la zone axiale passe vers l'est, c'est-à-dire vers l'Atlantique, à un facies de plus en plus marin. Cela nous a incité à admettre comme probable la notion de permanence de cet océan. En se reportant à une carte d'ensemble on comprend aisément que la présence d'un centre de glaciation situé dans le voisinage de l'Archipel des Falkland implique forcément une tendance à un écoulement privilégié de la glace dans la direction de l'Atlantique c'est-à-dire du sud vers le nord, de même qu'en Afrique, le cheminement des glaciers de même âge se faisait dans la direction de la zone déprimée où s'étendaient l'Atlantique et l'Océan Indien. Il paraît difficile dans ces conditions d'adopter la thèse de Al. DU TOIT.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer au chapitre des glaciations, la disposition des stries glaciaires dans la région de Durban implique l'existence d'un centre de glaciation en un endroit situé actuellement en plein océan. C'est là, certes, un argument de valeur pour les partisans de la dérive. En effet, en accolant l'Afrique à l'Antarctique, ce dernier continent devient tout naturellement le lieu de prédilection pour l'établissement d'un centre de glaciation ; la présence de tillite permo-carbonifère en Antarctique vient à l'appui de cette hypothèse.

Nous devons cependant attirer l'attention sur le fait que la disparition du centre de glaciation peut tenir à des actions tectoniques. On sait que des failles ont joué à diverses époques en bordure de l'Afrique comme dans tout l'intérieur de ce continent, comme aussi le long de la côte orientale de Madagascar. On sait que la zone plissée affectant le Karroo à l'extrême sud de l'Afrique a été coupée par une faille importante passant à Port-Alfred ; cette fracture met en contact le niveau de Witteberg du côté nord avec le Crétacé et le Tertiaire du côté sud ; elle est connue entre les 24^{me} et 28^{me} méridiens où elle bute à l'Océan. Il n'est pas interdit de supposer que lors de la production de ce grand accident tectonique,

⁽¹⁾ Raymond J. ADIE, *The position of the Falkland Islands in a Reconstruction of Gondwanaland*, Geological Magazine, vol. LXXXIX, n° 6, 1952.

le massif situé au sud et qui portait le centre de glaciation soit descendu sous le niveau de l'Océan (1).

Au cours du colloque sur la géologie de l'Antarctique tenu à Cape Town en 1963, le professeur SIMPSON n'a pas manqué de signaler que les levés bathymétriques récents dans le sud-ouest de l'Océan Indien ont révélé l'existence d'une plate-forme sous-marine, la Mozambique Terrace, probablement affaissée entre fractures ; son origine continentale paraît probable. Le plateau des Agulhas figurant sur le diagramme physiographique de B.C. HEEZEN et Marie THARP a vraisemblablement la même signification. On serait là en présence de fragments affaissés du continent africain, qui auraient pu porter la masse de glace du Permo-Carbonifère s'écoulant vers l'ouest ou le sud-ouest, avant que se produisent les derniers mouvements tectoniques.

Le professeur MARTIN à l'appui de la remarque du professeur SIMPSON, ajoute que le long de la côte orientale de l'Amérique du Sud, dans le bassin du Parana les glaciers d'âge permo-carbonifère se sont avancés vers l'ouest, venant de la direction de l'Atlantique. Or, à cet endroit le fond de l'océan est caractérisé par la présence d'une plate-forme à la profondeur de 2000 à 3000 mètres actuellement affaissée, et d'où pouvaient descendre au Permo-Carbonifère les glaciers dont on trouve aujourd'hui les restes sur le continent.

Si cette plate-forme est ajoutée au continent (2), les analogies entre les côtes américaine et africaine, si frappantes dans certaines reconstitutions proposées en faveur de la dérive, sont quelque peu affaiblies.

Dans la plupart des reconstitutions d'une Pangée à l'époque du Permo-Carbonifère (Gondwana), l'extrémité sud de l'Afrique est mise en contact avec l'Antarctique de façon à en épouser la forme aussi exactement que possible. Il y a cependant là une erreur de principe. On sait en effet que les couches de Karroo de l'Afrique australe ont été plissées ; on peut même ajouter que le niveau de la tillite l'a été sous une charge constituée par une épaisseur de sédiments de l'ordre de 5000 mètres pour le moins.

Le plissement des couches du Karroo de l'Afrique Australe est caractérisé par une tendance au déversement vers le nord, ce qui explique la présence de formations plus anciennes à l'extrémité méridionale du continent. Eu égard à l'épaisseur très probable des couches du Karroo, on doit admettre qu'à l'origine, avant que se produise leur soulèvement et leur plissement, ces sédiments s'étendaient loin vers le sud. A l'action tectonique qui a donné à ces terrains leur structure actuelle, il faut vraisemblablement ajouter celle de failles qui ont fait descendre l'arrière pays de la chaîne plissée sous le niveau de l'Océan.

Cette extension notable du Karroo africain vers le sud s'accorde parfaitement avec les données acquises sur le sens d'écoulement de la glace dont il a été

(1) Antarctic Geology, page 733.

(2) Voir WARREN HAMILTON, *Antarctic Tectonics and Continental Drift*, Soc. of Econ. Paleontologists and Mineral, spec. publ. n° 10, p. 74.

question antérieurement. Tout cela paraît en corrélation étroite avec la présence d'une dépression océanique vers laquelle se dirigeait vraisemblablement aussi des glaciers venant de l'Antarctique. Il est donc illusoire de vouloir reconstituer une Pangée en mettant en contact les côtes *actuelles* de l'Afrique d'une part, de l'Antarctide d'autre part. Il faudrait auparavant reconstituer la forme de l'extrémité méridionale de l'Afrique avant que se fussent produits les plis qui ont affecté le Karroo.

Avant de passer à d'autres parties du globe, l'histoire géologique de l'Afrique nous suggère une réflexion qu'il convient peut-être de méditer lors d'une étude critique de la théorie de la dérive :

Le massif africain est bordé au nord par les chaînes atlantiques et leur prolongement vers l'est ; la formation de cette large zone plissée implique forcément un rapprochement de l'Europe et de l'Afrique quelle que soit la théorie tectogénique que l'on adopte.

A l'autre extrémité du continent s'étend la chaîne plissée où les couches du Karroo ont subi les mêmes afforts tectoniques que leur soubassement, et qui date de la fin du Jurassique. Par comparaison avec ce que nous venons de rappeler pour l'extrémité opposée de l'Afrique, il faudrait admettre une tendance à un rapprochement de ce continent et de l'Antarctide. En somme, à deux époques relativement proches l'une de l'autre, l'Afrique tout entière se serait déplacée une fois vers le sud, une autre fois vers le nord. Une telle hypothèse paraîtra certainement bien audacieuse.

f) Nous nous arrêterons encore un instant aux reconstitutions établies par AL. DU TOIT.

Dans le tracé proposé par ce regretté savant, on remarque que les chaînes plissées de l'Est de l'Australie se prolongent par celles de l'Ouest de l'Antarctique où dominent les sédiments paléozoïques et les sédiments mésozoïques. La continuité proposée entre ces deux grandes rides semble ainsi parfaitement acceptable. Par contre, une restriction s'impose lorsque l'on emboîte le rivage sud de l'Antarctique orientale dans la grande baie d'Australie. On sait, en effet que suivant une zone méridienne passant approximativement par la région centrale du continent australien, il existe une large zone où dominent les plissements calédoniens. Dans la reconstitution proposée, ces plis vont buter contre le massif oriental antarctique dont la constitution est tout autre.

On peut d'ailleurs faire la même observation à propos des plissements post-Karroo de l'extrême sud de l'Afrique. Dans la reconstitution représentée par exemple à la figure 875 de la Nouvelle Édition des Principes of Physical Geology de Arthur HOLMES ces plis vont buter contre le massif ancien de la partie nord orientale de l'Antarctique.

Ces deux observations suffisent à faire naître des doutes sur la valeur du raccord des plis de la côte orientale d'Australie avec ceux des Monts Horlick situés entre le socle ancien de l'Antarctique orientale et les plis d'âge andin ou

alpin de la partie occidentale de ce continent. Rappelons à ce propos que le mérite de la mise en évidence de cet orogène intermédiaire revient à WARREN HAMILTON ⁽¹⁾. Cet auteur y voit la confirmation des idées de A. DU TOIT sur l'existence d'un supercontinent antérieur à la dérive, dans l'hémisphère sud. Il appuie aussi son opinion, sur la similitude des granites paléozoïques du sud de l'Australie et ceux de même âge de l'Antarctique.

Il convient de signaler ici que, d'après la carte structurale de l'Antarctique dressée par le géologue russe VORONOV ⁽²⁾, le massif algonkien qui forme le bouclier de l'Antarctide est bordé sur ses côtes septentrionale et orientale par des plis calédoniens disposés parallèlement aux rivages. S'il en est bien ainsi, il est impossible d'accoler le rivage nord et nord-oriental de l'Antarctique actuelle au rivage méridional de l'Australie comme il est proposé dans certaines reconstitutions de la Pangée. Les plis les plus anciens de l'Australie occidentale comme les plis calédoniens de sa zone centrale viendraient ainsi buter à angle droit sur la bordure calédonienne de l'Australie. A première vue, cela paraît peu admissible.

Certes, il faudra attendre des observations plus précises pour donner à cette objection à l'existence de la Pangée toute sa valeur ou pour montrer si elle doit être abandonnée.

g) En ce qui concerne l'Océan Indien, nous avons montré par la paléogéographie qu'il est raisonnable de mettre en doute le déplacement de Madagascar par rapport au continent africain et aussi de l'Inde péninsulaire par rapport à l'Asie.

Nous voudrions ajouter ici quelques considérations sur la base de l'examen du diagramme physiographique de l'Océan Indien dressé par BRUCE C. HEEZEN et Marie THARP. Il est à noter tout d'abord que Madagascar ne doit pas être considérée sous sa forme et sa superficie actuelles ; elle se prolonge vers le sud par une crête étroite et longue et vers le nord par la ride à terrains anciens des Seychelles que continue le plateau de Mascarene sous les eaux de l'Océan. Il nous paraîtrait difficile dans une action de dérive, de déplacer la seule île de Madagascar sans tenir compte de ses annexes du sud et du nord.

Or, d'un côté comme de l'autre, le massif de Madagascar avec ses prolongements va buter contre la zone océanique profonde dont l'axe est marqué par la présence de la crête médiane de l'Océan Indien en connexion étroite avec la ride médiane de l'Atlantique dont elle est le prolongement, qui contourne ainsi l'extrémité sud de l'Afrique pour se prolonger vers le nord jusqu'au Golfe d'Aden.

Si nous admettons la thèse de la grande ancienneté du réseau des crêtes médianes, nous ne pouvons plus accepter que Madagascar ait dérivé par rapport à l'Afrique.

⁽¹⁾ WARREN, Hamilton, *Antarctic Tectonics and continental Drift* in *Polar wandering and continental Drift*, edited by Arthur C. Munyan, Soc. of Economic paleontologists and mineralogists, Spec. paer, n° 10, 1963.

Voir aussi du même auteur. *Tectonic map of Antarctica. A progress report* in *Antarctic Geology*, 1964.

⁽²⁾ P.S. VORONOV, *Tectonics and neotectonics of Antarctica* in *Antarctic Geology*, Proc. of the first intern. Sympos. on Antarctic Geology, Cape Town, 1963.

Il est peut-être intéressant de rappeler ici les résultats des études du professeur PICHAMUTHU ⁽¹⁾ : les roches les plus anciennes du massif précambrien de l'Inde péninsulaire se trouvent dans l'État de Mysore ; on peut y voir l'équivalent, de l'autre côté de la crête médiane, des terrains précambriens de l'Archipel des Seychelle se reliant eux-mêmes aux formations de même âge de l'est de Madagascar. Il y aurait ainsi, de part et d'autre de la fosse profonde de l'Océan Indien, une continuité entre le massif africain et la partie méridionale de l'Asie, confirmant l'ancienneté de l'Océan Indien dans sa disposition générale actuelle.

Au sujet des relations entre l'Inde et Madagascar, des renseignements précieux nous ont été communiqués par M. BESAIRIE dont l'intervention a déjà été citée antérieurement. Le distingué directeur du Service géologique de la République Malgache écrit notamment :

« Le socle cristallin de l'Inde péninsulaire présente de remarquables analogies avec le nôtre surtout en ce qui concerne le Dharwar, ses charnockites, khondalites, gondites qui se retrouvent dans notre système du Graphite. L'abondance de la monazite au Travancore trouve son équivalent à Fort-Dauphin. Dharwar et Graphite participent à la même orogénèse voisines de 2400 millions d'années ».

M. BESAIRIE ajoute :

« On ne trouve pas en Inde, les couches à graphite économique qui forment un gros faisceau au Sud de Tamatave.

» Il faut noter encore des analogies pétrographiques et minéralogiques avec Ceylan. Le graphite cristallin filonien type Ceylan ne se trouve à Madagascar que dans l'extrême Sud (Ampassihy). Les pyroxénites à phlogopite, qui sont des roches bien particulières, sont localisées dans l'extrême Sud de Madagascar et se retrouvent à Ceylan. Il en est de même de la thorianite, minéral rare ».

Pour ce qui concerne la partie tectonique, M. BESAIRIE note que, dans un essai de juxtaposition Madagascar-Inde les directions générales sont en concordance. Notre savant collègue, sur la base des faits rapportés ci-avant, conclut :

« En ce qui me concerne, je ne puis prendre parti mais en attendant une étude plus complète des raccords, je suis séduit par le point singulier Travancore, Fort-Dauphin-Ceylan avec ses minéralisations bien particulières dans un complexe pétrographique assez spécial. »

Ces considérations de M. BESAIRIE ne peuvent, semble-t-il, venir à l'encontre de la thèse de la fixité relative des masses continentales. On connaît d'autres exemples de distribution de facies symétriquement ordonnée par exemple de part et d'autre de l'Atlantique sud.

Rappelons à ce propos que nous avons mentionné antérieurement la note de MM. DELHAL et FIEREMANS sur l'extension d'un grand complexe charnockitique en Afrique centrale (voir page 247). Faut-il admettre une liaison directe entre ce

⁽¹⁾ P.S. PICHAMUTHU, *Some observations on the structure, metamorphism and geological evolution of Peninsular India*, Journ. of the Geological Society of India, vol. 3, 1962.

complexe orienté de l'ouest à l'est et les roches analogues de Madagascar et de l'Inde péninsulaire ?

On voit mal quels sont les déplacements relatifs à faire subir à Madagascar et à l'Inde pour réaliser une connexion étroite entre tous ces gisements.

D'ailleurs, dans un article publié à l'occasion du symposium de Tasmanie sur le problème de la Dérive des Continents, le professeur A.H. VOISEY ⁽¹⁾ met en garde contre les déductions parfois hâtives que l'on peut tirer de similitudes singulières dans la composition lithologique d'importantes séries stratigraphiques. Il cite à ce sujet de curieux exemples pris dans des parties du monde qu'il ne pourrait être question de juxtaposer primitivement pour les séparer ensuite par une action de dérive ; tel est le cas entre la côte orientale de l'Australie et la côte est de l'Amérique du Nord pour ne citer que cet exemple.

Les données qui précèdent montrent combien est délicate la question des relations entre l'Inde et Madagascar. On peut certes y trouver des arguments en faveur d'une action de dérive ; d'autre part il faut tenir compte de la grande extension dans le sens du méridien de Madagascar si l'on accepte d'y rattacher d'un côté le massif sialique des Seychelles avec son prolongement vers le nord constitué par le plateau sous-marin des Mascareignes et de l'autre côté la crête sous-marine désignée sur la carte de B.C. HEEZEN et Marie THARP sous le nom de « Madagascar Ridge » et dont l'extrémité méridionale atteint 40° latitude sud.

D'autre part, en nous reportant à la même carte, nous voyons qu'à hauteur de l'équateur cette longue crête, en partie sous-marine, est interrompue par la plaine abyssale bordant la ride médiane de l'Océan Indien. Il y a là un obstacle à un raccord direct des terrains anciens de Madagascar à ceux de l'Inde péninsulaire. Pour ce faire, il faudrait admettre un âge relativement récent pour les rides océaniques médianes ce qui nous paraît peu probable, comme nous nous efforcerons de l'établir au chapitre suivant.

h) Les observations sur la géologie de Madagascar ⁽²⁾ et les recherches sur la constitution du fond de l'Océan Indien ⁽³⁾ nous conduisent à une remarque de quelque intérêt dans l'examen critique du problème de la dérive.

Les auteurs des essais sur la reconstitution d'une Pangée à la fin du Paléozoïque ont été obligés de déplacer l'île de Madagascar pour l'accoler au continent africain. Quand on examine les cartes matérialisant ces essais on est frappé de voir que la côte africaine comme celle de Madagascar sont identiques aux tracés actuels. Il est évident que l'on peut trouver des similitudes entre certaines irrégularités de la côte du continent et celles de l'île de Madagascar. Par exemple,

⁽¹⁾ Allan H. VOISEY, *Some comments on the hypothesis of Continental Drift in Continental Drift. A Symposium*, Depart. Geology Univ. Tasmania Hobbart, 1958, reprinted 1959, p. 162.

⁽²⁾ H. BESAIRIE, *Carte géologique de Madagascar mise à jour au 1^{er} janvier 1965*, Tananarive, 1966.

H. BESAIRIE, *Carte tectonique de Madagascar*, Tananarive 1964.

⁽³⁾ BRUCE C. HEEZEN and MARIE THARP, *Physiographic diagram of the Indian Ocean*, Lamont Geological Observatory. Columbia University, New-York, published by the Geological Society of America, 1965.

le changement de direction à l'endroit du Cap St André peut s'emboîter aisément dans la baie de Beira.

Cependant il y a lieu de présenter ici une remarque d'importance : La côte occidentale de Madagascar est d'âge récent ; sa forme résulte indiscutablement de déformations qui se sont produites depuis le Crétacé pour le moins et qui consistent en un large bombement longitudinal complété par un bombement transversal Nord Ouest-Sud Est, passant approximativement par le Cap St André, déformations qui se sont accentuées peu à peu jusque au Tertiaire.

La côte occidentale de l'île, fortement influencée par ces déformations est ainsi relativement jeune et ne répond nullement à la situation qui existait à la fin du Paléozoïque ou au début du Mésozoïque.

D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que le massif sialique de Madagascar se prolonge loin sous les eaux de l'océan par le plateau des Seychelles et des Mascareignes. En faisant rétrograder Madagascar vers l'Ouest pour l'accoler au continent africain, il faut, déplaçant l'île, déplacer aussi son prolongement nord de même que la crête qui forme l'extension sous-marine vers le sud.

La reconstitution de la Pangée dans ces conditions apparaît alors bien plus délicate à réaliser.

i) Dans un article paru tout récemment, le professeur A. GANSSER, de Zürich envisage les relations entre l'Océan Indien et l'Himalaya ⁽¹⁾. L'orogénèse de cette grande chaîne asiatique commença au cours du Crétacé moyen et supérieur comme la chaîne alpine. Cette époque de grande révolution géologique mondiale, est marquée par un approfondissement des océans. C'est alors aussi que commença la dérive vers le nord de la partie centrale de l'Océan Indien en même temps que du bouclier Indien. D'après GANSSER, les grands charriages de l'Himalaya, poussés vers le Sud, sont la conséquence de la dérive vers le nord du bouclier Indien ; il fait remarquer à ce propos que ces grands charriages sont propres à l'Himalaya et qu'ils font défaut dans les chaînes asiatiques qui le prolongent de part et d'autre. Le déplacement du massif en mouvement vers le nord (bouclier indien et partie de l'Océan Indien) aurait été rendu plus aisé par les fractures de direction sub-méridienne qui ont été reconnues dans l'Océan Indien et qui sont clairement indiquées sur le diagramme physiographique de B.C. HEEZEN et Marie THARP.

Il y a là des faits troublants ; l'examen des cartes jointes au travail du professeur GANSSER porte à réfléchir. Cependant nous hésiterions à y trouver une preuve évidente en faveur de la thèse de la dérive telle que la concevait WEGENER. Il y a des relations si étroites entre le réseau de fractures couvrant le fond de l'Océan Indien et celui qui s'étend sur l'Afrique qu'il nous paraît abusif de vouloir attribuer à une partie de ce vaste champ un rôle particulièrement efficace dans l'hypothèse du déplacement des masses continentales.

(1) AUGUSTO GANSSER. *The Indian Ocean and the Himalayas*, A Geological Interpretation *Eclogae Geologicae Helveticae*, vol. 59, n° 2, 1966, page 831.

La thèse du professeur GANSSER est, d'ailleurs, en opposition avec le principe même de la théorie de WEGENER. Suivant celle-ci, les blocs sialiques des continents se sont déplacés en glissant sur le sima qui forme le fond des océans. Or, les tracés du professeur GANSSER indiquent clairement un déplacement du fond océanique y compris sa ride médiane en même temps que le bouclier indien s'avavançait vers le nord.

Ajoutons encore que l'auteur de cet important travail estime que l'analyse tectonique de l'Himalaya conduit à une contraction de l'ordre de 500 kilomètres. Cette estimation est bien inférieure au glissement de 80 degrés de latitude de l'Inde péninsulaire évalué d'après les mesures paléomagnétiques.

A notre avis les faits rapportés par GANSSER sont plus conformes à l'évolution de la croûte terrestre suivant les processus géologiques normaux, en rapport avec le développement des grands champs de fractures radiales et les zones de plissement.

j) Dans la première partie de ce rapport, à propos de l'extension du réseau de fractures radiales à toute la surface de la Terre, nous avons mentionné un article de M. Émile ROD paru récemment (1966) dans les *Eclogae Geologicae Helvetiae*. Son auteur établit que la plate-forme australienne se compose en réalité d'une série de blocs juxtaposés, en contact suivant des failles de décrochement (Strike-slip faults).

A part quelques exceptions les déplacements le long des fractures (aujourd'hui sutures) affectant la plate-forme australienne sont antérieurs à la fin de la période paléozoïque.

Des faits relatés, l'auteur arrive à la conclusion suivante : " From a tentative reconstruction of the Paleozoic Australian Continent, the geologist passes thus naturally to a consideration of continental drift and cannot avoid the problem of Gondwanaland ".

Les arguments que nous avons fait valoir précédemment contre la théorie de WEGENER nous paraissent s'appliquer intégralement ici. Les failles radiales existent en tous points de la surface du globe et il serait bien étrange que l'Australie en fut dépourvue ; d'autre part M. ROD admet que leurs effets ont cessé durant le Paléozoïque alors que la dérive wegenérienne est considérée comme d'âge mésozoïque (Jurassique dans l'Océan Indien).

Il est à craindre en l'occurrence qu'il y ait mésentente sur la signification du mot « dérive ». Tout accident géologique qui déplace un fragment de la croûte par rapport à son voisin se marque par une non coïncidence de l'emplacement des pôles relevé par l'analyse paléomagnétique des roches situées de part et d'autre de cet accident ; il ne peut être cependant question de dérive au sens de WEGENER avec dislocation d'une Pangée.

k) Avant de conclure, nous voudrions encore dire quelques mots à propos de l'arc insulaire de la Nouvelle Zélande.

Dans beaucoup de reconstitutions d'une Pangée au début du Mésozoïque, cet arc n'est pas indiqué. Sans doute les auteurs de ces essais ont-ils estimé qu'il

s'agit là d'un tectogène plus jeune et qu'il n'y a pas lieu de le prendre en considération. Cependant, il est bien connu aujourd'hui qu'en Australie et dans les territoires dont l'ensemble correspond à l'Océanie, les tectogènes se sont édifiés progressivement de l'ouest vers l'est, se modelant en quelque sorte les uns sur les autres. Il y a là un vaste bloc de la croûte terrestre bordé vers le Pacifique par la ligne andésitique, bloc que l'on doit toujours considérer dans son entièreté. Il serait utile de ne pas l'oublier lorsqu'on essaie de reconstituer les stades successifs de la paléogéographie de cette partie de l'hémisphère austral.

Comme conclusion toute provisoire à ce chapitre, on pourrait dire qu'il y a de grandes probabilités en faveur :

a) de la permanence des aires centrales des massifs continentaux, distribués de façon harmonieuse à la surface de la Terre, notamment par rapport au continent africain ;

β) de la permanence de l'Océan Pacifique avec sa ceinture de déformations se succédant systématiquement au départ des massifs continentaux qui l'encadrent ;

γ) de la permanence de la Téthys, vaste mer épicontinentale séparant depuis leur origine, les grands massifs du nord dont l'ensemble constitue la Laurasia et les continents de l'hémisphère sud qui sont les Terres de Gondwana.

L'évolution géologique du globe paraît bien s'être faite autour de ces deux grandes unités : la Téthys et le Pacifique (3).

Dans la structure actuelle de la croûte terrestre, il faut voir l'effet toujours renouvelé des contraintes qui, depuis la solidification de la croûte terrestre dans son entièreté, y ont fait naître les chaînes plissées de même que les failles radiales et les décrochements horizontaux dont l'importance nous apparaît aujourd'hui de plus en plus grande.

F. ESSAIS SUR LA BASE DE LA GÉOCHRONOLOGIE.

Un moyen supplémentaire de contrôle de la réalité éventuelle de la dérive continentale a été proposé récemment. Il a pour base les données de la géochronologie des terrains cristallins en Afrique occidentale et dans le nord du Brésil. Les résultats en ont été publiés dans un rapport préliminaire du " Department of Geology and Geophysics Massachusetts Institute of Technology " (1^{er} décembre 1966). Sur la carte jointe à ce rapport (reproduite figure 39 de la présente étude) on a représenté par des signes différents les zones dont l'âge est de 600 ± 200 M.A., de 1000 ± 200 M.A., de 2000 ± 300 M.A., et de 2700 ± 300 M.A. ; la direction moyenne des zones structurales y a été figurée.

(3) On relira avec plaisir les pages écrites par Pierre TERMIER sur la Dérive des Continents, en 1924, publiées au Bulletin de l'Institut Océanographique, et dans la Revue Scientifique, reproduites en 1929 dans l'ouvrage : *La Joie de Connaître*, Bibl. Franç. de Philosophie, Nouvelle Librairie Nationale, Paris.

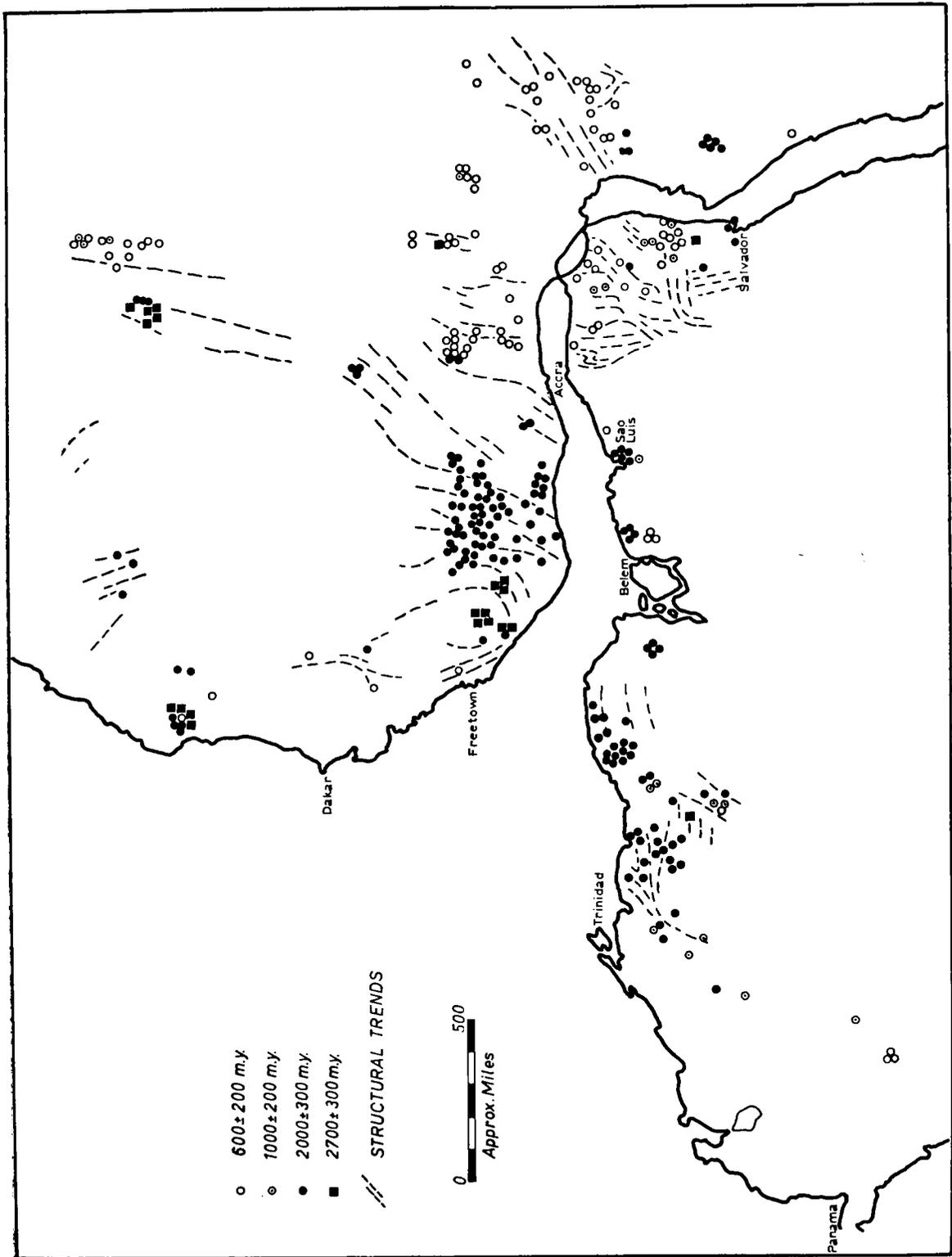


Fig. 39. -- Relations possibles entre l'Afrique et l'Amérique du Sud sur la base de la géochronologie dans l'hypothèse de la dérive continentale. (Figure reproduite avec l'autorisation des auteurs).

Il n'est pas douteux qu'en mettant en contact l'Amérique méridionale et l'Afrique, conformément aux vues de WEGENER, on constate une continuité remarquable des zones de même âge d'un continent à l'autre. Nous croyons bon de faire remarquer cependant que si l'on reporte ces indications géochronologiques sur les deux continents *dans leur position respective actuelle*, on peut trouver une explication différente en harmonie avec la répartition des grandes unités structurales de ces deux continents.

Nous nous plaisons à signaler l'intérêt de cette méthode de recherche qui peut conduire à des résultats positifs. Le travail a été exécuté, comme il est dit ci-dessus par le département de Géologie et de Géophysique du Massachusetts Institute of Technology en étroite collaboration avec les géologues et géophysiciens de l'Université de Sao Paulo (Brésil).

CHAPITRE VIII

LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS DE L'ÉTUDE DES CRÊTES MÉDIANES DES OCÉANS

Dans la première partie du rapport, nous avons défini le comportement des crêtes médianes océaniques, dont l'intérêt n'est pas négligeable pour le but que nous poursuivons.

Nous croyons devoir insister sur un fait capital : il s'agit d'un réseau systématiquement ordonné, dont la partie la plus caractéristique est la ride atlantique se prolongeant dans l'Océan Indien après avoir contourné l'extrémité méridionale de l'Afrique, en s'adaptant en quelque sorte et de façon parfaite à la forme de cette partie de continent.

CAREY écrit à ce sujet ⁽¹⁾ :

“ Where a continent is surrounded on nearly all sides by rift oceans (e.g. Africa) the median ridges of the surrounding oceans and seas reproduce all the gross features of its outline. This has tempted some students of continental drift to regard the mid-oceanic ridge as the cicatrix from which the two continents drifted apart. But this cannot be, because the surrounding ridge is necessarily always much more expanded in all its segments than the bordering continent. Also the ridge shape is more nearly circular than is the continent shape, which is the inevitable result of adding all round to any figure. These features are shown with respect to Africa in fig. 4 but are found to be generally true for all the continents ”.

Une telle disposition laisse à penser que la dite ride s'est édifiée sur toute sa longueur au cours d'un même épisode de l'histoire géologique du Globe.

En nous basant sur les études du professeur B.B. BROCK, dont nous avons rappelé les résultats essentiels antérieurement (voir page 103), nous avons dû reconnaître que l'Afrique occupe une position centrale remarquable par rapport aux autres continents. Il y a chance que ce soit là une disposition très ancienne ; la même conclusion s'impose pour la ride océanique médiane de l'Atlantique et de l'Océan Indien qui l'encadre de façon si parfaite. Aussi pourrait-on prétendre que la présence des rides médianes est plutôt en contradiction avec l'hypothèse de la dérive.

⁽¹⁾ S. WARREN CAREY, *The tectonic approach to continental drift in Continental Drift. A symposium Hobbart, Geol. Departm. Univ. of Tasmania, 1958.*

Certes, comme nous l'avons rapporté, MÉNARD a écrit qu'une ride de cette nature peut avoir achevé son évolution plus rapidement dans certaines de ses parties que dans d'autres. On comprend qu'il en soit ainsi même si dans son ensemble le réseau des rides océaniques médianes a son origine très loin dans le passé.

Si l'on arrivait à *prouver* la grande ancienneté du réseau des rides médianes, on aurait certainement un argument de poids contre la théorie de la Dérive des Continents.

Une autre particularité doit retenir notre attention : Le réseau des rides médianes est essentiellement propre au domaine océanique profond à fond basaltique et ne doit en aucune façon être confondu avec les orogènes des continents comme on l'a parfois supposé (GRUSSOV page 78) ; les rides océaniques en diffèrent par leur forme et par la nature des matériaux dont elles sont faites.

Cette observation vient renforcer la précédente pour nous inciter à accepter la grande ancienneté de ce réseau si particulier. Nous croyons bien faire en reproduisant ici un extrait de la note publiée en 1958 par H.W. MÉNARD ⁽¹⁾ :

“ *Continental Drift*. Evidence in support of continental drift is derived from the similar shapes of the Mid-Atlantic Ridge and the adjacent shores of Africa and South America. This evidence can be dismissed as not pertinent to the hypothesis because both Africa and South America are almost circled by rises that are roughly parallel to the shore lines. If the Mid-Atlantic and Mid-Indian ridges are fragments left by the drift of South America and Australia, respectively, what are the rise and ridge structures of the Pacific ? If the continents have only begun to drift in Early Tertiary time, how did the Cretaceous rise of the Mid-Pacific Mountains become centered relative to the present margins of the Pacific ”.

Cette remarque de MENARD est à prendre en sérieuse considération.

En tenant compte de ces divers caractères des rides médianes océaniques, on est amené à se demander jusqu'à quel point on peut accepter la reconstitution d'un supercontinent de Gondwana telle que la représentent certains auteurs, notamment LESTER KING et T.W. DOWNARD ⁽²⁾. (voir fig. 31).

La carte établie par ces auteurs porte en légende : “ Fig. 1. Reconstruction of Gondwanaland, sited during the Carboniferous Period and including the suboceanic ridge between the continents ”.

Le réseau des rides médianes ainsi figuré ne répond pas à la situation actuelle de ces crêtes ; il s'agit donc bien d'un réseau supposé avoir existé au moment où le supercontinent ne s'était pas encore fragmenté. Or nous venons de rappeler que le réseau des rides océaniques médianes est propre uniquement au domaine océanique profond ; les rides disparaissent dès qu'elles arrivent à proximité d'une

⁽¹⁾ H.W. MENARD, *Development of median elevations in Ocean Basins*, Bull. Geol. Soc. of America, vol. 69, n° 9, septembre 1958, p. 1179.

⁽²⁾ LESTER KING and T.W. DOWNARD, *Importance of Antarctica in the Hypothesis of Continental Drift in Antarctic Geology*, Proc. of the first intern. symposium on Antarctic Geology held in Cape Town, 16-21 sept. 1963. North Holland Publishing Company.

masse continentale. Il paraît étonnant, dans ces conditions, que l'on puisse admettre leur présence entre des fragments de continents à peine séparés par d'étroits chenaux marins.

Certes, on peut répondre à cette objection que le fond de la Mer Rouge est marqué par une crête faite de roches basiques suivant l'allure générale de cet étroit chenal situé entre l'Afrique et le môle arabe.

Il n'est pas interdit de voir dans cette structure du fond de la mer Rouge le prolongement de la crête médiane de l'Océan Indien. Il n'empêche que des rides médianes sont disposées autour de l'Afrique de façon bien plus systématique que ne le laisse supposer le tracé de LESTER KING et DOWNARD.

Il n'est pas inutile de rapporter ici ce que MENARD écrit en résumé dans l'ouvrage consacré par la Royal Society of London au problème de la Dérive des Continents, paru en 1965 et dont il a déjà été fait mention antérieurement.

L'auteur y confirme la disposition du réseau de crêtes océaniques qui, sur près de la moitié de sa longueur, suit la ligne axiale des bassins océaniques et qui, d'autre part, est disposé en cercles autour des grands boucliers caractéristiques des masses continentales. Il appuie d'autre part sur l'importance du flux de chaleur s'échappant suivant ces lignes médianes et sur l'extraordinaire masse de matière basaltique qui vient au jour suivant ces rides. Enfin d'après MENARD des failles normales longitudinales et des "Wrench faults" transversales sont caractéristiques du système (fig. 40 et 40 bis).

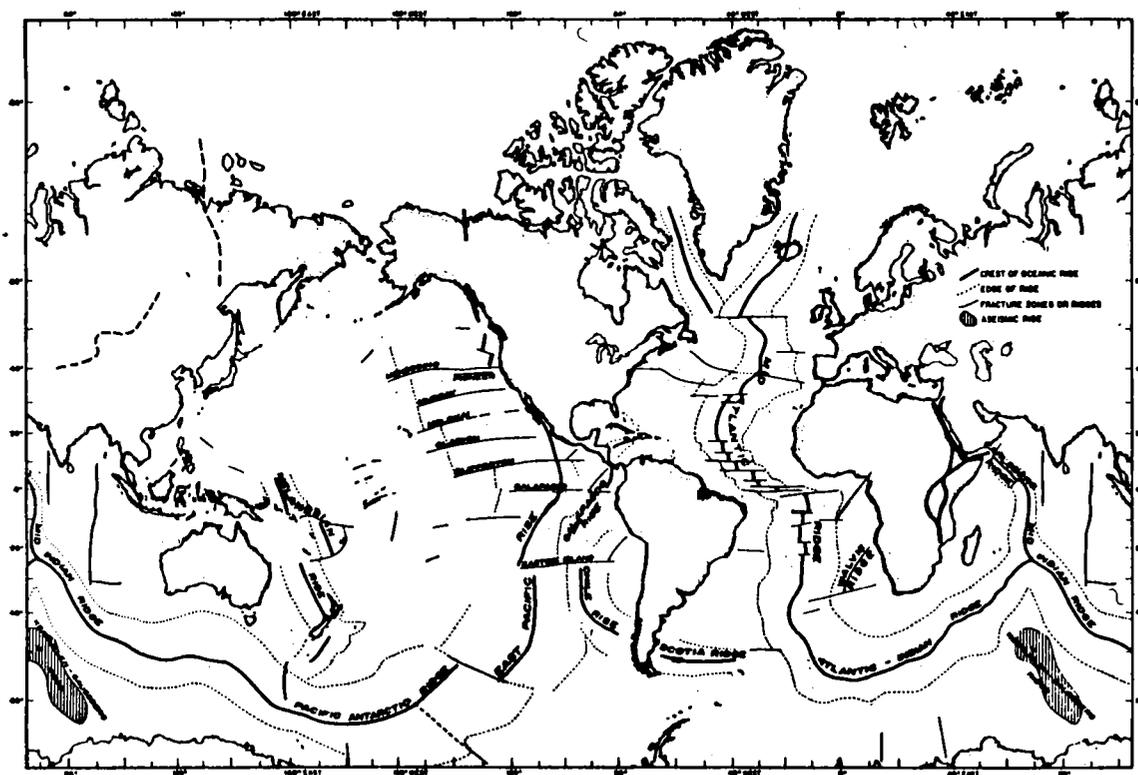


FIG. 40. — Les crêtes médianes et les failles qui les déplacent, d'après MENARD.

Ces données telles que nous venons de les rappeler ne pourraient pas à elles seules apporter la solution au problème de la Dérive des Continents. On voudra bien reconnaître cependant qu'elles paraissent bien être en faveur de l'opinion d'une grande ancienneté des rides océaniques médianes. Entourant les vastes boucliers des masses continentales et cantonnées sur la majeure partie de leur longueur à l'endroit des lignes axiales des océans, elles apparaissent comme un trait très ancien de la face du Globe au même titre que les boucliers dont elles suivent sensiblement la forme.

Il faut insister sur le fait qu'elles sont partout déplacées par des failles de décrochement ; celles-ci leur sont donc postérieures ; or la naissance de ces failles, pour certaines tout au moins, remonte loin dans le passé ; ceci vient encore appuyer l'idée de la grande ancienneté de tout le réseau. Est-il admissible, dans ce cas, de l'interrompre localement, à une époque récente, pour permettre une dérive des continents ?

Nous avons, en effet, attiré l'attention sur le grand intérêt que présente le vaste réseau de décrochements horizontaux couvrant le domaine océanique comme l'étendue des masses continentales.

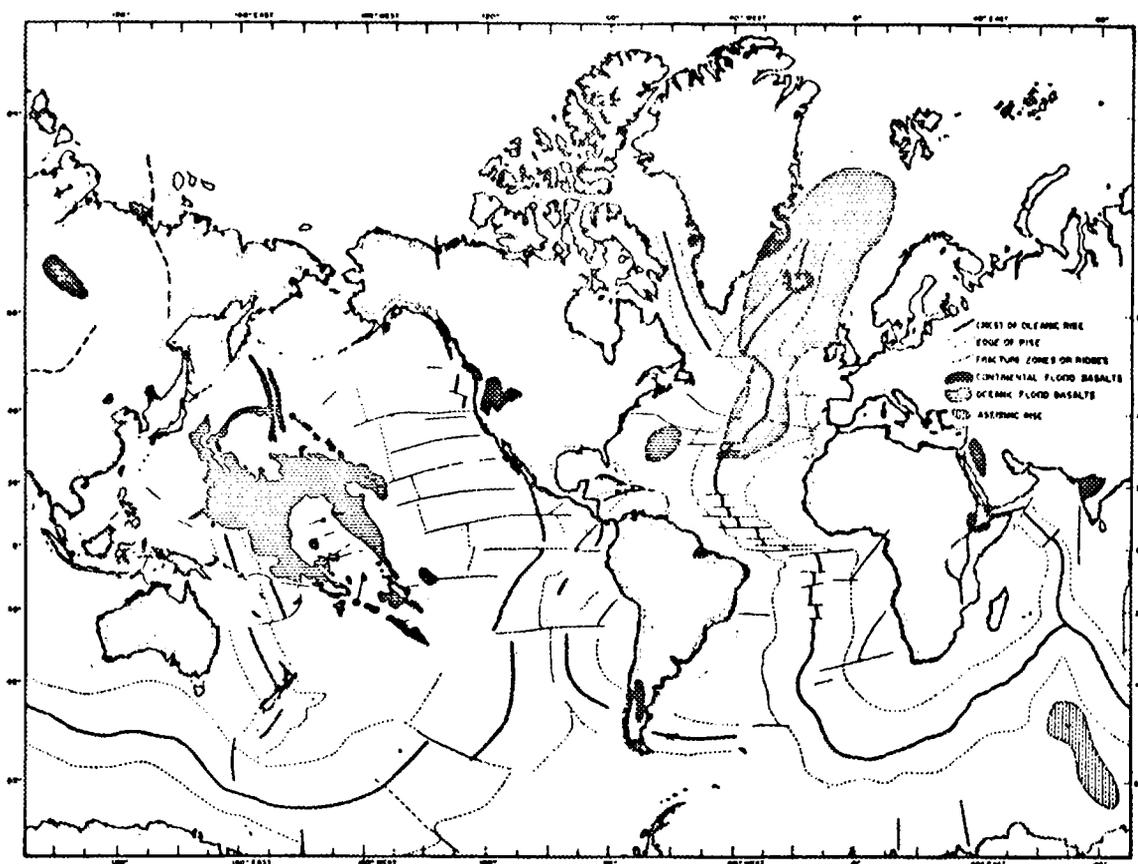


FIG. 40bis. — Les crêtes médianes et les venues basaltiques sur les fonds océaniques, d'après MÉNARD.

(Les figures 40 et 40bis ont été reproduites avec l'autorisation de l'éditeur).

D'après les estimations du rejet suivant ces fractures tant dans l'Atlantique que dans le Pacifique, d'après la connexion probable entre certains de ces accidents affectant ces deux fonds océaniques, on peut penser que leur action s'est manifestée à peu près en même temps de part et d'autre et pendant des durées équivalentes ; sur la base des observations de Crowell relatives à la faille de San Andreas (Californie) on peut croire à la grande ancienneté, de l'apparition de ces grands décrochements et aussi à leur accentuation progressive au cours des temps. Dans ces conditions, est-il exagéré de prétendre que les rides océaniques qu'ils déplacent sont au moins aussi anciennes et correspondent à un trait tout aussi permanent de la surface du Globe ?

Nous avons rapporté que certains de ces décrochements sont bien connus sur le fond de l'Atlantique, notamment à hauteur du Golfe de Guinée ; certains d'entre eux paraissent se prolonger en territoire africain. N'y a-t-il pas là un argument contre la théorie de la Dérive au sens wegenérien du terme ? Si la crête atlantique existait déjà au Crétacé le fond basaltique de cet océan devait exister à la même époque, ce qui vient à l'appui de la thèse de la permanence s'opposant au mobilisme.

On peut prétendre évidemment que le déplacement de la crête médiane de l'Atlantique par les failles de décrochement n'atteint pas une ampleur telle qu'il soit nécessaire d'en reporter l'origine avant le Crétacé, de façon à garder intacte l'hypothèse de WEGENER. A cette observation, on objectera que le Pacifique est, de toute manière, un trait très vieux de la surface du globe et qu'il serait vraiment anormal d'admettre un âge mésozoïque pour l'apparition de sa ride médiane. Or celle-ci n'est qu'un élément du vaste réseau qui couvre toute la surface de la Terre en suivant à peu près les axes de symétrie des océans profonds. Il y a là certainement un argument en faveur de la thèse de la Permanence.

Sur une carte du Monde, (fig. 6, 40, 40^{bis}), la distribution des crêtes médianes des océans donne l'impression d'un arrangement systématique par rapport à la forme et à la distribution actuelles des masses continentales. Si l'on est porté à croire à l'ancienneté de la ride médiane de l'Atlantique, on est tout naturellement enclin à en faire autant pour la ride de l'Océan Indien et pour son raccord avec celle du Pacifique.

Or dans l'hypothèse de l'existence d'une Pangée au Permo-Carbonifère et au Trias, l'Atlantique n'existait pas et l'Océan Indien n'avait ni sa forme ni son étendue actuelles ; il y a donc là deux opinions contradictoires en présence. Les données que nous venons de rappeler pour l'Atlantique sud avec sa crête médiane déplacée par les décrochements horizontaux viennent plutôt à l'appui de la notion de la permanence de cet océan, avec comme corollaire une conclusion analogue pour l'Océan Indien.

Pour ce qui concerne ce dernier, reportons-nous encore une fois au diagramme physiographique de B.C. HEEZEN et Marie THARP. Ces auteurs tracent la branche nord de la ride médiane jusqu'au golfe d'Aden et l'infléchissent ensuite pour la

raccorder à la dépression axiale à fond basaltique de la Mer Rouge. Nous avons fait observer antérieurement que la grande zone de dislocations transeuropéenne est en étroite connexion avec les failles d'effondrement de la Mer Rouge. Or cette zone de fracturation paraît être d'origine fort ancienne car certains de ses éléments ont joué au cours du Paléozoïque pour le moins. Sans vouloir être affirmatif à ce sujet, nous pensons que l'on pourrait trouver là un argument en faveur de l'ancienneté du grand réseau des crêtes médianes océaniques.

Cet argument paraîtra sans doute d'importance secondaire vis-à-vis de celui que nous avons proposé au dernier chapitre de la première partie en faveur de l'ancienneté du réseau des rides médianes.

Le fait signalé antérieurement, à savoir la relation entre la forme en Y renversé de cette crête médiane, et la présence du plateau des Kerguelen, étroitement uni à la partie orientale de l'Antarctique, peut aussi appuyer dans une certaine mesure cette conception de l'ancienneté du réseau des rides médianes.

Pour ce qui concerne l'Océan Indien, peut-être pourrait-on faire état d'un autre argument en faveur de cette manière de voir. Les levés du fond de cet océan réalisés par B.C. HEEZEN et Marie THARP laissent apparaître une série de failles déplaçant la ride médiane. La plupart de ces fractures sont de direction subméri-dienne ; il y a là une différence marquée avec l'Atlantique où la grande majorité des décrochements affectant la ride médiane sont généralement de direction proche du parallèle. Nous n'avons pas à rechercher ici la cause de cette différence ; elle devra retenir l'attention de ceux qui voudront pousser plus loin l'étude de l'évolution de la croûte terrestre.

Ce qui nous importe ici c'est la direction moyenne de ces accidents, lesquels s'apparentent aux grandes cassures limitant les fossés d'effondrement sur le continent africain. Or, nous savons que ces failles affectent les dépôts du Karroo, mais nous avons montré aussi dans un travail déjà ancien, l'existence d'une relation étroite entre le sens des variations de facies du système du Karroo et l'orientation des failles principales affectant la région ⁽¹⁾. Nous en avons tiré la conclusion que des dislocations de cette nature et de cette orientation se sont marquées pendant la sédimentation même du Permo-Carbonifère soit sous forme de véritables fractures, soit sous forme de simples flexures. On peut néanmoins en déduire que, selon toute probabilité, ce réseau des failles était actif avant la fin de l'ère primaire et peut-être bien longtemps auparavant.

Les failles qui découpent le fond de l'Océan Indien et qui affectent sa ride médiane sont apparentées aux accidents tectoniques de même nature du continent africain. On peut supposer qu'elles sont de même âge et qu'elles ont été en action à peu près aux mêmes époques. Dans ces conditions, la ride médiane qu'elles déplacent doit remonter pour le moins à l'époque du Paléozoïque, si elle ne lui est pas antérieure.

⁽¹⁾ P. FOURMARIER, *Le bassin charbonnier d'âge permo-triasique de la Lukuga*, Ann. Soc. Géol. Belgique, Publ. spec. Congo belge, t. XLII, 1913-1914 (voir p. 222).

Nous désirons présenter un argument supplémentaire à l'appui de la grande ancienneté des rides médianes des océans.

Au chapitre V de la première partie de ce mémoire, nous avons rappelé à l'attention du lecteur la forme en S si remarquable des lignes axiales des grandes unités structurales de la surface du globe ; elle se voit avec une netteté singulière suivant l'axe du Pacifique, dans l'ensemble des deux Amériques et dans l'Océan Atlantique ; on la trouve aussi dans l'axe de symétrie eurafricain, comme dans la disposition relative des massifs anciens de l'Asie et de l'Australie. Nous avons rapporté l'hypothèse émise à ce propos : cette particularité structurale remonterait à l'origine même de la croûte terrestre peut-être au moment de la différenciation des blocs de sial.

Si l'on se rallie à cette thèse, les crêtes médianes des océans, ont pris naissance peu de temps après la solidification de la croûte, en relation avec des déchireures qui se sont faites là où cette croûte solide avait chance d'être la plus mince c'est-à-dire suivant la ligne axiale des grands fonds océaniques.

Nous n'avons pas manqué d'attirer spécialement l'attention sur le fait que les crêtes médianes océaniques sont déplacées par des fractures radiales dont la direction est connue grâce aux observations océanographiques. Sans doute, elles sont probablement bien plus nombreuses qu'il n'est figuré sur les cartes océanographiques (voir figures 40 et 40^{bis}). Il n'empêche que ces cartes en figurent un bien plus grand nombre dans la partie médiane de la courbe dessinée par ces crêtes, c'est-à-dire là où se produit un changement brusque dans leur orientation, en relation avec la torsion invoquée pour expliquer la forme en S des axes principaux de l'arrangement structural de la croûte terrestre.

On peut supposer avec quelque raison que ce mouvement de torsion a facilité la déchirure de la croûte suivant un réseau plus serré de fractures radiales. L'orientation de celles-ci dans le Pacifique et dans l'Atlantique est en faveur de cette explication.

Cet arrangement n'est certainement pas suffisant à lui seul pour nous prouver l'ancienneté des rides médianes océaniques ; il n'en est pas moins vrai que toutes ces coïncidences font pencher la balance en faveur de la thèse de l'origine très ancienne de ces crêtes et par conséquent de la permanence relative dans l'arrangement des unités structurales, arrangement modifié néanmoins quelque peu par le jeu normal des phénomènes géologiques.

Le flux de chaleur à l'endroit des crêtes médianes est considéré comme un indice en faveur de l'existence de courants de convection. Un tel courant venant du manteau s'élève vers la surface à l'endroit de la ride ; il donne naissance de part et d'autre de celle-ci à des courants qui s'en écartent ensuite en cheminant horizontalement sous la croûte pour redescendre au contact des massifs continentaux ⁽¹⁾.

(1) Geological Soc. of America, vol. 76, n° 2, 1965.

Or si nous nous reportons à un travail publié par TUZO WILSON ⁽¹⁾, la genèse des plis de l'Ouest américain est due à semblable courant subcrustal venant de la crête atlantique entraînant avec lui tout le continent sud-américain et redescendant à l'endroit de la marge pacifique de ce dernier, c'est-à-dire là où il rencontre un courant de même nature symétriquement disposé.

La thèse qui nous est proposée par notre savant collègue canadien est sans doute défendable. Cependant on ne peut pas l'accepter sans restriction :

a) D'après les vues de son auteur, la disjonction de l'Afrique du Sud et de l'Amérique méridionale s'est faite au Mésozoïque ; la crête atlantique ne peut par conséquent pas être antérieure à cette époque. Si donc elle est le lieu de départ du courant de convection qui a plissé la bordure pacifique de l'Amérique du Sud, son intervention à ce point de vue ne peut être antérieure au Mésozoïque. Comment expliquer alors qu'entre les chaînes andines et le bouclier brésilien, il existe des plissements d'âge intermédiaire ? On ne peut pas douter cependant qu'ils se sont formés à l'intervention d'efforts géodynamiques de même nature que ceux ayant engendré les plis plus récents.

b) En arrivant au voisinage de la discontinuité de Mohorovicic le courant ascendant sous la crête atlantique se divise en deux branches : l'une, dont il vient d'être question, s'en va vers le Pacifique, l'autre se dirige vers l'Afrique. Pourquoi n'a-t-elle pas sur ce continent des effets analogues à ceux de la branche symétrique sur l'Amérique méridionale ? Pourquoi l'Afrique n'est-elle pas bordée d'une zone plissée, contrepartie de la chaîne andine, résultant de l'effort conjugué du courant venant de l'Atlantique et du courant venant de la ride médiane de l'Océan Indien ?

Bien au contraire, c'est l'Australie qui s'en serait allée vers l'est, tandis que s'élargissait considérablement l'Océan Indien.

Tout cela peut paraître en contradiction avec la thèse de T. WILSON. Sans doute notre distingué collègue peut répondre qu'à cette époque l'Océan Indien n'existait pas encore, qu'il n'y avait pas de ride médiane à son endroit, mais seulement une tendance à la dérive. Mais ce serait en contradiction avec les idées de WEGENER, car d'après celui-ci l'Océan Indien s'est ouvert plus tôt que l'Atlantique sud sous l'influence des efforts provoquant la dérive.

En présence de ces contradictions, on est tenté de reporter plus loin dans le passé l'existence des rides médianes ; mais on tend ainsi à se rallier à la thèse de la permanence du domaine océanique comme de ses rides médianes.

D'autre part, si l'on admet la manière de voir de TUZO WILSON pour le Pacifique Sud, ne convient-il pas de l'accepter tout aussi bien pour la partie de cet océan s'étendant entre l'Asie et l'Amérique septentrionale ? On est frappé, en effet par la disposition symétrique si remarquable des orogènes de part et d'autre de l'axe du Pacifique. Toutefois, il convient de remarquer que, dans la partie

(1) J.T. WILSON, *Continental Drift*, Scientific American, avril 1963. Voir les figures page 8.

nord de cet océan tout au moins, la crête médiane principale semble bien être largement déplacée vers l'est, au point de passer très près des côtes de Californie. Cette situation peut paraître favorable pour expliquer la surrection des chaînes de l'ouest américain suivant la conception de TUZO WILSON. Par contre, elle est loin d'aider à la compréhension de l'érection des chaînes de l'est de l'Asie. Est-il permis d'imaginer que le courant sous-crustal partant de la ride médiane nord-atlantique aurait été capable d'entraîner vers l'est toute la masse de l'Eurasie, pour faire surgir les chaînes bordières de l'ouest du Pacifique ?

Nous ne désirons pas insister sur ces faits en apparence contradictoires. Nous avons cherché uniquement à montrer combien il faut agir avec prudence avant de tirer quelque conclusion valable de certaines données d'observation.

Une autre remarque s'impose : Si l'on admet la grande ancienneté du réseau des rides médianes des océans, on arrive à la conclusion que l'Australie n'a jamais été en contact avec l'Antarctique. Or, nous avons donné dans un chapitre précédent des arguments en faveur d'une connexion bien plus étroite, au cours des temps, entre l'Australie et les régions de l'Insulinde.

Par leur flux de chaleur anormal, les rides océaniques médianes confirment la thèse de l'existence de courants de convection dans le Manteau. Il y a lieu d'accepter tout aussi bien que la croûte solide existe dans un état proche de son état actuel depuis des temps extrêmement lointains, sinon on ne comprendrait pas qu'elle se soit toujours déformée suivant des règles identiques. En outre, on est en droit d'ajouter qu'elle a atteint sa température actuelle depuis trois milliards d'années pour le moins si l'on peut faire remonter aussi loin l'apparition de toute trace de vie à la surface de la Terre. On peut ajouter que, depuis lors, la température moyenne de surface n'a guère changé, et cela sur la base même des nécessités vitales.

C'est pourquoi s'il se produit réellement une diminution de volume du manteau par perte de chaleur de sa partie externe, il peut en résulter une déformation de la croûte par fracturation et plissement suivant l'ancienne théorie de la contraction. A l'appui de cette opinion, on peut ajouter que si la croûte n'avait pas atteint une température pratiquement constante depuis l'apparition de la vie, et si elle se refroidissait plus que son substratum, elle ne pourrait que se crevasser et non pas se plisser et s'onduler.

En présence du flux exagéré de chaleur suivant l'axe des rides médianes, on peut se demander s'il n'y a pas retard au refroidissement dans les fonds océaniques où la croûte est plus mince et peut se crevasser par une sorte de retrait alors que ce phénomène n'est plus possible à l'endroit des continents.

CHAPITRE IX

RÉFLEXIONS A PROPOS DES RÉSULTATS ACQUIS EN GÉOPHYSIQUE

Les méthodes modernes de la géophysique ont conduit à des résultats remarquables quant à la nature et la structure des zones profondes. Nous croyons devoir envisager ici trois données qui peuvent jeter quelque lumière sur le problème de la dérive des continents.

A. CROÛTE TERRESTRE ET MANTEAU.

V.V. BELOUSSOV ⁽¹⁾ attire l'attention sur un fait important pour l'évolution de la croûte terrestre : D'après des recherches récentes, il paraît acquis que des différences de structure entre de grandes zones tectoniques se marquent jusqu'à une profondeur de plusieurs centaines de kilomètres et sont ainsi capables d'influencer la partie supérieure du manteau en même temps que la croûte. Cette découverte est d'importance pour ce qui concerne un déplacement horizontal éventuel des continents, qui se conçoit difficilement dans de telles conditions. L'auteur écrit à ce propos : " If the crust moves, it must move together with the upper mantle ; in other words, we are faced with the problem of explaining the displacements of masses a thousand kilometers thick. At the same time the processes which take place within the mantle and lead to the development of such surface structures as anticlines and synclines, must retain their stability over many hundreds of millions of years, as is demonstrated by the Baltic and the Canadian shields, the Moscow and Kongo depressions, and a great many similar structures. The supporters of the idea of horizontal displacements ought to tell us how all this is possible "

D'après notre savant Confrère, les recherches géophysiques ont aussi établi qu'avec le temps l'épaisseur de la croûte peut croître par différenciation de la matière du manteau supérieur, mais qu'elle peut décroître tout aussi bien par

⁽¹⁾ V.V. BELOUSSOV, *The Upper mantle and its influence on the development of the Earth's Crust*, I.C.S.U., Review of World Science, vol. 6, n° 2, avril 1964.

V.V. BELOUSSOV, *The relationship between the Earth's Crust and the deeper Layers of the Earth* : Journal of Indian Geophysical Union, vol. II, n° 2, 1965.

remplacement de la base de la croûte par du matériau lourd venant du manteau ; il ne pense pas qu'il puisse y avoir d'autre explication de la minceur anormale de la croûte à l'endroit du Massif Médian hongrois, du Golfe du Mexique, de la Mer d'Okhotsk et dans certaines régions de l'Asie Centrale. En effet, les faits géologiques établissent en toute certitude qu'il existait autrefois une croûte normale en ces endroits divers. Il existe aussi des régions du globe où les niveaux inférieurs de la croûte terrestre sont devenus plus denses pour la seconde fois, dans la région d'Ivrée (Alpes italiennes) par exemple. Et il conclut : " Consequently the possibility of an occurrence of the process of secondary crustal basification, which causes the formation of depressions on the surfaces, including marine and oceanic ones, becomes much more real. "

Si ces conceptions sont exactes, il paraît difficile de ne pas y voir un indice peu favorable à la théorie de la Dérive des Continents. Pourrait-on accepter d'ailleurs, que de telles influences profondes aient manifesté leur intervention sans aucun déplacement latéral de masse jusque pendant le Mésozoïque, et que la désagrégation de la Pangée se soit manifestée seulement à dater de cette époque ? Ce serait peu vraisemblable.

Comme l'écrit BELOUSSOV à propos du continent africain, les grandes dépressions des Rift Valleys représentent une particularité structurale de premier ordre marquant à l'évidence le processus qui se développe dans la croûte et le manteau supérieur.

Nous pourrions sans doute ajouter qu'un tel processus a chance de s'être manifesté durant toute la durée des temps géologiques.

B. A PROPOS DES RIDES MÉDIANES DES OCÉANS.

Le réseau des crêtes océaniques médianes si régulièrement disposé sur toute la surface de la Terre a servi de base pour édifier certaines conceptions quant à la distribution des courants de convection dans le manteau. Comme TUZO WILSON, R.W. GIRDLER y fait appel dans un travail récent (1).

GIRDLER fait observer que la continuité du réseau des rides médianes océaniques (ridge-rift system) paraît bien établi, mais il signale, comme nous l'avons fait nous-même, que son prolongement en travers du continent asiatique par le lac Baïkal semble pour le moins très problématique (Fig. 41).

Il note que ce système est en rapport avec des efforts de tension et non pas de compression, ainsi qu'il a pu être établi par les observations récentes sur la ride médiane de l'Atlantique, celle de l'est du Pacifique, comme celles de la Mer Rouge et du Golfe d'Aden. Il en conclut : " It seems reasonable to infer from

(1) R.W. GIRDLER, *Rift valleys, continental Drift and convection in the Earth's Mantle*, Nature, n° 4885, 15 juin 1963.

the continuity of these features that the ridge-rift system is a tensional feature on a global scale. If we now argue that the tensional forces are due to the rising, diverging limbs of mantle convection currents, we have a means of mapping a possible convection system in the mantle”.

L'auteur de cette note s'est efforcé de tracer sur une carte du monde la disposition générale du réseau des crêtes médianes. Il attire à ce propos l'attention sur le fait que dans l'hémisphère nord les éléments du “ridge-rift system” con-

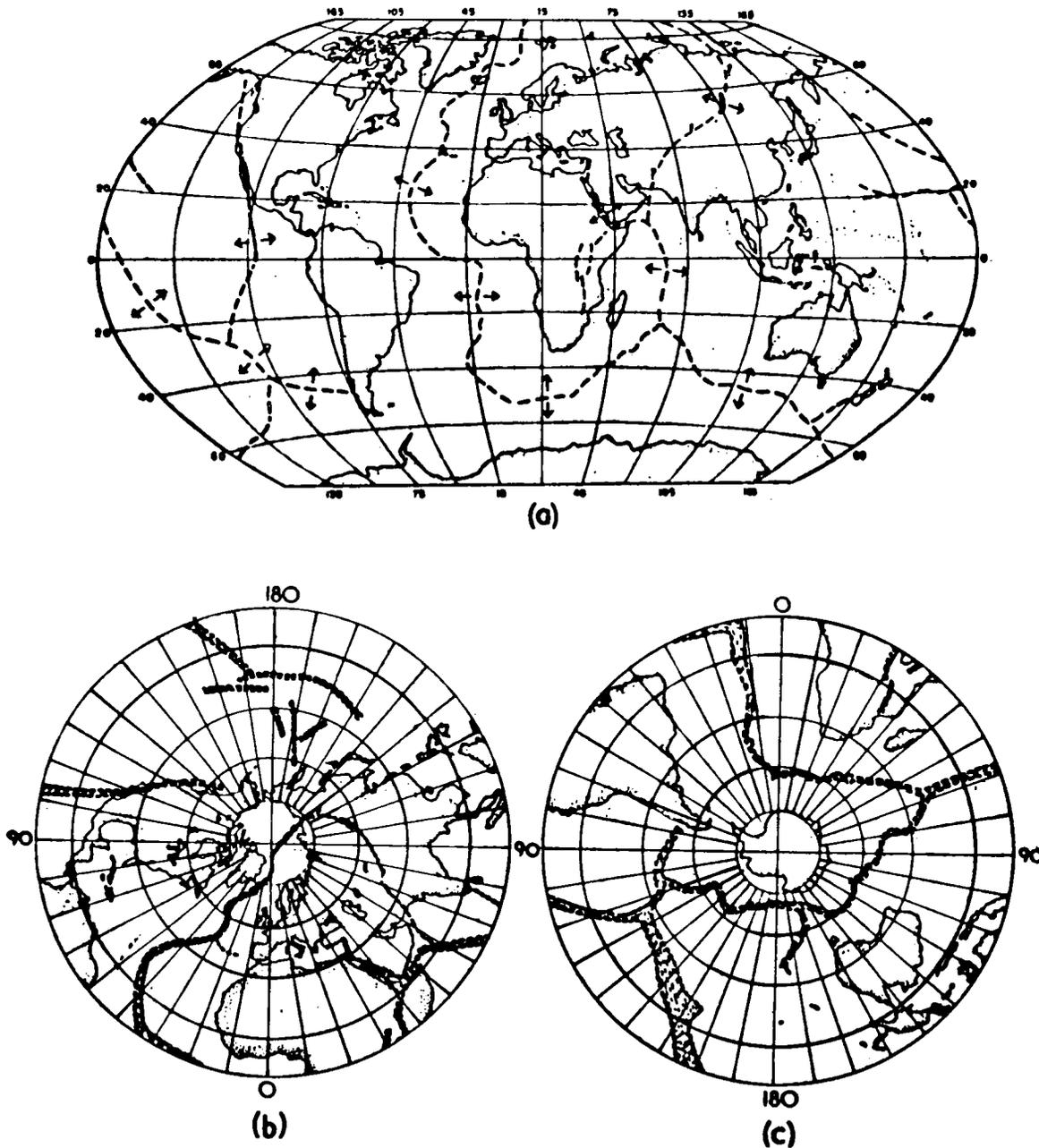


FIG. 41. — Les rides médianes des Océans, d'après GIRDLER.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

vergent vers le pôle, tandis que, dans l'autre hémisphère, la zone de fracture entoure le continent antarctique. Il en résulte la nécessité d'admettre une distribution impaire des cellules de convection dans le Manteau. Ce résultat implique forcément une distribution antipodale, l'Océan arctique, par exemple, s'opposant au Continent antarctique.

L'auteur termine son article par la conclusion suivante :

“ I conclude that comparison of the rift location shown in Figs 1 and 2 shows that the $n = 5$ degree convection pattern explains most closely the observations. This is especially interesting in the light of the harmonic analysis of topography by PREY and VENING-MEINESZ, the theoretical work of VENING-MEINESZ and CHANDRASEKHAR and the continental drift arguments of RUNCORN, all which show the strong possibility of a mantle convection pattern of the same degree ”.

Les considérations de GIRDLER sont, sans aucun doute, d'un grand intérêt pour le sujet qui nous occupe. Leur auteur essaie de mettre en un ensemble cohérent et rationnel des faits de diverses natures, depuis le flux de chaleur vers l'extérieur de la planète jusqu'au paléomagnétisme.

Une question se pose cependant : Depuis quand existe à la surface du globe le réseau du “ ridge-rift system ” avec son émission exagérée de chaleur par rapport aux autres parties du globe ? Comme nous l'avons déjà exposé, il nous paraît difficile de défendre la thèse de son origine récente ; il semble devoir être considéré plutôt comme un trait très vieux de la constitution de l'écorce terrestre en relation avec la forme en S des axes des continents et des océans. Or nous avons rappelé (page 107) que cette particularité de la structure de la croûte terrestre remonte à l'origine même de la formation de la croûte solide suivant les vues de JARDETSKY. S'il en est ainsi, et si l'on admet avec GIRDLER qu'il est l'indice d'efforts de tension, il faut reconnaître que le déplacement a été bien minime pendant toute la longue durée des temps géologiques. Le cas de la Mer Rouge et du Golfe d'Aden est typique à cet égard si l'on se reporte à ce que nous avons dit précédemment de la constitution géologique des continents qui l'encadrent.

Si l'on accepte que le réseau des rides médianes océaniques est extrêmement ancien, il faut admettre qu'il en est ainsi également pour la forme générale d'ensemble des massifs sialiques qu'elles contournent : continents et leur plate-forme continentale, voire certaines parties des fonds océaniques tels les microcontinents de l'Océan Indien suivant l'expression de BRUCE C. HEEZEN et Marie THARP, la ride Madagascar — Seychelles — Mascarene, que longe la ride médiane d'orientation subméridienne de l'Océan Indien.

Si même, comme le font certains auteurs, on raccorde directement les “ rift-valleys ” de l'Est-Africain au réseau des rides médianes par l'intermédiaire des fractures de l'Océan Indien, on ne peut trouver aucune preuve géologique en faveur d'un arrachement en bordure d'une de ces étroites zones affaissées de l'Afrique.

On pourrait conclure en disant que les rides médianes océaniques, malgré toutes les apparences, malgré l'interprétation théorique que l'on en donne,

n'apportent aucune preuve décisive en faveur de la théorie de la Dérive des Continents au sens originel du terme. Nous avons fait observer que les déplacements relatifs des continents révélés par le paléomagnétisme peuvent vraisemblablement trouver une explication raisonnable dans les causes géologiques normales, c'est-à-dire les grandes dislocations qui affectent toute la surface de la Terre et qui se sont répétées tout au long de l'histoire géologique de notre globe.

C. OBSERVATIONS A PROPOS DU FLUX DE CHALEUR VERS L'EXTÉRIEUR DE LA TERRE.

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons rappelé ce que l'on sait du flux de chaleur émanant de l'intérieur de la Terre vers les espaces interplanétaires. Nous avons mentionné notamment l'anomalie observée le long des rides médianes des océans.

Pour la rédaction du présent paragraphe qui concerne le même objet, nous nous sommes largement servis de l'intéressante note publiée en 1960 par J.A. JACOBS ⁽¹⁾. Cet auteur rappelle tout d'abord que, depuis les résultats obtenus par les études du paléomagnétisme, la théorie de la Dérive des Continents connaît un regain de faveur ; il se propose de mettre en évidence une difficulté qui se présente à ce propos.

Il rappelle que, malgré le nombre encore insuffisant de mesures, le flux de chaleur paraît bien être sensiblement le même dans les océans et à la surface des continents ; toutefois, souligne-t-il, il y a des cas où le flux de chaleur est plus grand à certains endroits des Océans, chose inattendue d'après ce que l'on sait de la teneur en substances radioactives de la croûte terrestre. En effet, sur les continents, le flux de chaleur peut être supposé provenir de la désintégration des substances radioactives outre le dégagement normal de chaleur originelle. A l'emplacement des continents, on peut admettre une épaisseur moyenne de 25 kilomètres de matériaux de nature granitique (sial) ; à l'endroit des océans de telles roches font pratiquement défaut, et le matériau basaltique y est tout à fait dominant ; or il est acquis que la teneur du basalte en substances radioactives est tout au plus égale à 30 % de la teneur du granite. D'autre part, d'après sa composition et son épaisseur la croûte océanique ne peut produire que 10 % des valeurs observées. Il en résulte que la chaleur vient du manteau.

En conséquence, écrit J.A. JACOBS, si un continent avec sa croûte radioactive s'avavançait, par action de dérive, sur un fond océanique recouvrant le manteau avec son émission de chaleur plus forte, on devrait s'attendre à relever sur ce continent un flux de chaleur plus considérable qu'à l'endroit de l'océan.

On peut admettre, suivant les vues de l'auteur, que le flux de chaleur plus élevé sous les océans est dû à des courants de convection car von HERZEN dans

⁽¹⁾ J. A. JACOBS — *Continental Drift*. Nature, vol. 185, pp. 231-232, 1960.

la crête du Pacifique a trouvé, dans l'axe de la ride, un flux excessif par rapport à la normale ⁽¹⁾.

MAC DONALD ⁽²⁾ se basant sur les mêmes arguments conclut dans le même sens. En rappelant cette opinion, ANTON L. HALES ⁽³⁾ écrit :

“ MAC DONALD concludes that both the equality of mass and the equality of heat flow suggest that horizontal transport has not been a dominant factor in the evolution of continents ”. In other words, continents have always been continent, oceans always ocean.

“ These very cogent arguments on the deep structure of continents conflict sharply with the continental drift hypothesis, which has received increasing support in recent years largely as a consequence of paleomagnetic research ”.

La concentration de l'Uranium, Thorium et Potassium dans les couches extérieures de la Terre doit s'être faite durant la première période de l'histoire de la Planète, ces couches extérieures n'ayant qu'une épaisseur de quelques kilomètres. Dans ces conditions, la présence du Manteau sous les océans est originelle.

Suivant JACOBS, quelle que soit l'origine des continents, un fait demeure : “ The constitution of the upper part of the mantle is at present very different beneath the oceans and beneath the continents. It is this fundamental difference that makes it very difficult to see how continental drift can have occurred — unless the continents drag the upper few hundred Km. of the mantle along with them, which seems extremely unlikely ”.

Nous avons cru bon de rapporter ces indications à propos des conséquences que l'on peut déduire de la mesure du flux de chaleur. De toute façon, cette mesure pose un problème supplémentaire sur le comportement des zones profondes de la Terre ; il convient, en conséquence, de mettre en garde ceux qui ont tendance à se rallier trop aisément à la conception wegenérienne de la Dérive des continents.

Il est peut-être bon d'ajouter une remarque supplémentaire : Peut-on admettre qu'un flux anormal de chaleur venant du manteau se soit manifesté seulement à une époque géologiquement très récente (Crétacé = 150 M.A.) pour permettre l'ouverture de l'Atlantique, alors qu'il ne se serait rien produit pendant la longue durée des temps géologiques antérieurs à cette époque ? N'est-il pas plus rationnel de supposer que la situation actuelle est la suite normale d'événements continus toujours dans le même sens depuis des temps extrêmement reculés ?

⁽¹⁾ P. VON HERZEN, *Nature*, vol. 183, p. 882, 1959.

⁽²⁾ G.J.F. MAC DONALD, *Deep structure of continents*, *Rev. Geophys.*, vol. I, n° 4, pp. 587-665.

W.H.K. LEE and G.J.F. MAC DONALD, *Global variation of terrestrial heat flow*, *Journ. Geoph. Research*, vol. 68, n° 24, 1963.

⁽³⁾ ANTON L. HALES, *A look at the mantle*, *Geotimes*, juillet-août 1964, p. 9.

CHAPITRE X

LES VARIATIONS DE LONGITUDE

On a pensé — et c'était l'idée de WEGENER — que des mesures très précises de longitude, notamment dans les régions arctiques, pourraient mettre en évidence la progression de la dérive des continents encadrant l'Atlantique.

Nous ne croyons pas devoir entrer dans des détails à ce sujet. Nous nous contenterons de résumer les résultats obtenus d'après deux travaux récents de Madame A. STΟΥΚΟ, de Paris ⁽¹⁾.

Dans le premier de ces travaux, l'auteur arrive au résultat suivant : « La comparaison des résultats des services horaires a montré une diminution séculaire des différences de longitude entre l'Amérique du Nord et l'Europe qui est en corrélation avec l'activité solaire. Cette diminution correspond à une diminution de la distance égale à 10 m. pour la période étudiée ou à la déviation relative des verticales de l'ordre de 0"5. »

Dans le second travail, l'auteur est plus explicite ; dans ses conclusions relatives à la dérive des continents, elle écrit :

« La revision des longitudes conventionnelle nous a montré que la majorité des longitudes des observatoires participant dans le Service International de l'Heure, exige des corrections négatives. Ainsi, par exemple, toutes les stations de l'Amérique du Nord et du Sud exigent des corrections négatives ; cela confirme la conclusion précédente concernant la diminution des longitudes d'Amérique par rapport à celles de l'Europe. »

Nous voudrions faire observer à ce propos que les mesures effectuées par les astronomes sont extrêmement délicates et que diverses causes d'erreur sont possibles. Comme l'a fait observer le professeur A.R. ROBBINS (Oxford) lors de la présentation du travail de M^{me} STΟΥΚΟ au Symposium de Leipzig, en 1962, la dérive des continents devrait être très grande avant de pouvoir être mise en évidence par des observations astronomiques.

Au cours du même symposium, le professeur CAHIERRE, de Paris, est d'accord avec M^{me} STΟΥΚΟ pour inciter à une grande prudence dans l'exploitation des résultats des observations ; ceux-ci pouvaient correspondre, non pas forcément à

⁽¹⁾ A. STΟΥΚΟ, *Sur la variation séculaire des longitudes entre l'Amérique du Nord et l'Europe*, C. R. Séances Acad. Sc. de Paris, t. CCXLVIII, pp. 190-193, séance 12 janvier 1959.

Le service international de l'Heure et le déplacement des continents, Deutsche Akad. des Wissensch. zu Berlin, Berlin, 1962.

une différence de distance des continents, mais à une variation de forme de la Terre.

Nous pensons devoir nous associer à ce conseil de prudence dans l'interprétation des résultats obtenus à l'heure actuelle dans ce domaine spécial touchant aux Sciences de la Terre. Les variations mesurées sont trop petites et sans comparaison possible avec les déplacements même rapides en rapport par exemple avec certaines secousses sismiques, sans parler des déformations enregistrées par les géologues, à la suite de l'étude structurale des massifs continentaux.

Certes à première vue, les résultats obtenus ne sont favorables ni à la thèse de la dérive des continents, ni à celle de l'expansion du globe terrestre au cours des périodes géologiques.

Comme l'a fait remarquer le professeur EGYED après la communication de M^{me} STOYKO, les observations de longitude ne sont pas capables de prouver la dérive des continents parce qu'elles ne tiennent pas compte de la possibilité de la variation du rayon de la Terre.

Cette remarque cadre d'ailleurs parfaitement avec la notion de la continuité dans les déformations de la croûte terrestre quelle que soit leur nature ; failles, ondulations, voire plissements. Ces déformations, si minimes soient-elles, contribuent néanmoins par leur distribution sur toute la surface du globe, à modifier la forme de la Terre en y produisant des affaissements, des surélévations, et aussi des glissements horizontaux de massifs en contact, ainsi que nous l'avons montré dans un chapitre précédent.

Il était néanmoins utile de soulever cette question car on voudra bien se rappeler que, dans son hypothèse, WEGENER prévoyait pour l'époque actuelle, une dérive faible mais continue de l'Amérique du Nord par rapport à l'Europe, une dérive importante du Groenland et un déplacement vers l'est de Madagascar par rapport au continent africain.

M. le professeur STOYKO a bien voulu fournir tout récemment, à M. F. MOREAU, Dr. Sc., membre du Comité National belge de géodésie et de géophysique, quelques données complémentaires sur les résultats obtenus par Madame STOYKO quant aux variations de longitude. Avec les résultats obtenus pour les positions relatives de l'Amérique du Nord et de l'Europe, concordent ceux trouvés pour le Groenland et pour Madagascar. Pour autant que l'on puisse se baser sur des observations faites durant quelques dizaines d'années seulement, il semble que les mouvements imaginés par WEGENER pour la période actuelle ne sont nullement démontrés, bien au contraire.

D'après une étude récente de M^{me} A. STOYKO et M. N. STOYKO ⁽¹⁾ il existe :

1. un éloignement entre le Japon et la partie est de l'Amérique du Nord.
2. un rapprochement entre l'Amérique du Nord et l'Europe.
3. un rapprochement entre l'Europe et le Japon.

⁽¹⁾ A. et M.N. STOYKO, *Détermination du mouvement de l'écorce terrestre d'après les observations astronomiques*, 2^e Sympos. internat. de la croûte terrestre, Awanko, août 1965.

Nous croyons faire acte de prudence en restant dans l'expectative quant à l'usage qu'il convient de faire des données obtenues par les mesures récentes des variations de longitude. Nous rappellerons aussi que le professeur TUZO WILSON croit pouvoir certifier que le glissement de massifs continentaux peut être mesuré directement en quelques endroits exceptionnels ; c'est le cas pour l'Islande et pour les Açores ⁽¹⁾.

Il va sans dire que ces déplacements sont extrêmement minimes, de l'ordre du centimètre par an ; il serait vain de vouloir y trouver un argument pour ou contre la thèse de la dérive comme le supposait WEGENER.

⁽¹⁾ J. TUZO WILSON, *The movements of Continents*, I.C.S.U., Review of World Science, vol. 6, n° 2, avril 1964, p. 85.

CHAPITRE XI

LES FORCES EN ACTION

Après avoir envisagé de façon tout objective les arguments avancés pour ou contre la dérive des continents, il est opportun de consacrer un chapitre à l'examen des forces en action dans l'évolution de la croûte terrestre. Notre attention doit porter notamment sur les contraintes susceptibles d'engendrer les dislocations de premier ordre, telles les zones de plissements, les grandes fractures radiales intéressant les fonds marins comme les continents, le déplacement éventuel de la croûte tout entière par rapport au noyau, voire une dérive réelle des masses continentales les unes par rapport aux autres.

1. L'idée la plus simple en apparence est celle du *refroidissement progressif du globe*, avec pour conséquence une diminution de son volume ; la déformation de la croûte avec, comme corollaire, la genèse des zones plissées, des failles, des charriages, en est forcément la conséquence naturelle, l'enveloppe superficielle à température constante devant s'adapter à un noyau de volume décroissant.

Pendant longtemps les géologues ont été à peu près unanimes à se rallier à cette conception, bien que, sous l'influence d'Osmond FISHER, des doutes pouvaient subsister, la déperdition de chaleur paraissant insuffisante pour permettre la production des déformations considérables observées en maints endroits des continents.

JEFFREYS s'efforça de réfuter les objections présentées et de montrer que la théorie de la contraction peut expliquer, pour une grande part tout au moins, la formation des montagnes ⁽¹⁾.

La théorie de la contraction part de l'hypothèse que la Terre était tout entière à haute température à l'origine. Cependant des savants estiment à l'heure actuelle que la planète était froide dans son état initial et qu'elle s'est échauffée progressivement à l'intervention de la radioactivité. Toutefois, JEFFREYS fait observer que beaucoup de faits importants ne peuvent s'expliquer sans l'influence d'un état fluide de la masse du globe ; en fait, il importe peu que cet état fut originel ou qu'il se produisit ultérieurement à l'intervention de la radioactivité, notamment ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Sir H. JEFFREYS, *The Earth*, 1962.

Voir aussi à ce sujet : KENNETH K. LANDES, *Our shrinking Globe*, Bull. Geol. Soc. of America, vol. 63, pp. 225-240.

⁽²⁾ Sir H. JEFFREYS, *How Soft is the Earth ?* First Harold Jeffreys Lecture, Royal Society of London, 25 octobre 1963.

L'évaluation du gradient géothermique conduit à des valeurs très semblables dans les différentes parties du monde, compte tenu de la nature lithologique des terrains et, par conséquent, de leur conductibilité thermique. Les résultats obtenus peuvent être interprétés comme l'indice d'un flux de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur de la Terre, ce qui correspond à un refroidissement progressif.

Il faut tenir compte cependant de la radioactivité. La question est alors de savoir si, à son intervention le refroidissement est arrêté, ou même s'il y a dilatation comme l'a supposé EGYED ⁽¹⁾ dans ses travaux antérieurs.

Dans la première partie de ce rapport, nous avons dit très brièvement ce que l'on peut penser à ce sujet (voir pages 31 à 33).

Les données acquises à l'heure actuelle permettent de croire à un refroidissement progressif mais très lent de notre Globe, si l'on tient compte de la généralité de flux de chaleur sur toute sa surface, aussi bien à l'endroit des océans que des continents. Nous n'avons pas manqué de faire remarquer qu'il y a des exceptions locales, susceptibles de jeter quelque lumière sur l'évolution de certaines parties de l'écorce terrestre.

Si le refroidissement du globe terrestre paraît indéniable, peu de géologues expliqueraient encore, à l'heure actuelle, la genèse des grandes zones plissées à la *seule* intervention d'efforts tangentiels engendrés par le refroidissement séculaire du Globe ⁽²⁾. La grande objection présentée à cette manière de voir est la suivante : La contraction due au refroidissement ne peut pas avoir été suffisante pour permettre le rétrécissement de la croûte que semble exiger la formation des plissements calédoniens, hercyniens et surtout les déformations des Alpes et des chaînes himalayennes avec leurs grandes nappes de charriage. Actuellement d'autres facteurs sont pris en considération, notamment la gravité et les courants sub-crustaux pour expliquer la formation des plis et des nappes caractéristiques des grands orogènes. Il n'est plus possible de procéder comme autrefois pour estimer l'importance de la contraction en ramenant simplement les couches plissées dans leur position horizontale originelle. Il faut tenir compte de l'étirement en rapport avec les efforts de plissement, du glissement relatif des masses minérales les unes sur les autres à l'intervention de la pesanteur, etc.

Il paraît vraisemblable, cependant que la contraction peut être envisagée pour expliquer la formation des orogènes, à la seule condition de lui attribuer une importance moindre qu'on ne le faisait autrefois.

Dans la nouvelle édition de son ouvrage " Principles of physical geology " (page 965) A. HOLMES écrit à ce propos : " But now it is realized that folding and thrusting do not necessarily imply crustal shortening... and that former estimates of shortening have been grossly exaggerated ".

⁽¹⁾ L. EGYED, *A new dynamic conception of the internal constitution of the Earth*, Geol. Rundschau, t. XLVI, 1957.

⁽²⁾ Voir à ce sujet : P. FOURMARIER, *Efforts tangentiels et efforts verticaux dans la tectogenèse*, Ann. Soc. Géol. Belg., t. 69, 1946.

Il ne semble pas douteux cependant que de larges déformations sous forme d'ondulations à grand rayon de courbure, voire exceptionnellement de plis bien marqués mais isolés, tel celui de l'île de Wight (Angleterre) avec les déformations plus douces qui lui sont parallèles, s'expliquent le plus facilement par l'intervention d'efforts tangentiels résultant de la contraction du Globe.

Ce n'est pas le lieu de reprendre ici la question de la genèse des grandes zones plissées avec toutes leurs complications ; nous en avons donné un aperçu suffisant dans la première partie de ce rapport.

Il nous paraît utile de mettre en parallèle l'opinion du professeur GOGUEL, de l'École des Mines de Paris ⁽¹⁾. Tout en reconnaissant le rôle important de la tectonique d'écoulement dans l'édification des grandes chaînes plissées, il accepte que les mouvements du socle peuvent être la résultante d'une compression latérale, d'une compression qui s'est d'ailleurs accompagnée de soulèvements ou d'affaissements de blocs. « Mais, écrit-il, les estimations de l'ampleur de cette compression latérale restent largement divergentes ».

Et il termine son article de la façon suivante :

« Il serait intéressant, par ailleurs, de considérer la genèse des forces horizontales dans l'écorce, variables selon les époques et selon les lieux, conformément aux données de l'histoire géologique. Pour opérer un choix parmi les multiples hypothèses proposées, il est précieux de pouvoir estimer l'énergie absorbée par les déformations dont on peut observer les traces. Pour grossière que soit cette estimation, il suffit d'indiquer que, rapportée à une durée géologique vraisemblable, elle conduit à une estimation de l'énergie moyenne annuelle du même ordre que celle qui est dissipée actuellement par les séismes. Les processus d'origine mécanique qui ont été proposés pour expliquer la déformation de l'écorce paraissent tous incapables, il s'en faut de beaucoup, de fournir une telle énergie. Mais, par contre, le flux géothermique... est un millier de fois plus important. C'est là l'indication que d'une manière ou d'une autre, le mécanisme par lequel apparaissent des forces horizontales dans l'écorce doit tirer son énergie du flux thermique, que ce soit dans le Manteau ou dans l'Écorce ».

En admettant que ce flux soit capable de provoquer les déformations relevées par les géologues, serait-il apte à mettre en mouvement les masses continentales tout entières comme l'exige la théorie de la Dérive des Continents selon WEGENER ?

Le professeur GOGUEL a repris l'examen de la question à l'occasion du symposium organisé par la Royal Society of London sur le problème de la dérive des continents ⁽²⁾. Nous relevons dans son travail des indications intéressantes. La contraction du globe par refroidissement est inadéquat ; nous ne sommes pas certains, en effet, que la Terre se refroidisse ni à quel rythme s'opère ce refroidisse-

⁽¹⁾ J. GOGUEL, *Les données de la tectonique dans l'étude du manteau supérieur*, I.C.S.U., *Review of World Science*, vol. 6, n° 2, avril 1964.

⁽²⁾ J. GOGUEL, *Tectonics and continental Drift in Symposium on Continental Drift*, London, the Royal Society 1965.

ment éventuel. Par contre l'action des courants de convection rend plus aisée la compréhension des phénomènes tectoniques.

Il nous semble y avoir quelque contradiction entre cette affirmation et celle émise par le même savant dans son article de 1964 où il affirme que le flux thermique constitue la source d'énergie suffisante pour expliquer les déformations de la croûte terrestre.

Nous relevons, en finale du même article du professeur GOGUEL à la Royal Society, la phrase suivante :

“ If continents are drifting, or have drifted, I am ready to admit that the same forces, responsible for tectonic deformation, are also acting to move them. But what we know about these forces is not a very great help to answer the question ”.

Il y a sans doute quelque analogie entre cette opinion et l'idée que nous avons exposée antérieurement à savoir que les déformations géologiques normales, par plissement ou par fracturation, peuvent donner l'explication d'anomalies qui semblent venir à l'appui de la théorie wegenérienne, comme par exemple la non concordance des pôles indiquée par les mesures paléomagnétiques.

2. M. le professeur J. COX a rappelé que le ralentissement séculaire de la rotation de la Terre, à laquelle est lié l'aplatissement polaire, peut jouer un rôle important.

Si l'aplatissement polaire fut plus considérable autrefois qu'actuellement, il a pu se produire des déplacements des continents ou de parties de continents tout aussi bien en latitude qu'en longitude.

Il est assez vraisemblable que le grand réseau de failles radiales ou décrochements (strike-slip faults) pourrait être dû à une telle intervention. Ce réseau couvre les continents mais il s'étend aussi sur le fond des océans comme l'ont montré les explorations sous-marines.

A titre d'exemple de fractures de cette nature dont l'observation est aisée, on peut citer les grands grabens africains et, en Amérique septentrionale, la faille de San-Andreas (Californie) si bien étudiée par J.C. CROWELL ⁽¹⁾, et bien d'autres failles dont il a été fait mention antérieurement.

Ces accidents ont une disposition systématiquement ordonnée, formant parfois un réseau assez régulièrement disposé où l'on distingue deux ou trois directions conjuguées comme c'est le cas sur le continent africain. Un changement de vitesse de rotation de la Terre engendre forcément une contrainte dirigée à peu près suivant l'axe de rotation ; une telle contrainte peut expliquer l'origine de semblable réseau.

Il est intéressant de rappeler à ce propos que des observations récentes permettent de croire qu'il existe à la surface de la Lune un réseau de fractures qui ne

⁽¹⁾ J.C. CROWELL, *Displacement along the San Andreas Fault, California*, Géol. Soc. of America, Special paper n° 71, 1962.

serait pas sans analogie avec le réseau des grandes " strike-slip faults " de la croûte terrestre ⁽¹⁾.

Il est probable qu'au moins une partie de ces accidents ont pris naissance à une époque très ancienne. On a même prétendu que certains remontent au Précambrien, mais il est malaisé d'en donner la démonstration. Beaucoup sont actifs à l'heure actuelle et leur remise en mouvement se marque par des secousses séismiques telles les tremblements de terre de peu d'intensité ressentis de temps à autre en Belgique et dans les pays avoisinants où de telles fractures sont connues depuis longtemps et ont probablement joué dès l'ère dévonienne pour le moins.

Il est indiscutable, d'ailleurs, comme l'a fait remarquer M. le professeur LAHAYE, que dans le globe terrestre toute réduction de surface avec conservation du volume doit entraîner des fractures en différents points.

D'autre part, on conçoit aisément que les zones à plissements récents, telles la bordure du Pacifique et la chaîne alpino-himalayenne manifestent une activité séismique plus marquée, tandis que d'autres parties des continents sont d'une stabilité infiniment plus grande.

A titre d'indication, nous rappellerons ici que par ses recherches sur la croissance des fossiles, WELLS ⁽²⁾ a conclu à un ralentissement progressif de la vitesse de rotation de la Terre sous l'influence des marées.

3. Parmi les forces en action, les courants de convection ou courants sub-crustaux sont pris en très sérieuse considération par divers auteurs, à la suite notamment des travaux de VENING-MEINESZ, de PEKERIS, de RITTMANN. Nous avons vu que GOGUEL y attache aussi une grande importance.

L'existence de tels courants paraît indiscutable, si l'on tient compte des observations faites le long des rides médianes des océans. A ce propos, H.W. MENARD ⁽³⁾ souligne le fait que suivant ces rides, jalonnées par des volcans et des tremblements de terre, le flux de chaleur est deux fois supérieur à ce qu'il est en d'autres parties de la croûte terrestre. Cette particularité serait due à l'action de courants de convection ascendants à l'endroit de ces rides. Or l'existence de semblables courants implique forcément celle de courants descendants en d'autres régions.

C'est par des courants de convection que TAYLOR ⁽⁴⁾ expliquait la dérive des continents vers la zone méditerranéenne. C'est à leur intervention que GRIGGS ⁽⁵⁾ attribue la formation des zones plissées en bordure des continents.

⁽¹⁾ On consultera à ce sujet : Gilbert FIELDER, *Lunar Tectonics*, Quart. Journ. of the Geological Soc. of London, n° 473, vol. 119, part 1, 5th april 1963.

⁽²⁾ Nature, vol. 197, n° 4871, march 9, 1963, pp. 948-950.

⁽³⁾ H.W. MENARD, *Development of median elevations in Ocean Basins*, Bull. Geol. Soc. of America, vol. 69, n° 9, september 1952.

⁽⁴⁾ F.B. TAYLOR, *Sliding Continents and tidal and rotational forces*, Contribution an Symposium on the origin and movement of land masses, 1928.

⁽⁵⁾ D. GRIGGS, *A theory of Mountain Building*, American Journal of Science, 1939, pp. 611-650.

Le principe a été repris par A. RITTMANN dans l'article suivant : A. RITTMANN, *La température nelle crosto terrestre e l'orogenesi*, Mem. e noto alle ist. de geol. appli. dell' Univ. di Napoli, vol. 1, 1947-48, p. 21.

Plus récemment J. TUZO WILSON ⁽¹⁾ s'est rallié à la même hypothèse : les courants montent vers la crête médiane d'un océan, provoquant la surrection d'appareils volcaniques. Les îles volcaniques situées de part et d'autre de la ride sont d'autant plus anciennes qu'elles sont plus éloignées de cette crête, d'où la notion d'expansion des fonds océaniques.

Toutefois, il faut reconnaître que si le phénomène s'est produit suivant l'axe du Pacifique d'une part, suivant la crête médiane de l'Atlantique, d'autre part, l'Amérique fut sollicitée à se déplacer vers l'est dans le premier cas, vers l'ouest dans le second. Il y a là une contradiction.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, on conçoit mal que suivant les vues de l'auteur, un courant issu de la crête médiane atlantique passe sous l'Amérique sans y causer de trouble, et s'en va jusqu'au Pacifique pour provoquer la formation d'une fosse en bordure de la rive occidentale de ce continent. On s'explique moins encore que le courant partant de la même crête médiane pour se diriger vers l'est ne produise aucun effet sur les côtes de l'Afrique ; par contre, dans la thèse de la dérive, c'est l'Australie qui s'écarte de l'Afrique. Dans ce cas, pourquoi les courants en rapport avec la ride médiane de l'Océan Indien auraient-ils influencé la côte orientale d'Australie sans produire aucune déformation sur les côtes africaines ?

Ces diverses considérations suffisent à montrer combien est encore mal élucidé le rôle éventuel des courants subcrustaux dans l'évolution de la croûte terrestre.

Il n'est pas sans intérêt de rappeler ici que d'après Paul GIDON ⁽²⁾, si les courants magmatiques jouent un rôle considérable dans l'évolution des continents, leur point de départ n'est pas à l'endroit des crêtes médianes océaniques, mais sous les continents. Ils provoquent ainsi une sorte d'érosion sous-crustale capable de déplacer une part importante du Sial originel, notamment à la base des racines des masses continentales là où celles-ci descendent le plus profondément, c'est-à-dire sous les zones de haut relief continental.

Cette conception s'accorde ainsi avec celle de BELOUSSOV que nous avons rappelée antérieurement.

Cette thèse avait été présentée par GILLULY, déjà en 1955 ⁽³⁾.

Nous terminerons ce chapitre en rappelant la conclusion d'un bref article de SCHEIDEGGER ⁽⁴⁾. L'auteur fait observer tout d'abord que les résultats obtenus par la méthode du magnétisme rémanent s'accordent parfaitement avec la conception de WEGENER basée notamment sur les variations climatiques au cours des temps. Il rappelle, en outre, que plusieurs explications ont été proposées de la Dérive, mais aucune d'entre elles n'a paru satisfaisante.

⁽¹⁾ TUZO WILSON, *Evidence from islands on the spreading of ocean floors*, Nature, 9 février 1963, vol. 197.

⁽²⁾ Paul GIDON, *Courants magmatiques et évolution des continents*, Masson et Cie, Éditeurs, Paris, 1963.

⁽³⁾ J. GILLULY, *Geologic contrasts between continents and ocean basins*, Geol. Soc. of America, Spec. paper n° 62, 1955.

⁽⁴⁾ A.E. SCHEIDEGGER, *On the possible causes of continental Drift* in *Symposium on polar Wandering and continental Drift*, Alberta Soc. of Petroleum Geologists, 1958, reprinted 1960. Calgary, Alberta, Canada.

Après les avoir rapidement passées en revue, il arrive à poser la question de savoir s'il ne convient pas de penser à un déplacement des continents se réalisant au hasard et non pas suivant une règle bien précise. Une telle hypothèse conduit à faire appel à une force agissant de façon désordonnée sans que soit précisée la nature de cette force.

A notre avis, l'intervention d'une force agissant au hasard nous paraît incompatible avec l'harmonieuse disposition des masses structurales de la croûte terrestre dont il a été question au dernier chapitre de la première partie de ce rapport.

Nous ajouterons encore, que les courants de convection auxquels on a recours actuellement pour l'explication de l'évolution tectonique de la croûte terrestre, nous paraissent indissolublement liés aux variations des conditions thermiques de la planète et notamment au flux de chaleur vers l'extérieur. Celui-ci conduit forcément à une tendance à la contraction du globe. En réalité, il est très probable qu'il conviendra de faire de plus en plus appel à l'action conjuguée de plusieurs facteurs et non pas à la seule influence du refroidissement de la Terre comme on l'admettait autrefois. Nous aurons l'occasion de toucher encore à cette question à propos de l'expansion possible du globe terrestre.

CHAPITRE XII

DÉRIVE ET EXPANSION

Dans les chapitres précédents nous sommes partis de l'idée qu'au cours des périodes géologiques le rayon de la Terre n'a pas varié de façon notable, sans renoncer toutefois à admettre une modification de peu d'importance. Ceci revient à dire que, dès son origine, la croûte terrestre de nature sialique était discontinue. A cette conception peut-être trop absolue, il est possible d'apporter un correctif en admettant avec BELOUSSOV une continuité originelle bientôt détruite par la digestion du sial par le sima là où son épaisseur était probablement moindre qu'ailleurs.

Nous avons eu l'occasion cependant de mentionner à diverses reprises une conception toute différente de la séparation des masses continentales à partir d'une Pangée éventuelle, sur la base d'une expansion de la Terre. Nous avons notamment signalé dans la première partie que deux thèses différentes tendent à faire intervenir l'expansion de la Terre comme facteur essentiel de son évolution : celle du professeur ÉGYED et celle du professeur CAREY. Nous en avons exposé sommairement le principe dans la première partie. Nous allons procéder à un examen critique de cette théorie en nous basant autant que possible sur les faits mentionnés précédemment.

Dans un cas comme dans l'autre, l'expansion a eu pour effet de provoquer la rupture de la croûte originellement continue ; ses fragments se sont écartés les uns des autres ; cependant un tel déplacement relatif est tout différent de la dérive telle que nous l'avons envisagée jusqu'à présent ; en effet, les fragments de la croûte ne se déplacent pas à la surface du sima comme des corps flottant sur une masse fluide ; ils s'écartent systématiquement les uns des autres par élargissement progressif des fractures de la croûte qui doit s'adapter à un sphéroïde de plus en plus volumineux.

A. HYPOTHÈSE D'ÉGYED.

A la réflexion, on peut se demander s'il n'y a pas une erreur de base dans cette théorie. Si l'on se rallie aux idées exposées par ce savant, on doit admettre, pour la croûte sialique, un comportement différent de celui du soubassement

basique (sima ou salsima) : Ce dernier se serait étiré à l'endroit des fonds océaniques tout en restant stable là où il est recouvert par le sial des masses continentales. Si l'étirement se faisait partout de la même façon, il n'y aurait aucune raison d'admettre la rupture suivant quelques directions privilégiées de la croûte sialique originellement continue, pour arriver au stade actuel des continents séparés les uns des autres.

Quelle preuve pourrait-on donner d'un tel comportement différentiel si même on avait la certitude de la continuité originelle de la croûte sialique ?

Il n'est peut-être pas sans intérêt de rappeler ici ce que nous avons dit au chapitre I de la première partie de ce rapport.

Si l'on en juge d'après les observations récentes des fonds océaniques, la croûte s'y présente, du point de vue déformabilité dans des conditions très semblables à celles qu'elle possède à l'endroit des continents ; la présence de grandes fractures du type des failles radiales dans le Pacifique, dans l'Atlantique et dans l'Océan Indien en apporte la preuve manifeste.

Parmi les arguments invoqués par ÉGYED en faveur de sa théorie, il y a lieu de considérer le taux d'inondation des continents au cours des périodes géologiques. Ceci implique tout d'abord la probabilité que la masse de l'hydrosphère est restée sensiblement constante depuis le Précambrien pour le moins. Nous avons donné quelques indications à ce sujet dans la première partie du présent travail.

Si cette hypothèse est exacte, en cas de contraction de la Terre, il devrait y avoir inondation progressive des continents sauf variations locales dues aux mouvements propres de l'écorce. Par contre, si le volume du globe reste constant, les affaissements sont strictement compensés par les soulèvements ; enfin, s'il y a expansion, il doit se produire un retrait général et progressif des eaux océaniques.

Sur la base des cartes dressées par divers auteurs et notamment par H. et G. TERMIER, ÉGYED conclut en faveur de cette dernière hypothèse.

On peut se demander à ce propos s'il n'y a pas quelque danger à faire fond sur de telles esquisses, forcément très sommaires ; d'autre part, on connaît des périodes de grande transgression des océans sur les continents ; encore à l'heure actuelle, de grandes étendues autrefois continentales sont sous la mer dans les régions arctiques, comme dans les régions équatoriales et tropicales.

Les géologues admettent généralement qu'il n'y a pas eu un retrait continu des eaux océaniques au cours des temps ; il semble au contraire qu'il y ait lieu de tenir compte de larges transgressions marines au Dévonien moyen, au Jurassique moyen et au Crétacique supérieur.

D'autre part, un retrait général des eaux marines n'est pas en accord avec les observations faites sur les atolls du Pacifique ; alors que certains d'entre eux sont actuellement bien au-dessus du niveau de l'océan, d'autres doivent leur épaisseur considérable à un mouvement lent, mais continu, d'affaissements que mettent en évidence aussi les guyots du Pacifique. Il faut, en l'occurrence tenir compte des déformations de caractère épéirogénique de la croûte terrestre,

réalisées suivant de larges ondulations, une partie s'élevant tandis qu'une autre s'affaisse.

Nous trouvons à ce propos un exemple curieux de mouvements épéirogéniques différentiels. En 1960, R. DELARY ⁽¹⁾ a publié une note relative à de telles déformations de date récente à Madagascar. Il signale que dans le nord-ouest de l'île, des ruines arabes des 10^{me} et 11^{me} siècles, qui furent certainement édifiées au-dessus du niveau de la mer ont maintenant le pied dans l'eau ; il s'est donc produit là un affaissement récent. Par contre, l'extrême nord de Madagascar est marqué par un soulèvement du sol au Quaternaire, et probablement aussi à l'époque historique.

On pourrait citer bien d'autres exemples de déformations de ce genre sur tous les continents et notamment dans notre pays.

Il faut rappeler encore que certains auteurs ont cru pouvoir affirmer que la profondeur moyenne des océans n'a cessé d'augmenter durant les temps géologiques. S'il en est ainsi, ce n'est pas en faveur de la thèse de l'expansion.

Les géologues pourraient encore y objecter que toute l'évolution du Pacifique ne cadre pas avec la notion de l'expansion. Tout au plus pourrait-on faire appel à celle-ci pour expliquer l'Atlantique ; même dans ce cas, on pourrait trouver des arguments pour la combattre.

Est-ce à dire qu'une certaine expansion ne puisse pas être à considérer, notamment à l'échelle locale ? Ce serait une erreur de ne pas envisager une telle possibilité, notamment pour expliquer la genèse de certaines dépressions, voire du grand réseau des failles radiales qui couvre la surface de la Terre entière.

De toute manière, la prudence s'impose.

L'hypothèse d'une dilatation du globe implique des efforts de distension. Or les grandes déformations de la croûte terrestre, telles les zones plissées semblent devoir s'expliquer plus aisément par compression que par extension. C'était, d'ailleurs, l'ancienne conception de la genèse des chaînes plissées à l'intervention d'efforts tangentiels résultant de la contraction de la Terre, suite à son refroidissement progressif au cours des temps.

L'étude des chaînes fortement marquées par le plissement et par les grands charriages conduit aujourd'hui à plus de réserve. Il n'est même pas interdit de prétendre que les plissements de la croûte ne sont pas dus essentiellement au rapprochement des massifs rigides avoisinants, mais qu'ils trouvent leur raison d'être à l'endroit même où ils se sont édifiés ⁽²⁾.

Il n'empêche que toutes les théories développées pour expliquer la genèse des zones plissées aux dépens d'épaisses séries sédimentaires exigent, pour le moins, la formation d'un bourrelet de matériaux sédimentaires à l'emplacement d'une aire géosynclinale. Un tel bourrelet ne correspond pas seulement à

⁽¹⁾ R. DELARY, *Sur les mouvements récents du sol dans le nord-ouest de Madagascar*, C. R. Somm. Soc. Geol. France, 7 novembre 1960.

⁽²⁾ Voir à ce sujet : P. FOURMARIER, *Efforts tangentiels et efforts verticaux dans la tectogenèse*, Ann. Soc. Géol. Belg., t. LXIX, pp. 87 à 182, 1946, Liège. Le même article, légèrement modifié, a paru dans Ciel et Terre, 1951.

l'importance du relief au-dessus de la surface du géoïde ; il s'enfonce plus ou moins profondément sous ce niveau.

A titre documentaire, rappelons qu'au voisinage de l'Himalaya les déviations de la verticale *calculées* sont de l'ordre de 77" et 58" respectivement pour les stations de Jaipaiguri et de Kaliana ; par contre, les déviations mesurées sont seulement de 1". Cette différence tient à ce que l'excès superficiel de masse des chaînes de montagnes est compensé par un défaut de masse en profondeur suivant le principe de l'isostasie tel que le conçoit AIRY. Ces mesures confirment ainsi l'opinion qu'une zone plissée correspond à un renflement de matière légère, c'est-à-dire du sial, de puissance bien supérieure à celle du relief de la chaîne de montagnes.

Il ne faut pas perdre de vue d'autre part que toute zone de relief est soumise à l'érosion dès qu'elle commence à s'élever au-dessus de la surface des océans. De ce fait et suivant le principe d'isostasie la base du bourrelet s'élève au fur et à mesure que l'érosion progresse. Aussi peut-on prétendre que le bourrelet sialique a pu être plus important que semblent l'indiquer les mesures actuelles.

Il serait difficile de croire qu'une telle accumulation de matériau sialique ait pu se faire sous l'action d'une expansion généralisée intéressant à la fois les masses continentales et les dépressions océaniques.

On peut même se demander si la théorie de l'expansion est susceptible de rendre compte de la formation des aires géosynclinales avec leurs larges déformations soulignées par les actions de subsidence différentielle.

L'analyse détaillée des structures géologiques en dehors des régions fortement plissées n'est pas davantage favorable à l'hypothèse de l'expansion. Il suffit à cet égard de renvoyer par exemple à l'étude publiée par le professeur A. BOGDANOFF sur la plate-forme de l'Europe orientale ⁽¹⁾. On peut rappeler aussi à ce propos des déformations relativement récentes consistant en plis très accusés que l'on connaît en Europe occidentale, par exemple à l'île de Wight, comme dans bien d'autres régions du Monde. Leur structure s'explique plus aisément, semble-t-il, par des efforts de compression que par l'expansion de la croûte.

La présence d'un vaste réseau de failles radiales couvrant toute la surface de la Terre, accompagnées souvent d'épanchements basaltiques, serait peut-être un meilleur argument en faveur de la thèse de l'expansion.

Nous avons exposé la théorie de l'expansion d'après les vues les plus récemment émises par ÉGYED. Il n'est cependant pas sans intérêt de rappeler que notre éminent collègue avait antérieurement fait appel à la notion de la radioactivité ⁽²⁾. Sous l'influence de celle-ci il se produirait un réchauffement de la Terre qui aurait pour effet de dilater le Sima. Soumise à une telle sollicitation, l'écorce se briserait et ses morceaux en s'écartant les uns des autres laisseraient apparaître le soubasse-

⁽¹⁾ AL. BOGDANOFF, *Sur certains problèmes de structure et d'histoire de la plate-forme de l'Europe orientale*, Bull. Soc. Géol. France, 7^e sér., t. IV, n^o 7, 1962, p. 898.

⁽²⁾ L. EGYED, *A new dynamic conception of the internal constitution of the Earth*, Geol. Rundschau, t. LXVI, 1957, pp. 101-171.

ment basaltique au fond de ces déchirures, qui seraient les océans. Dans ces conditions, comme dans l'hypothèse d'ÉGYED rapportée précédemment, l'étendue des masses continentales telles que nous les voyons aujourd'hui représenterait la surface originelle de la Terre ; celle-ci aurait eu, à ses débuts, un rayon de 3500 à 4000 kilomètres au lieu de 6371 dans l'état actuel.

En l'occurrence, la radioactivité paraît être un facteur dont il ne faut pas sousestimer l'importance. On peut se demander cependant s'il n'y a pas là une erreur de principe : Si la Terre était originellement fluide, à haute température, avec ses matériaux classés par ordre de densité, il n'y a aucune raison de croire que les éléments radioactifs, ou du moins la plupart d'entre eux, n'engendraient pas déjà un dégagement de chaleur comme ils continuent à le faire dans les temps présents. Un tel dégagement de chaleur ne provoque pas nécessairement l'échauffement et, par suite, l'expansion du Globe terrestre ; il retarde simplement l'abaissement de température qui doit fatalement se produire, par suite du flux de chaleur vers l'extérieur.

Il ne paraîtra pas inutile de citer ici quelques lignes d'un ouvrage du professeur GUEBEN de Liège ⁽¹⁾ déjà mentionné page 18 :

« Nous savons que la radioactivité détermine un effet calorifique : il en résulte une contribution de la radioactivité à l'entretien de la chaleur de la terre. Déjà avant la découverte de cette action calorifique, on pensait que la terre provient d'une masse originellement à l'état fondu et que, depuis ce moment, elle a subi un refroidissement progressif à partir de la surface pour atteindre la température actuelle. L'existence de sources thermales et les phénomènes volcaniques prouvent du reste que le centre de la terre est à plus haute température.

« La considération de la loi du refroidissement montre que le temps écoulé depuis le début du refroidissement doit être d'environ 20 millions d'années. Or les découvertes géologiques, confirmées par les méthodes radioactives de détermination de l'âge des minerais amènent à des âges beaucoup plus élevés (jusque 1600 millions d'années). Il y a donc une cause qui perturbe la loi de refroidissement et cette cause est la production de chaleur par les corps radioactifs.

« On a montré, que, si on suppose la présence d'U, de Th et de K dans une couche superficielle de la terre d'épaisseur environ 16 km, la production de chaleur serait suffisante pour compenser le rayonnement calorifique de la terre ».

A cet égard, il n'est pas inutile de rappeler que, d'après ALLAN ⁽²⁾ le flux thermique est sensiblement le même partout, qu'il soit mesuré sur les Continents ou au fond des Océans.

Cette répartition semble indiquer que du point de vue de l'abaissement progressif de la température du globe, il n'y a guère de différence entre ces deux domaines, au moins jusque 200 à 300 kilomètres de profondeur ; par conséquent

⁽¹⁾ G. GUEBEN, *Phénomènes radioactifs et introduction à la physique nucléaire*, Édit. Desoer, Liège, p. 255.

⁽²⁾ D.W. ALLAN, *Endeavour*, 1954, p. 89.

F. BIRCH, *Geophysics*, 19, 1964, p. 645.

Références tirées de A.E. SCHEIDEGGER, *Principles of geodynamics*. Berlin, 1958.

la radioactivité ne contrebalance pas l'évolution normale de la Terre ; elle ne peut que retarder son refroidissement.

Il est cependant accepté généralement que les roches sialiques renferment plus de matériel radioactif que les roches basiques des Océans. Faut-il admettre que cette différence puisse être compensée dans les zones profondes de la Terre ?

Il n'est pas sans intérêt de signaler à ce propos que A.M. OVCHINNIKOV ⁽¹⁾ a écrit dans un bref article sur les conditions hydrothermales de la croûte terrestre :

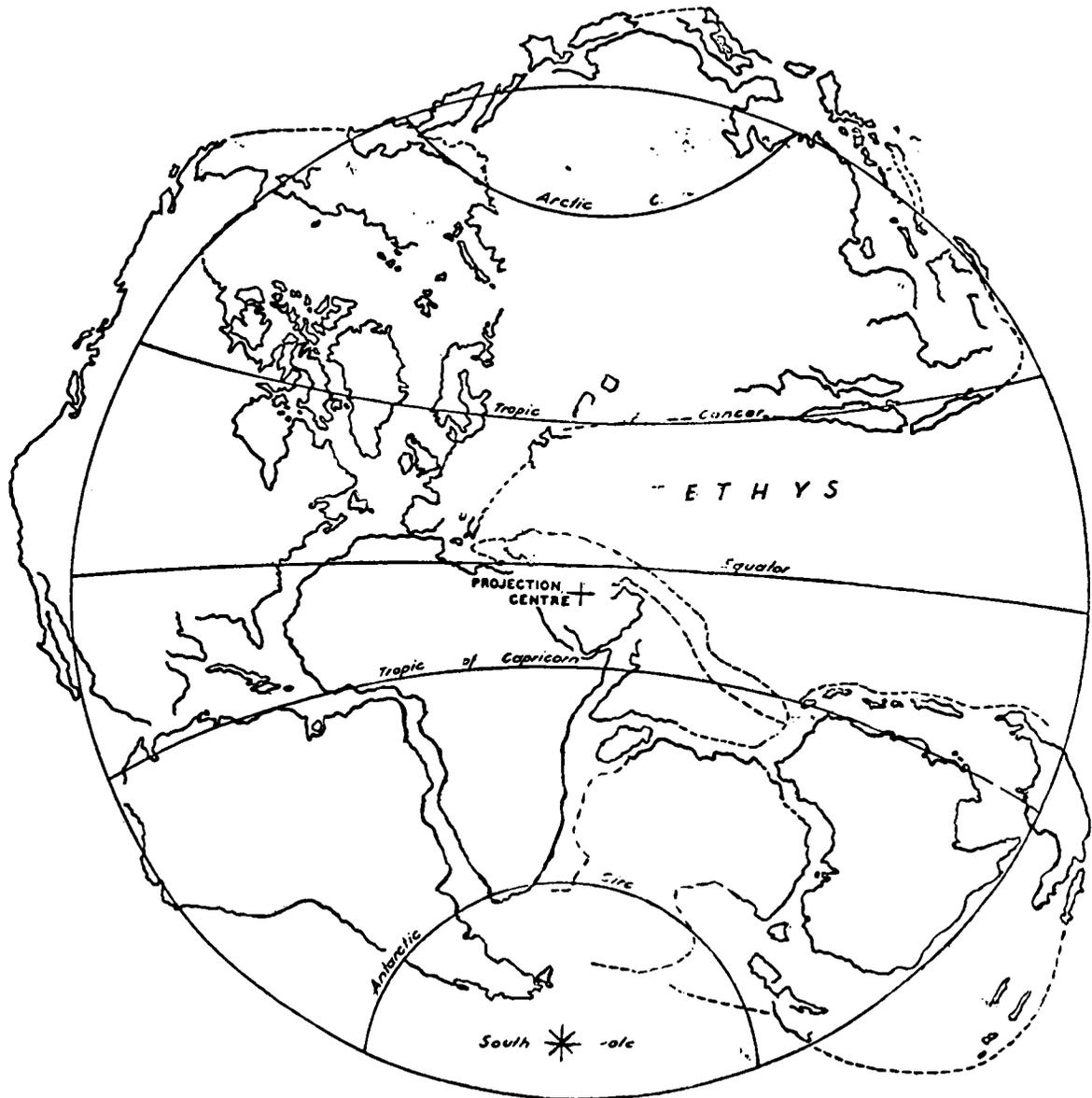


FIG. 42. — La Pangée, d'après S.W. CAREY.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur).

⁽¹⁾ A.M. OVCHINNIKOV, *On the hydrothermal conditions of the Earth's crust*, Comptes-rendus (Doklady) de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., 1946, Vol. LIII, n° 7.

“ It should be pointed out here that in the accessible part of the Earth's crust the temperature effect of radioactive decay plays no appreciable part even at places of accumulation of radioelements and may therefore be neglected when solving problems of practical hydrogeology. ”

Cette affirmation se rapporte à un cas particulier ; elle méritait néanmoins d'être mentionnée ici.

En conclusion de ce qui précède, nous pouvons dire que la thèse d'ÉGYED mérite certainement d'être étudiée avec le plus grand soin. Il nous paraît cependant qu'elle cadre mal avec les résultats obtenus par l'étude géologique de la croûte terrestre. Est-ce à dire qu'il n'y ait pas eu, au cours des temps, quelque tendance à l'expansion, mais à un degré beaucoup moindre que ne l'admet ÉGYED ? Les observations faites le long des rides océaniques médianes comme en Islande ⁽¹⁾ peuvent être invoquées en faveur de la thèse de l'expansion. A notre avis cependant, elles ne sont pas suffisantes pour l'emporter sur les arguments que nous avons donnés à l'encontre de la théorie de l'expansion.

B. HYPOTHÈSE DE CAREY.

Dans la première partie, nous avons exposé le principe de la théorie de CAREY sur l'expansion de la Terre ; nous en ferons maintenant la critique, comme nous venons de le faire pour la théorie d'ÉGYED.

A l'appui de sa thèse, CAREY envisage de nombreux exemples choisis dans différentes parties du globe. Nous ne croyons pas devoir nous attarder à l'examen de chacun d'eux. Nous nous arrêterons seulement à deux cas particuliers : l'orocline de l'Alaska en Amérique du Nord et régions arctiques, ensuite la structure complexe avec divers oroclins de la Méditerranée occidentale comprenant les Alpes, les Apennins et les chaînes d'Espagne.

a) Considérons le cas de l'*orocline de l'Alaska* (Fig. 43). Comme on peut s'en rendre compte par l'examen d'une carte géologique, les chaînes de la bordure orientale du Pacifique changent brusquement de direction à hauteur du 60^{me} parallèle nord ; c'est là l'orocline de l'Alaska. La bissectrice de l'angle formé par ces deux parties de la chaîne passe à peu de distance du pôle nord, elle est ainsi très proche de l'axe du « Bassin Canadien », c'est-à-dire de la partie de l'Océan Arctique s'étendant entre la côte de Sibérie, l'Archipel Canadien et la crête Lomonosov.

Quand on tient compte de la nature probable du fond du Bassin Canadien, comme de la structure géologique des terrains situés en bordure, on ne manque

⁽¹⁾ G.P.L. WALKER, *Evidence of crustal drift from Icelandic Geology. Symposium on Continental Drift*, Royal Society of London, 1965.

pas d'être frappé par l'analogie structurale avec l'Océan Pacifique. Nous répétons à ce propos une phrase tirée d'un article antérieur ⁽¹⁾.

« ...je vois dans l'Océan Arctique ou plus exactement dans le Bassin Canadien, le prolongement direct du Pacifique au-delà du détroit de Behring. L'histoire de ces deux parties du globe est identique au cours des périodes géologiques ; la répartition des masses structurales en bordure est la même d'un côté comme de l'autre ; leur fond est aussi de nature lithologique semblable ».

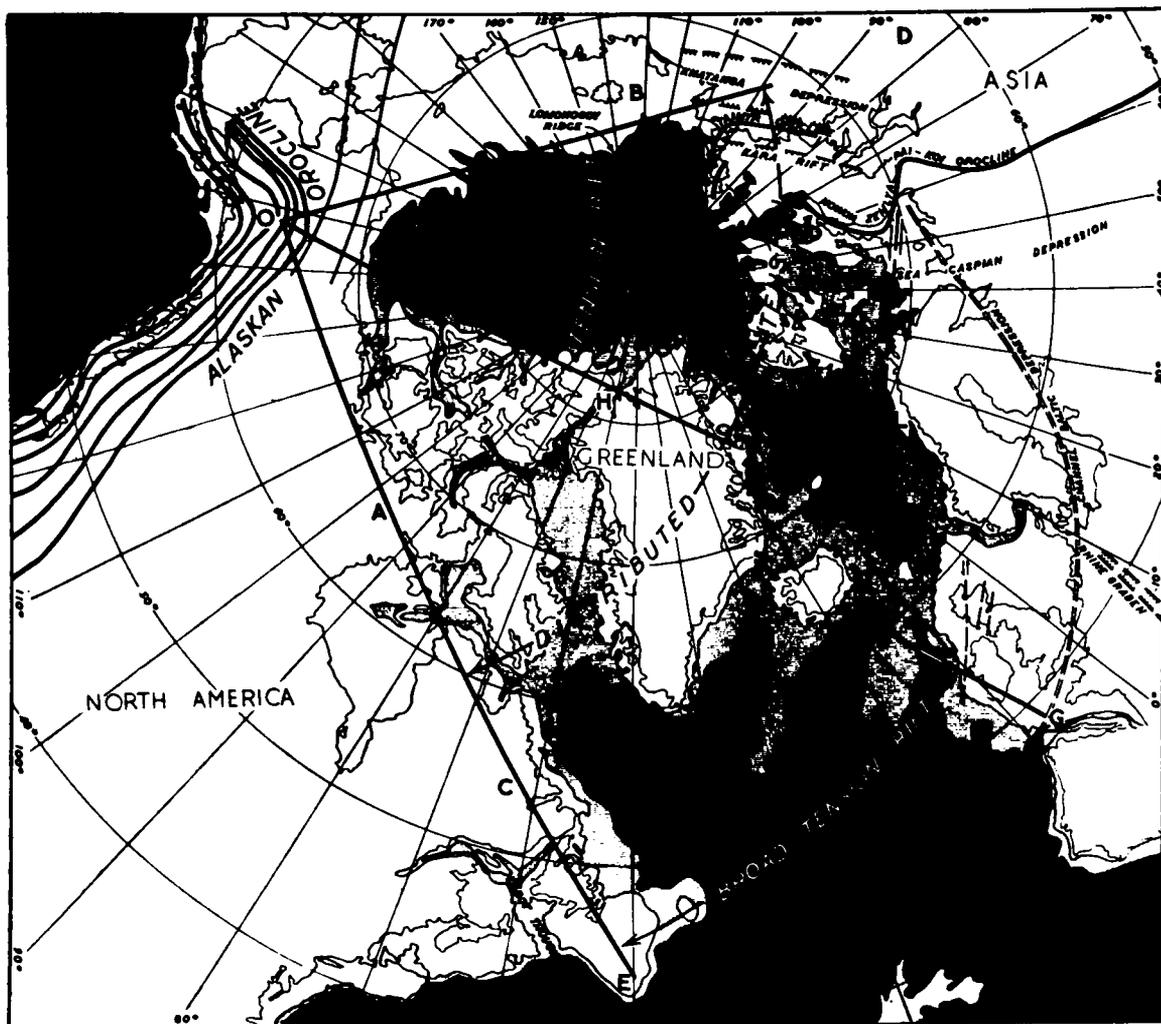


FIG. 43. — L'orocline de l'Alaska, d'après S.W. CAREY.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'Auteur.)

Sur la base de ces données deux hypothèses sont à envisager : ou bien l'Océan Arctique ou tout au moins le Bassin Canadien est un trait extrêmement ancien de la surface de la Terre ; le fond du Bassin Canadien appelé aussi Plate-forme hyperboréale, représenterait un massif, rigide depuis l'Archéen, sur les bords duquel

⁽¹⁾ P. FOURMARIER, *La géologie de l'Arctique d'après quelques publications récentes. Comparaison avec l'Antarctique*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belgique, 5^e sér., t. XLIX, n° 10, 1963.

se sont modelées les déformations récentes ; ou bien il convient d'y voir le résultat d'une déchirure de l'écorce terrestre s'élargissant progressivement pour découvrir le sima sur une surface grossièrement triangulaire (Sphénochasme) correspondant à l'étendue de l'Océan Arctique, mouvement centré sur l'orocline de l'Alaska. D'après CAREY, l'ouverture de l'Atlantique et sa séparation de l'Eur-Afrique serait en relation étroite avec cette déformation.

Nous ferons observer que, dans l'axe du sphénochasme arctique supposé, se trouvent les oroclines de la Nouvelle Zemble et de l'Oural. Un examen, peut-être trop sommaire, de la carte (fig. 5 du mémoire de CAREY) donne l'impression qu'une compression s'est exercée sur la distance comprise entre l'Alaska et le nord de l'Oural, ce qui paraît, à première vue, en contradiction avec l'hypothèse d'une expansion généralisée de la croûte terrestre conduisant aux modifications progressives de la longueur du rayon terrestre imaginées par CAREY.

Pour ce qui concerne l'Océan Arctique, nous croyons utile de rappeler ce qu'a écrit à son sujet l'auteur du présent ouvrage ⁽¹⁾ :

« A première vue l'Océan Arctique paraît être en connexion plus étroite avec l'Atlantique et cela d'autant plus que la crête médiane de ce dernier s'y prolonge si l'on se reporte au travail de HEEZEN et EWING... Il convient cependant de tenir compte des rides du fond marin entre la crête Lomonosov et le continent européen, y compris celle marquée par l'alignement des îles du Spitzberg à la Severnaya Zemlya. Comme cette dernière, les autres rides sous-marines correspondent selon toute probabilité à des orogènes formés de matériel sédimentaire, de nature sialique par conséquent, en opposition avec la constitution possible du fond du Bassin Canadien. Elles constituent une séparation tectonique entre cette vaste dépression et l'Atlantique nord.

« La présence de ces crêtes bien ordonnées nous paraît constituer un obstacle à la théorie de la dérive ; elle rend peu admissible un déplacement relatif suivant les thèses proposées, au moins depuis l'aurore des temps paléozoïques ».

C'est une impression analogue que donne l'examen des tracés proposés par CAREY pour la région de l'Inde comprise entre le « Punjab Orocline » et le « Beloutchistan Orocline » ⁽²⁾, si l'on tient compte notamment du redoublement considérable supposé par l'auteur dans la chaîne himalayenne.

D'après un travail récent du professeur E.R. DEUTSCH de la Memorial University of Newfoundland (Canada), les mesures du paléomagnétisme semblent être en faveur de la conception de CAREY sur les oroclines, notamment en Alaska ⁽³⁾.

b) Nous allons aborder maintenant le domaine de la Méditerranée occidentale et régions adjacentes, y compris le golfe de Biscaye.

⁽¹⁾ P. FOURMARIER, *La géologie de l'Arctique d'après quelques publications récentes. Comparaison avec l'Antarctique*, Bull. Cl. Sc. Acad. roy. Belgique, 5^e sér., t. XLIX, n^o 10, 1963, pp. 1104-1105.

⁽²⁾ Voir fig. 36 a et b de son article paru dans le compte-rendu du symposium de Tasmanie.

⁽³⁾ *The rock magnetic evidence for continental Drift*, The royal Soc. of Canada. Spec. publ., n^o 9, 1966.

La reconstitution des chaînes méditerranéennes avant la production des oroclins, entraînant notamment le rapprochement des deux rives du golfe de Gascogne (fig. 45), apparaît sans doute trop simpliste. Il ne nous est pas possible d'entrer ici dans un long exposé ; nous sommes persuadés néanmoins que les géologues qui ont parcouru ces régions hésiteront à se rallier aux tracés imaginés par CAREY ⁽¹⁾, notamment en ce qui concerne les relations originelles entre les Carpathes, les Alpes et l'Apennin.

Nous croyons devoir rappeler ici que, dans une publication récente, Georges DUBOURDIEU a encore souligné la continuité entre l'arc rifain du Maroc et les chaînes du Sud de l'Espagne. Il écrit à ce propos ⁽²⁾ :

« Les cordillères bétiques et le Rif bordent les deux côtes de la Méditerranée, mais ces montagnes ne se prolongent pas sous l'Océan Atlantique, par des rides sous-marines ; elles n'ont aucune relation avec les reliefs immergés situés plus à l'ouest entre Madère et Lisbonne. Les chaînes bétiques et rifaine s'incurvent au contraire l'une vers l'autre pour se raccorder vers Gibraltar et constituer ainsi un seul ensemble orographique dessinant une épingle à cheveux. Le système alpin a, de ce fait, *une extrémité occidentale fermée.* »

C'est donc bien par erreur que, dans sa reconstitution de la Pangée, T. WILSON place l'Espagne à hauteur de l'extrémité orientale de la Tunisie, comme nous l'avons déjà signalé.

Nous ajouterons que M. le professeur W. VAN LECKWIJCK qui a une expérience personnelle de ces régions, nous a fourni quelques indications complémentaires :

« ...dès les temps jurassiques, le sud de l'Espagne, le nord du Rif et la Méditerranée Occidentale qui les sépare actuellement faisaient partie d'un même ensemble qu'on ne peut dissocier. Pour le Jurassique supérieur (Malm) le doute n'est guère permis. »

Notre distingué confrère ajoute que la question est moins claire pour les terrains antérieurs au Jurassique et surtout pour le Paléozoïque. Il termine en disant : « Quant au Paléozoïque inférieur au Permien, il n'affleure nulle part en Tunisie. Je ne vois donc pas sur quels arguments positifs TUZO WILSON appuie sa thèse. Les rares données qu'on possède sont plutôt en défaveur de sa théorie. »

C'est, à notre avis la même erreur qu'a commise le Dr. DEARNLEY dans les reconstitutions qui accompagnent son article paru récemment dans le périodique *Nature* ⁽³⁾.

Nous renvoyons également le lecteur à un travail récent publié par le professeur LLOPIS LLADO, de l'Université de Madrid ⁽⁴⁾. Il ressort de son exposé que les

(1) L'examen de la figure 105 (page 162) de la nouvelle édition de l'ouvrage : *Principles of physical geology*, de A. HOLMES est des plus instructive à cet égard.

(2) G. DUBOURDIEU, *Sur les forces géologiques*, C. R. Acad. Sc. Paris, t. CCLIX, n° 25, 21 décembre 1964, p. 4750.

(3) R. DEARNLEY, *Orogenic fold-belts, convection and expansion of the Earth*, *Nature*, vol. 206, n° 4991, 26 juin 1965.

(4) N. LLOPIS LLADO, *Sur la paléotectonique des Asturies et des rapports avec la moitié occidentale de la péninsule ibérique*, Boletín del Instituto de Estudios Asturianos (Suplemento de Ciencias), Oviedo, 1964.

N. LLOPIS LLADO, *Cinématique marginale des bassins sédimentaires et sédimentation carbonifère*, C. R. cinquième Congrès intern. de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère, septembre 1963, Paris, 1964.

chaînes asturiennes sont en connexion étroite avec les Pyrénées ; il paraît peu probable qu'il n'en fut pas toujours ainsi ; il est difficile dans ces conditions, de se rallier à l'opinion de CAREY quant à l'ouverture du golfe de Biscaye. L'allure des dépôts sédimentaires postpaléozoïques de l'Aquitaine ne peut pas être invoquée à l'appui de la production d'un sphénochasm à cet endroit du continent européen.

Remarques. a) En s'appuyant sur l'observation des rides médianes des océans, BRUCE C. HEEZEN croit trouver des arguments en faveur de la thèse de l'expansion.

Par contre, W. Maurice EWING, d'après la forme même de ces rides dans leur profil transversal, estime que ces reliefs sont en relation avec des courants de convection ascendants.

D'autre part, nous avons souligné ce fait, que les rides sous-océaniques sont essentiellement caractéristiques des grands fonds ; elles ne semblent pas avoir de prolongement de quelque nature que ce soit sur le domaine continental. Faut-il y voir un argument en faveur de l'expansion ? Sans doute la forme même de leur profil transversal peut-il inciter à accepter cette manière de voir, au moins en partie. Il n'en est pas moins vrai qu'elles ne peuvent pas rendre compte de l'étendue en largeur des bassins dont elles suivent la ligne axiale.

b) D'après TUZO WILSON ⁽¹⁾ l'hypothèse de l'expansion permet d'expliquer bien des faits de la surface de la Terre, sans constituer une preuve par elle-même. Sa cause peut être cherchée dans un changement de phase à l'intérieur de la Terre ou peut-être à une différenciation du noyau et du manteau. Il admet que le changement de courbure dû à l'expansion doit faciliter la formation des montagnes suivant une ligne de compression au-dessus d'une surface neutre alors qu'il y a extension en-dessous de cette surface. C'est évidemment là une réponse, partielle tout au moins, à l'une des objections que nous avons présentées ci-avant. Il ajoute encore en faveur de l'expansion que si les continents s'étaient accrus sur un globe en voie de contraction les océans auraient fini par les inonder.

A ce propos, il est bon de faire remarquer que, dans un cas semblable, les bassins océaniques auraient pu s'approfondir tandis que se soulevaient les continents, ce qui est admis par diverses personnalités du monde géologique.

c) Nous rapporterons encore une réflexion de A. HOLMES : L'expansion et les courants de convection peuvent manifester leurs effets simultanément.

En s'appuyant sur les observations faites dans un territoire d'étendue limitée, comme l'Écosse, HOLMES ⁽²⁾ attire l'attention sur un fait de grand intérêt : Durant les 500 derniers millions d'années, il y eut dans cette partie de l'Europe une activité volcanique intense à l'Ordovicien, au Dévonien, au Carbonifère et au Tertiaire inférieur. Durant les périodes de non activité volcanique, la Terre

⁽¹⁾ TUZO WILSON, *Some consequences of Expansion of the Earth*, Nature, vol. 185, pp. 880-882, 1960.

⁽²⁾ A. HOLMES, *op. cit.*, p. 967.

peut s'être refroidie et contractée, tandis qu'elle se dilatait au cours des phases d'activité éruptive. En étendant cette notion au globe tout entier, en voie d'expansion, on peut imaginer des fluctuations locales d'expansion et de contraction. Dans le manteau, la cause en serait due à la convection ; dans la croûte elle serait en relation avec l'activité volcanique.

d) En adoptant la thèse de l'expansion on est forcément amené à rejeter par le fait même la conception de la dérive wegenérienne. En effet, serait-il possible d'imaginer qu'une telle expansion ait débuté il y a tout au plus 200 millions d'années pour permettre l'élargissement d'une fissure devenant progressivement l'Océan Atlantique ? il en serait ainsi également pour d'autres fractures amenant la genèse de l'Océan Indien. Une telle conception ne cadrerait pas, d'ailleurs, avec ce que nous apprend la bordure du Pacifique dont toute l'évolution géologique est orientée par la présence de cet océan. Et cela d'autant plus que les formations géologiques longeant les côtes du Pacifique s'incurvent pour contourner les boucliers du Brésil, du Canada, de l'Australie, de la Sibérie, esquissant déjà la forme des océans s'étendant aujourd'hui en bordure de ces massifs datant du Précambrien.

CHAPITRE XIII

RÉFLEXIONS A PROPOS DE LA DISPOSITION SYSTÉMATIQUE DES MASSES CONTINENTALES

Dans la première partie, nous avons attiré l'attention du lecteur sur l'arrangement systématique des grandes unités structurales de la croûte terrestre (chapitre V). Nous nous posons maintenant la question de savoir si, en présence de ces données, il convient d'envisager avec plus de faveur la thèse du mobilisme plutôt que celle du fixisme. En d'autres termes, les arguments développés dans la seconde partie de ce rapport sont-ils en accord ou en désaccord avec l'arrangement harmonieux des continents tel que nous l'avons fait connaître ?

Pour ce qui concerne l'hémisphère nord, il semble bien qu'il soit assez commode de trouver une explication au déplacement différentiel des pôles d'autrefois suivant que les mesures paléomagnétiques sont faites sur les roches de deux continents ou même de deux parties d'un même continent. Le soulèvement des orogènes avec leurs charriages, le glissement horizontal le long des grandes failles de décrochement, et même le jeu d'oroclines éventuels paraissent les facteurs essentiels des anomalies relevées dans l'emplacement des pôles.

La différence relevée dans le tracé des trajectoires du pôle suivant que l'on considère l'Amérique du Nord et l'Europe ou bien l'Asie et l'Amérique, nous porte à croire que cette situation est très ancienne et que les forces en action ont toujours agi à peu près dans le même sens durant les périodes géologiques sans changer pour cela la disposition relative des grands massifs continentaux, sans nécessiter tout au moins le glissement en masse d'un continent par rapport à ses voisins.

Serait-il admissible que la situation ait été tout autre dans l'hémisphère sud ? Laissons même de côté la question de l'Atlantique entre l'Afrique et l'Amérique méridionale. C'est surtout dans les positions successives assignées aux terres qui encadrent l'Océan Indien que git la différence. Aussi est-on en droit de se demander s'il n'y a pas là une erreur de base. Nous avons essayé de montrer que la paléogéographie fournit des arguments solides pour ne pas admettre un déplacement de l'Inde péninsulaire si ce n'est celui dû au plissement des chaînes himalayennes et à la production de fractures radiales et aulacogènes ⁽¹⁾ (graben, fosses ou sillons

(1) Voir à ce sujet l'article : A.A. BOGDANOFF, M.V. MOURATOV et V.E. KHAIN, *Éléments structuraux de la croûte terrestre*, Rev. Geogr. Phys. et Geol. Dynam., vol. V, fasc. 4, Paris, 1963.

longs et étroits) dont l'existence ne paraît pas douteuse en bordure et à l'intérieur de ce massif rigide datant du Précambrien.

Il en est de même sur le fond de l'Océan Indien, si l'on en juge d'après la carte de B.C. HEEZEN et Marie THARP.

Nous avons rappelé les arguments de TEICHERT à propos de l'Australie et de l'Océan Indien ; nous avons rapporté aussi l'opinion du professeur AVIAS sur les relations probables entre ce continent et les terres de l'ancienne Téthys. Dans ces conditions est-il admissible de penser que l'Australie ait été le jeu des mouvements complexes auxquels divers savants croient devoir faire appel ?

Il n'est pas douteux que la symétrie n'est pas parfaite entre les masses situées de part et d'autre de l'ancienne Mésogée. Nous nous en sommes expliqué dans la première partie. Nous avons complété à ce sujet les considérations que nous avons exposées autrefois ⁽¹⁾. Nous avons cherché notamment à tenir compte de l'objection présentée par VON BUBNOFF à la conception d'une disposition symétrique par rapport à l'axe de la Mésogée.

Il y a certes des différences marquées entre les deux hémisphères notamment dans la forme des continents et dans l'extension des bassins océaniques. La présence du continent antarctique, s'opposant à l'Océan Arctique est aussi un fait important ; l'Océan Indien n'a pas davantage son équivalent dans l'hémisphère nord (Fig. 46).

Dans la première partie du rapport nous avons signalé un fait remarquable à ce propos : la région de la Téthys ne coïncide pas avec l'équateur (Fig. 46) ; elle est située au nord de celui-ci ; elle est marquée entre les deux Amériques par une inflexion remarquable des plis récents pour former l'arc des Antilles. On trouve une disposition identique dans l'hémisphère sud entre l'Amérique méridionale et l'Antarctique. On a l'impression que la distribution des masses dans l'hémisphère sud, plus proches de l'équateur, a eu pour effet de faire naître entre l'Amérique, l'Australie et l'Antarctique une sorte de sillon équivalent de la Téthys.

Malgré ces différences entre les deux hémisphères on ne peut guère penser à un déséquilibre important des masses continentales de part et d'autre du sillon mésogéen, car si nous comparons la surface des continents de l'hémisphère nord à celle des terres de l'hémisphère sud, nous trouvons en chiffres ronds près de 78.000.000 de kilomètres carrés dans le premier cas et 70.000.000 dans le second.

D'autre part, nous avons souligné ce fait d'importance capitale : La longue suite des rides médianes des grands océans qui intéresse l'Atlantique, le Pacifique, l'Océan Indien est partout déplacée par les grands décrochements horizontaux reconnus sur les fonds océaniques. Comme nous l'avons montré, il y a beaucoup de probabilité en faveur de leur grande ancienneté. L'Océan Indien ne fait pas exception à la règle ; c'est là un argument en faveur de sa permanence.

⁽¹⁾ P. FOURMARIER, *Essai sur la probabilité de l'existence d'une règle de symétrie dans l'Architecture de l'écorce terrestre*, Acad. roy. Belgique, Classe des Sciences, Mém. in 8°, 2^e sér., tome XI, 1930.

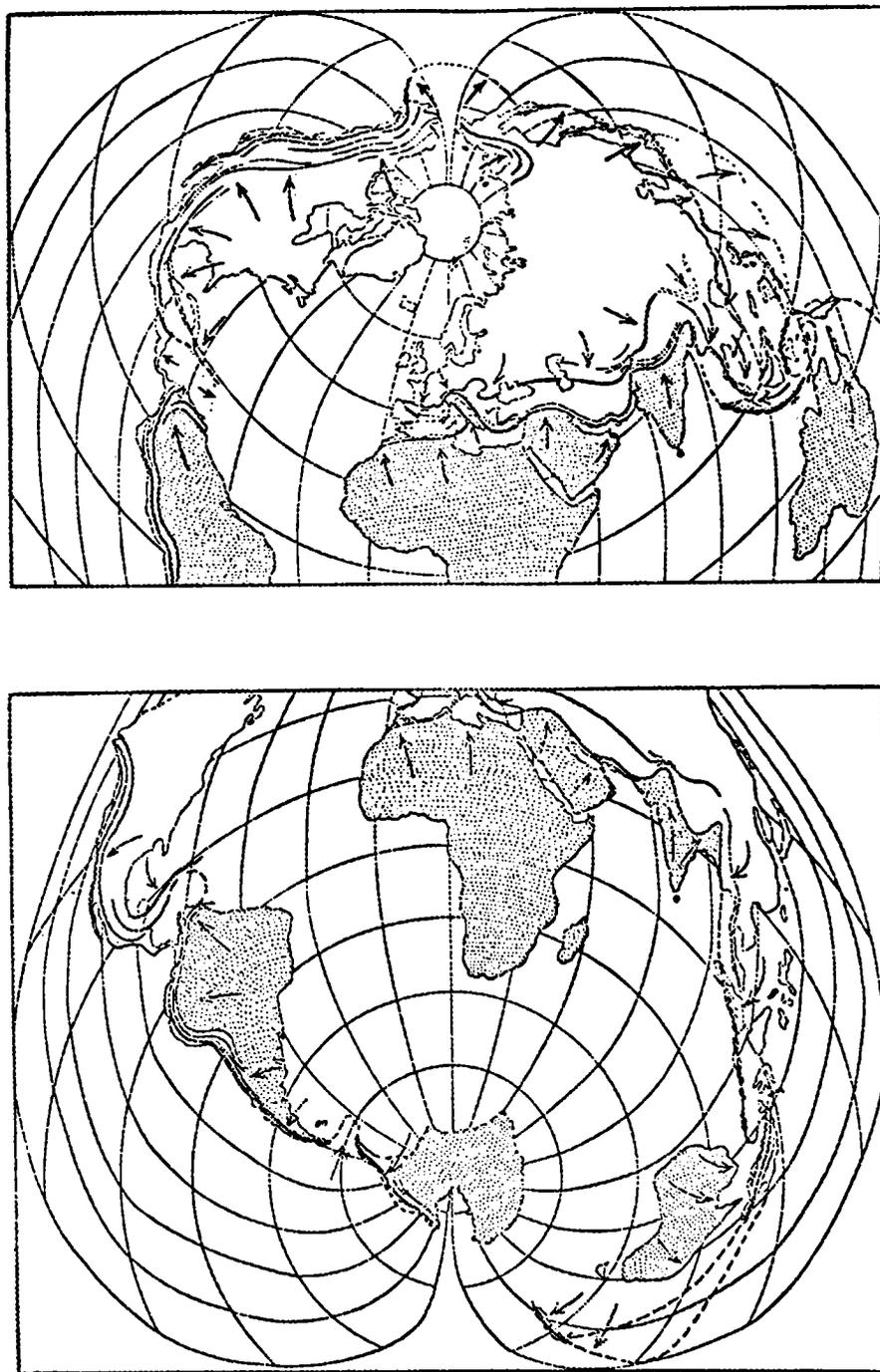


FIG. 46. — La comparaison des deux hémisphères, d'après A. HOLMES.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).

Nous ajouterons encore une remarque que nous avons relevée dans le résumé d'un article présenté le 18 novembre 1964 à la Geological Society of London, par PAMELA L. ROBINSON et A.J. SMITH ; nous en reproduisons le texte :

“ In most countries that have been investigated geologically, continental sedimentation occurred as isolated episodes in a predominantly marine sequence. In India, as in the Southern Hemisphere continents, there is a whole series of continental rocks representing a long time-sequence of the order of 100 m.y. ”.

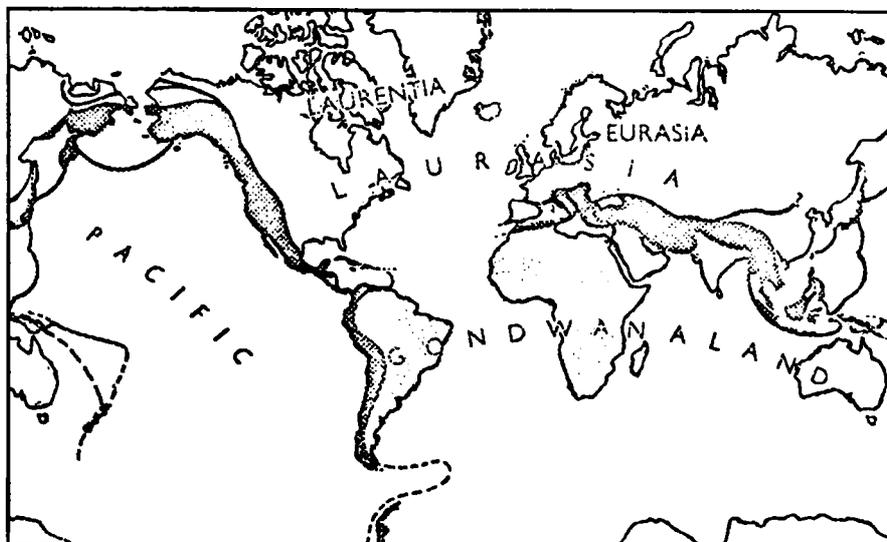


FIG. 47. — La répartition des déformations récentes suivant la Téthys et la bordure du Pacifique, d'après HOLMES, 1965.

(Figure reproduite avec l'autorisation de l'éditeur).

C'est certainement là un fait remarquable. Cependant il convient de n'en tirer des conclusions qu'avec circonspection. Nous avons montré, en effet, que les formations de Gondwana-Karoo auxquelles ces auteurs font allusion n'ont pas partout le faciès purement continental ; en bien des endroits on y trouve des intercalations marines ; nous avons souligné cette observation importante à savoir que ces variations de faciès sont en liaison étroite avec la forme générale des continents actuels ; nous avons vu dans cette observation un argument à l'appui de la thèse de la permanence. C'est, par contre une indication pour mettre en doute l'existence, à cette époque du continent de Gondwana tel que l'imaginait Édouard SUESS, s'étendant d'un seul bloc de l'Amérique du Sud à l'Australie.

Certes il n'existe pas, dans l'hémisphère nord, des formations à faciès continental couvrant de vastes étendues à l'époque du Permo-Carbonifère. Cependant les bassins houillers de l'Amérique, de l'Europe, de l'Asie où dominent aussi les caractères continentaux, du Namurien au Stéphanien ne sont-ils pas la réplique des dépôts continentaux de Gondwana avec un léger décalage dans le temps ? La durée des périodes, qu'il s'agisse de l'hémisphère nord ou des dépôts un peu plus récents de l'hémisphère sud, ne diffère pas énormément.

L'argumentation de ROBINSON et SMITH ne paraît pas devoir emporter la conviction dans un sens plutôt que dans l'autre.

Une autre remarque s'impose.

Dans la reconstitution du continent de Gondwana proposée par LESTER KING et T.W. DOWNARD, l'Antarctique occupe une position centrale par rapport à la Pangée telle que la conçoivent ces deux auteurs. La chaîne des Andes se prolonge directement par les plis récents de l'Antarctique occidentale qui se continuent tout naturellement par ceux de la Nouvelle Zélande.

On voudra bien reconnaître que sans modifier la distribution actuelle des continents on arrive au même résultat si l'on veut bien se reporter à des tracés antérieurs, peut-être un peu trop schématiques il est vrai ⁽¹⁾.

Parmi les travaux récents sur la règle de permanence des domaines continental et océanique, il y a lieu de signaler encore la note présentée à la XXI^e Session du Congrès géologique international par GORDON GASTIL ⁽²⁾. Cet auteur arrive à la conclusion suivante :

“ Considering the earth as a whole, mineral date evidence tends to refute the supposition that the sialic basement of continent margins is younger than that of continents interior, and fails to confirm the idea that areas of long stability correspond to continental or oceanic centers, The continent-ocean subdivision of the earth's surface appears to be older than geologic records and to have only passive relations to crustal mobility ”.

Les adversaires de la permanence des traits dominants de la face de la Terre ne manqueront pas de faire observer qu'une telle constitution des continents n'est pas en opposition avec la théorie mobiliste de WEGENER.

Néanmoins, en tenant compte de l'harmonieux arrangement des structures, peut-on imaginer une différence dans l'évolution des deux hémisphères, telle que l'exige la théorie de la dérive, c'est-à-dire d'une part déplacements modérés et continus depuis le Précambrien dans le nord par le simple jeu des déformations géologiques de la croûte ; d'autre part des déplacements désordonnés dans le sud, avec les mouvements de rotation imaginés pour l'Australie, Madagascar et pour l'Antarctique, avec même un glissement de 80° en latitude de l'Inde péninsulaire en face de l'Himalaya et de l'Arabie ?

Nous ne voudrions pas clore cette revue sommaire sans rappeler que WARREN S. CAREY a été, lui aussi, frappé par la disposition symétrique des unités géologiques par rapport à certains axes méridiens, notamment celui du Pacifique et celui de l'Atlantique ⁽³⁾.

Dans la première partie (chapitre V) nous avons fait observer que la disposition réciproque des continents actuels n'est pas l'effet du hasard, mais l'aboutisse-

(1) P. FOURMARIER, *La géologie de l'Arctique d'après quelques travaux récents. Comparaison avec l'Antarctique*, Bull. Acad. roy. Belg., Cl. Sc., 5^e série, t. XLIX, 1963, n° 10. Voir spécialement la figure 4.

(2) G. GASTIL, *Continents and mobile Belts in the light of mineral dating*, Congr. geol. intern., XXI^e session, Copenhague, 1960, section G (voir p. 74 des résumés).

(3) S.W. CAREY, *op. cit.*, Hobbart, 1958, p. 344.

ment de phénomènes ayant agi durant toute l'histoire géologique de la Planète, conformément à une règle toujours identique à elle-même. Nous avons insisté aussi sur la forme en S des axes des continents et des océans et nous avons rappelé, d'après R.A. DALY, l'explication de cette disposition suivant les vues de JARDETSKY :

Si celles-ci sont valables, une telle forme des axes doit remonter très loin dans le Passé. Il est bon d'ajouter que la forme de l'axe mésogéen, correspondant à la mer épicontinentale de la Téthys, ne suit pas l'équateur et ne lui est pas parallèle ; elle s'incurve systématiquement pour suivre l'inflexion des axes méridiens en rapport avec la forme en S de ceux-ci.

Toutes ces coïncidences ne sont évidemment pas fortuites. On peut se demander s'il ne faut pas voir là un argument en faveur du fixisme plutôt que du mobilisme, le terme fixisme étant pris dans un sens relatif. Il ne convient pas, en effet, de lui donner un sens absolu, car il y a lieu de tenir compte du déplacement de vastes blocs de la croûte terrestre par le simple jeu d'interventions géologiques normales telles les plissements et surtout les grandes failles de décrochement.

Cette conclusion paraît surtout s'imposer si l'on a en vue la conception de la dérive suivant WEGENER et ses continuateurs, aux dépens d'une Pangée dont la dislocation se serait faite à une époque récente, remontant tout au plus à 150 ou 200 millions d'années.

En 1951, l'auteur du présent mémoire s'exprimait comme suit dans une conférence faite devant la Société belge de Géographie (1).

« Cette disposition d'ensemble, si magnifiquement ordonnée, complète l'impression que l'évolution de la croûte superficielle de la Terre s'est faite suivant un plan d'ensemble, dont les traits les plus saillants étaient fixés dès la phase première de l'histoire géologique du globe ».

(1) P. FOURMARIER, *L'Antarctide et l'évolution géologique de la surface du globe*, Bull. Soc. roy. belge de Géographie, 75^e année, 1951.

TROISIÈME PARTIE

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

A la suite de ce long exposé, nous nous efforcerons de tirer quelques conclusions d'ordre général.

Rappelons tout d'abord que l'on se trouve en présence de trois hypothèses pour ce qui concerne l'évolution de la croûte terrestre au cours des périodes géologiques :

1. Le fixisme, c'est-à-dire la permanence dans l'emplacement relatif des masses continentales.
2. Le mobilisme intégral ou dérive au sens de WEGENER.
3. La dislocation d'une croûte originelle par l'expansion de la planète suivant les vues de ÉGYED ou de W.S. CAREY.

On peut faire valoir des arguments en faveur ou en défaveur de chacune de ces trois conceptions.

1. L'HYPOTHÈSE DU FIXISME.

Jusqu'au moment où TAYLOR et WEGENER exposèrent leurs théories mobilistes, la notion de la permanence dans la position relative des masses continentales était acceptée sans conteste par la plupart des géologues.

Par l'étude de plus en plus poussée de la structure de l'écorce terrestre, tant sur les fonds océaniques que sur les continents, compte tenu des grandes zones de plissement et du réseau des failles radiales, on devait arriver à la notion du fixisme *relatif*. Si, dans ses traits essentiels la face de la Terre reste inchangée, il s'est produit néanmoins au cours des temps des déplacements relatifs de vastes blocs les uns par rapport aux autres. Le fixisme ne peut donc pas être pris dans un sens absolu.

Les mesures du paléomagnétisme ont mis en évidence la non concordance dans l'emplacement du pôle magnétique suivant que les mesures sont faites au moyen de roches prélevées sur des continents différents séparés par l'Océan (Europe et Amérique, par exemple), voire même sur deux parties différentes d'un même continent, comme c'est le cas pour l'Amérique du Nord.

Ceci conduit à croire que les plissements et surtout les grandes failles de décrochement peuvent être rendus responsables de l'anomalie observée dans les emplacements du pôle magnétique, sans qu'il soit nécessaire de faire appel à la dérive des blocs continentaux glissant librement sur un substratum de moindre rigidité.

La notion du fixisme absolu doit certainement être abandonnée, au profit d'une théorie plus souple. Sans rejeter la notion d'un arrangement relativement stable des continents les uns vis-à-vis des autres, il convient de se rallier plutôt à l'idée de déplacements relatifs en rapport avec les phénomènes normaux de l'évolution géologique, sans qu'il faille pour cela déplacer les continents sur des distances considérables et les joindre en une terre unique dénommée Pangée.

A ce propos, nous croyons devoir revenir une fois de plus sur une observation déjà faite antérieurement : Dans la plupart des reconstitutions de cette Terre unique, il est admis que sa dislocation pour amener la croûte terrestre dans son état actuel s'est faite il y a environ 200 millions d'années. On peut à bon droit s'étonner que la Pangée ait été stable pendant une si longue durée et ne s'est fragmentée qu'à une époque bien proche des temps actuels.

Faut-il admettre qu'il y eut diverses Pangées successives qui se sont brisées les unes après les autres ? Aucun argument n'a pu être avancé jusqu'ici en faveur d'une telle hypothèse.

En faveur de la thèse de la permanence *relative* dans la distribution des terres et des mers nous avons fait valoir l'argument de l'arrangement systématique des masses continentales par rapport à certains axes d'allure sensiblement méridienne ou bien orientés suivant les parallèles. Nous avons renforcé cet argument en considérant la forme en S si remarquable, des axes des océans comme des axes des masses continentales.

Il semble rationnel d'admettre qu'un tel arrangement si harmonieusement ordonné n'a pas pu prendre naissance il y a seulement 200 ou même 300 millions d'années à l'occasion de la dislocation d'une Pangée hypothétique. Il paraît assez vraisemblable que la forme en S doit remonter à une époque très ancienne, alors que se formaient les noyaux des continents primitifs.

Or cette courbure des axes est intimement unie à l'allure d'une autre particularité de la structure de la croûte terrestre : la ceinture mésogéenne, dont la permanence au cours des périodes géologiques est frappante.

En présence de ces faits, on est sans doute autorisé à croire que la distribution des continents telle qu'elle nous apparaît aujourd'hui existe depuis une période extrêmement ancienne, remontant peut-être à l'origine même de la croûte solide du Globe.

Si même il est possible de faire valoir des arguments de poids en faveur d'un fixisme relatif, faut-il pour la cause abandonner toute idée d'un écartement des masses continentales suivant la thèse de la dérive ou celle de l'expansion ?

Cette observation demande réflexion. Il est certain que le jeu normal des déformations de la croûte terrestre apporte déjà une explication des déplacements

relatifs de continents ou de fragments de continents, capables d'expliquer, au moins partiellement, les anomalies relevées dans l'emplacement des pôles magnétiques au cours des temps.

Il nous apparaît cependant que ces dislocations sont insuffisantes à elles seules pour rendre compte de tous les faits constatés. Nous n'en voulons pour preuve que les résultats obtenus par le professeur CREER, que nous avons rappelés ci-avant (page 143).

Les mesures du paléomagnétisme en Amérique du Sud et en Afrique l'ont conduit à admettre que ces deux continents étaient autrefois jointifs. En présence des réserves que nous avons cru devoir faire quant à l'emploi de la méthode basée sur le magnétisme rémanent, nous pensons devoir rester dans l'expectative en ce qui concerne la jonction de ces deux continents avant l'ère mésozoïque.

Si l'on tient compte du réseau serré de failles radiales, de direction sensiblement ouest-est reconnues sur le fond de l'Atlantique sud, on peut se demander si l'on ne peut pas rendre compte, par le jeu le long de ces fractures, d'un certain déplacement des deux continents. Cette intervention serait admissible car elle fait appel à des phénomènes géologiques normaux.

La présence de ces failles de décrochement peut se comprendre sans qu'il soit nécessaire d'admettre un accollement des deux continents encadrant l'Atlantique sud. On sait aujourd'hui que ces cassures déplacent la crête médiane de l'Atlantique ; or nous avons de bonnes raisons de croire à la grande ancienneté de ce vaste réseau des crêtes médianes intéressant tous les Océans. On peut penser qu'on se trouve en présence d'un dispositif bien antérieur à l'époque admise par WEGENER pour la dérive des continents.

2. L'HYPOTHÈSE DE LA DÉRIVE.

Dans la deuxième partie de cet ouvrage, nous avons envisagé tout spécialement la théorie de la Dérive prônée par WEGENER et ses adeptes. Elle eut, en effet, au cours de ces dernières années un regain de faveur à la suite des résultats obtenus dans l'étude du paléomagnétisme. Il s'agit sans nul doute d'une thèse fort attrayante, mais résiste-t-elle à un examen approfondi des faits d'observation ?

Par l'examen critique des données de la géographie et de la géologie stratigraphique, il nous est apparu que la séparation de l'Amérique du Sud et de l'Afrique par l'élargissement progressif d'une grande fracture, c'est-à-dire l'un des points fondamentaux de la théorie wegenérienne est, pour le moins sujette à caution. Il ne peut certainement pas être question de l'ouverture progressive du Sud vers le Nord de cette grande déchirure de la Pangée, depuis le Crétacé dans le sud jusqu'au Cénozoïque dans le nord. Il y a, en effet, des preuves manifestes de l'existence d'un océan entre l'Europe et l'Amérique septentrionale à l'époque du Trias.

D'autre part, l'Atlantique sud avait chance d'exister avant le Crétacé si l'on en juge par la distribution des facies en bordure des continents sur les deux rives de cet océan.

Un fait troublant a retenu notre attention : Les dépôts formés sur les grands fonds de tous les océans et qui sont restés dans leur position originelle, ne paraissent pas être plus anciens que le Crétacé. S'il n'en était pas ainsi dans le Pacifique, on trouverait là un argument décisif en faveur de la dérive wegenérienne. Il semble bien pourtant que le Pacifique se trouve dans la même situation que l'Atlantique et l'Océan Indien. L'explication de ce fait ne nous apparaît pas clairement ; on peut y trouver cependant un argument en faveur de la permanence.

Le décalage dans l'emplacement du pôle magnétique suivant qu'il est établi d'après les roches d'Europe ou d'Amérique du Nord paraît être, à l'heure actuelle, l'argument le plus probant en faveur de la Dérive au sens de WEGENER. On peut présenter à cela une double objection : tout d'abord la discordance dans l'emplacement des pôles remonte bien plus loin dans le passé que l'époque fixée par WEGENER pour la séparation des deux continents ; d'autre part, les observations faites sur le magnétisme rémanent de roches de l'ouest des États-Unis et de l'est de ce même pays mettent en évidence, comme nous venons encore de le rappeler, une non concordance de l'emplacement du pôle magnétique d'un ordre de grandeur comparable à celui relevé entre l'Europe et l'Amérique septentrionale. *Il s'agit cependant d'un même bloc continental.* On doit en conclure forcément que le simple jeu des déformations normales de la croûte terrestre, familières aux géologues, peut être la cause essentielle des discordances relevées dans l'emplacement des pôles à une époque déterminée.

Les résultats des recherches sur le paléomagnétisme dans le vaste continent eurasiatique viennent à l'appui de cette explication. Cependant certaines mesures auxquelles il a été procédé dans l'hémisphère sud nous engagent à être circonspects en la matière.

Sans apporter de preuve décisive en faveur de la théorie de la dérive des continents le paléomagnétisme a permis de l'envisager sous un jour nouveau : s'il y eut réellement dérive au sens de WEGENER ce n'est pas à partir des temps mésozoïques, mais dès l'époque du Précambrien.

Le déplacement des pôles magnétiques étant admis, la question se pose de savoir si les pôles astronomiques se sont déplacés parallèlement et avec la même amplitude au cours des périodes géologiques. L'étude de la distribution des zones climatiques au cours des périodes géologiques nous a paru le moyen le plus propice pour aborder l'examen de cette question.

Il apparaît aujourd'hui que la reconstitution des zones paléoclimatiques ne se fait pas sans de grandes difficultés. Aussi les résultats obtenus par des auteurs différents peuvent-ils être très dissemblables.

Toutefois un résultat important semble acquis : Pendant une partie des temps géologiques, au moins depuis le Paléozoïque moyen, les climats étaient moins

différenciés qu'ils ne le sont à l'heure actuelle et surtout qu'ils l'étaient durant le Quaternaire caractérisé par une extension notable des dépôts glaciaires dans les deux hémisphères. Il est vraisemblable qu'il en fut de même à l'époque de Gondwana caractérisée par un abaissement marqué de la température moyenne, avec extension considérable des dépôts glaciaires dans l'hémisphère sud.

La cause de ces variations dans les conditions climatiques intéressant toute la surface du globe n'est pas encore établie en toute certitude. Il paraît vraisemblable qu'il convient de faire appel en partie tout au moins à des causes extérieures à la Terre, intéressant peut-être tout le système solaire.

Le déplacement des pôles au cours des périodes géologiques tel qu'il est établi par les études sur le paléomagnétisme pourrait peut-être constituer une base de recherche intéressante à ce sujet.

Sans faire appel à la dérive différentielle telle qu'on la conçoit ordinairement, le paléomagnétisme indique la probabilité d'un mouvement d'ensemble de l'écorce et du manteau supérieur par rapport à l'axe de rotation. M. le professeur de Magnée attire à ce sujet notre attention sur le fait suivant : Dans le chapitre consacré à la paléoclimatologie nous avons insisté sur l'uniformité de la flore houillère du Spitzberg jusqu'en Égypte pour le moins ; or la migration des pôles explique très facilement ce fait. En effet, comme au Westphalien le pôle se trouvait quelque part à l'est du Japon, la différence de latitude entre le Spitzberg et l'Égypte était beaucoup plus faible qu'aujourd'hui, même en faisant abstraction de toute dérive différentielle.

Mais il faut pour cela admettre que les déplacements du pôle magnétique au cours des temps ont entraîné un déplacement équivalent du pôle astronomique. On pourrait présenter des objections à cette manière de concevoir les choses.

En liaison avec les données de la paléoclimatologie, nous avons eu à nous occuper des grandes périodes froides qui de façon systématique ont fait leur apparition à des intervalles sensiblement égaux et qui ont laissé des traces sous forme de dépôts glaciaires couvrant parfois des étendues énormes. Celle du Quaternaire est bien connue. Elle peut servir de point de comparaison pour les glaciations plus anciennes. Parmi celles-ci la glaciation de Gondwana est la plus remarquable, car les dépôts tillitiques qu'elle a abandonnés s'étendent sur une surface énorme, jusque sous l'équateur. Aussi n'a-t-on pas manqué de trouver là un argument de choix dans la reconstitution du continent de Gondwana par accolement de l'Amérique du Sud, de l'Afrique australe, de l'Antarctique, de l'Inde péninsulaire et de l'Australie.

Une remarque s'impose cependant : à l'époque de Gondwana les régions boréales étaient exemptes de calottes glaciaires, bien qu'on y trouve des indices d'un abaissement de la température. Jusqu'à présent aucune explication satisfaisante n'a pu être donnée de cette dissemblance entre les deux hémisphères, même si l'on groupe tous les continents en une Pangée unique ⁽¹⁾. Aussi nous ne

(1) Nous avons donné un essai d'explication de cette particularité remarquable aux pages 192 et suiv.

croions pas trouver dans la glaciation de Gondwana une preuve décisive en faveur comme en défaveur de la théorie de la Dérive des Continents.

Nous nous sommes efforcé de trouver dans le domaine de la Paléontologie et de la biologie quelque argument pouvant nous conduire à la solution du problème. Les observations faites dans la partie équatoriale de l'Atlantique semblent en faveur de la dérive ; dans l'Atlantique nord, elles tendent plutôt à établir une permanence dans la forme de l'Océan. Certaines anomalies ont été signalées d'ailleurs, dans la distribution de certaines espèces fossiles. D'autre part les idées acquises sur la migration des êtres vivants au cours des temps anciens est peut-être plus en faveur de la permanence que de la dérive au départ d'une Pangée.

Nous avons ensuite abordé le problème par le moyen des reconstitutions paléogéographiques ; cette voie nous était tout indiquée car des recherches de ce genre s'appuient forcément sur les données de la paléontologie ; la distinction entre les facies marins et les facies continentaux aux époques successives de l'histoire de la Terre, joue en l'occurrence un rôle prépondérant. Encore une fois, nous avons envisagé spécialement la fin du Paléozoïque et le début de l'ère secondaire ; c'est, en effet à ce moment que, suivant la thèse de WEGENER, auraient débuté les grands glissements des continents pour atteindre peu à peu leur emplacement actuel.

Nous devons reconnaître qu'il y a, à ce sujet de grandes divergences entre les auteurs. Toutefois, un examen critique des faits nous semble devoir faire pencher très sérieusement la balance en faveur de la permanence.

Si elle a existé réellement, la dérive doit avoir quelque relation avec les grandes dislocations de la croûte terrestre. Aussi avons-nous cru devoir consacrer un chapitre à la géologie structurale.

L'examen de quelques cas particuliers, spécialement dans l'Atlantique, l'Océan Indien et l'Océan Antarctique nous ont permis d'apporter des données utiles pour la discussion de la valeur des arguments en faveur de la dérive. Mais nous avons envisagé aussi la question d'un point de vue très général. En nous appuyant tout aussi bien sur les résultats des recherches en géophysique qu'en géologie structurale, nous avons quelque raison d'accepter la thèse de BELOUSSOV en ce qui concerne l'action négative des zones plissées sur la possibilité de l'entraînement des masses continentales par dérive au sens de WEGENER. Par contre, comme nous l'avons déjà fait observer à propos du paléomagnétisme, les grandes fractures de décrochement paraissent avoir joué un rôle capital dans les déplacements relatifs de blocs de la croûte terrestre, conduisant à une sorte de dérive mitigée, rentrant néanmoins dans le cadre des phénomènes géologiques normaux ; de telles interventions sont susceptibles de provoquer des mouvements relatifs dans une direction déterminée, mais aussi de modifier l'orientation des isoclines par une sorte de rotation des blocs en mouvement.

C'est le jeu de ce vaste réseau de fractures qu'il convient de rendre responsable pour une bonne part des déplacements relatifs des continents ou de parties de continents mis en évidence par le paléomagnétisme.

On a beaucoup exagéré autrefois la valeur du déplacement horizontal résultant du resserrement apparent qui conduit à l'édification d'une chaîne plissée.

Si l'on en croit BELOUSSOV, les grands orogènes se caractérisent en ordre principal par des mouvements verticaux, en rapport avec la notion d'isostasie.

La substitution d'un matériau basique au matériau sialique profond suivant les vues de ce savant, le phénomène très comparable de la genèse des anorthosites suivant la conception de P. MICHOT ne vont pas sans faciliter grandement les déplacements de fragments de la croûte terrestre dans le sens vertical; la preuve en est donnée pour l'Atlantique nord par les observations de NOE-NYGAARD sur les îles Far-Oër.

Sans vouloir accorder la prépondérance à de tels déplacements il convient d'en tenir compte dans toute étude relative à la Dérive continentale, d'autant plus que les mouvements tangentiels ne semblent pas avoir joué le rôle essentiel qu'on leur attribuait autrefois dans la formation des orogènes.

Nous rappellerons ici l'opinion exprimée par G.J.F. MACDONALD à l'occasion du symposium sur la dérive des continents organisé en 1965 par la Royal Society of London. Le seul mécanisme proposé qui soit capable d'expliquer la dérive est la convection, bien que les déplacements sous-crustaux à grande échelle ne soient pas démontrés.

Et l'auteur conclut :

" In summary, it would seem that both the deep structure of continents and the mechanical properties of the mantle make untenable any hypothesis linking large scale convective currents with continental drift. "

Il convient encore d'insister sur un fait remarquable : La zone mésogéenne, correspondant à une vaste mer épicontinentale pendant toute la durée des périodes géologiques, est étroitement unie à la ceinture tectonique entourant le Pacifique et son prolongement, le bassin canadien ; toutes deux ont évolué de façon comparable au cours des temps au moins depuis le Paléozoïque et même dès le début de cette ère géologique. Cette étroite relation entre deux unités maîtresses de la structure de la croûte terrestre peut être considérée comme favorable à la thèse de la permanence plutôt qu'à celle de la dérive.

Quelques renseignements sur les variations éventuelles de longitude ne nous apportent aucune information utile au sujet de la dérive. On se souvient que WEGENER croyait pouvoir apporter une preuve tangible en faveur de sa théorie par des mesures systématiques de la longitude. Dans la situation actuelle, il semble que l'on n'ait rien à attendre de ce côté.

Nous ajouterons incidemment que les données recueillies par des satellites artificiels lancés à des fins diverses autour de la Terre semblent s'opposer à toute

hypothèse de dérive au moins dans sa forme actuelle, suivant l'avis de Robert R. NEWTON (*Science*, vol. 144, n° 3620, 15 mai 1964). Il est sans doute encore trop tôt pour tirer parti de ces indications à propos du problème du déplacement relatif des continents au cours des périodes anciennes.

On voit par cet exposé qu'il y a des objections très sérieuses à présenter à la théorie de la dérive des continents, telle qu'elle fut proposée par WEGENER. Pendant une grande partie des périodes géologiques, au moins depuis le début du Paléozoïque, l'évolution des masses continentales s'est faite suivant des règles quasi immuables autour de centres qui sont les boucliers et leurs plates-formes. On acceptera sans doute qu'une telle constance correspond à une permanence des contraintes appliquées à la croûte terrestre. Aussi est-on en droit de se demander pourquoi durant l'ère mésozoïque, c'est-à-dire très tard par rapport au début de l'évolution géologique, il se serait produit un bouleversement anormal se traduisant par la dérive au sens de WEGENER. N'est-il pas plus raisonnable d'admettre la permanence des traits essentiels de la surface du globe, mitigée cependant par le jeu normal des facteurs géologiques et spécialement celui des grands décrochements horizontaux ? N'est-ce pas ce facteur qui est intervenu en ordre principal dans la non concordance du pôle magnétique de continent à continent, non concordance qui se marque au moins depuis le début du Paléozoïque ?

Si l'on se rallie à l'hypothèse de la dérive, il faut admettre un glissement relativement facile des blocs de l'écorce terrestre sur un substratum se comportant comme un lubrifiant. Nous avons rappelé à ce propos que PEIVE admet l'existence d'une zone de cette nature à la base de l'écorce, là où s'arrêtent en profondeur les grandes failles verticales de décrochement.

Le professeur VAN BEMMELEN accepte aussi le glissement de la tectonosphère sur l'asténosphère, c'est-à-dire sur la zone relativement plastique qui sépare la croûte proprement dite du Manteau supérieur. Et cet auteur conclut en déclarant qu'il n'y a pas opposition absolue entre conception fixiste et conception mobiliste ; elles se complètent.

Nous venons de prendre connaissance d'un article du professeur V.V. BELOUSSOV ⁽¹⁾ sur la question de la dérive des continents. Notre savant collègue expose très clairement sa position en la matière : inutilité d'invoquer des compressions latérales pour expliquer la configuration de la croûte terrestre ; incompatibilité d'un mouvement des masses continentales avec la répartition des courants calorifiques ; incompatibilité de la thèse de l'expansion de la Terre avec les données astronomiques et géochimiques. Dans son opinion, les masses continentales se sont formées là où elles se trouvent et n'ont guère bougé les unes par rapport aux autres dans la suite des temps géologiques.

(1) V.V. BELOUSSOV, *Against continental drift*, Sci. Journ. London, janv. 1967, vol. 3, n° 1, pp. 56-61.

3. A PROPOS DE LA THÉORIE DE L'EXPANSION.

Nous avons discuté assez longuement des résultats acquis sur les crêtes médianes des océans. Nous avons, à ce propos, insisté sur un fait qui nous paraît essentiel : Ces rides n'ont rien de commun avec les orogènes des continents ; elles sont propres au domaine profond des océans, elles sont disposées en un vaste réseau systématiquement ordonné, en harmonie avec la forme même des fosses océaniques ; d'autre part, suivant leur ligne axiale, le flux thermique provenant de l'intérieur de la Terre est exagéré par rapport au flux normal mesuré sur les continents et même sur le fond des océans en dehors de la ride.

Une observation importante est à retenir et à méditer : les rides axiales des océans sont nettement déplacées par les grands décrochements horizontaux ; elles leur sont donc antérieures. Or les fractures de cette nature ont probablement une origine très ancienne. De là à admettre la très grande ancienneté des rides médianes, il n'y a qu'un pas. Si cette conclusion était acceptée, on y verrait sans doute un argument de poids contre la théorie de la dérive wegenérienne. Par contre, elle ne serait peut-être pas en contradiction avec les résultats des recherches de RUNCORN, faisant remonter au Précambrien, le déplacement relatif de l'Europe et de l'Amérique du Nord.

D'autre part, on est aisément séduit par la théorie des courants de convection. Le flux de chaleur anormal le long des rides médianes apporte une indication précieuse en faveur de cette conception. Mais n'est-il pas exagéré d'en déduire que de tels courants ont provoqué le glissement de vastes continents pour les écarter les uns des autres en harmonie avec l'hypothèse de WEGENER ?

Des auteurs ont cru voir dans la structure des rides océaniques médianes, la preuve d'un tel écartement, avec élargissement progressif de la fracture. Ce serait peut-être là un indice favorable à la théorie de l'expansion, sans lui attribuer cependant l'ampleur que certains protagonistes de cette idée lui ont donnée.

Les observations faites en Islande et rapportées par WALKER (Symposium Royal Society, 1965) apportent des arguments en faveur de la thèse d'un élargissement du fossé qui longe la ligne axiale des crêtes médianes. Elles ne permettent cependant pas d'affirmer qu'il faut voir là l'origine de l'Océan Atlantique sur toute sa largeur. Une légère accentuation d'une fissure antérieure par une action d'expansion pourrait conduire au même résultat.

Peut-être serait-il admissible de s'arrêter à une solution mixte. Tout en renonçant à la thèse de la Dérive dans le sens wegenérien, pourrait-on accepter un léger déplacement des fonds océaniques par une augmentation très minime de la largeur des éléments du réseau originel, très ancien, des rides médianes. Ce serait une application très modérée de la conception de DIRAC.

4. LES CONTRAINTES.

Dans ces conditions la nature des forces en action pourrait être envisagée de diverses manières :

a) Refroidissement progressif de la planète ralenti dans de larges proportions par l'intervention de la radioactivité, et provoquant une tendance à la contraction. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que la quantité initiale d'isotopes radioactifs ne fait que décroître de façon continue et automatique ; le total des calories /seconde engendrées est donc en décroissance continue, fait qui est plutôt en faveur d'une contraction également continue.

b) Changements dans la vitesse de rotation de la Terre, facilitant la fracturation de la croûte, provoquant de ce fait l'accentuation du grand réseau de fractures radiales couvrant toute la surface du globe.

c) Action des courants de convection qui résultent forcément des variations de la température suivant la profondeur considérée, avec tendance à la production d'un flux de chaleur vers l'extérieur ; ces courants quoique très lents peuvent avoir des effets mécaniques marqués, sans qu'il faille leur accorder une importance exagérée.

d) Tendance à l'expansion d'après le principe de DIRAC (ÉGYED), avec localisation de ses effets suivant les crêtes médianes des océans, lesquelles sont situées dans les parties profondes des océans, là où la croûte terrestre a la moindre épaisseur et peut se déchirer plus facilement sous un effort d'extension. Encore faudrait-il que la thèse de DIRAC fut démontrée de façon certaine, ce qui n'est pas le cas.

e) Influences extérieures à la Terre provoquant par exemple une variation dans l'inclinaison de l'axe de la Terre sur le plan de l'écliptique. Variations possibles de l'activité solaire, etc.

On imagine aisément que toutes ces forces n'agissent pas avec une activité constante ; leur résultante devrait seule pouvoir être prise en considération. C'est là la grande difficulté du Problème.

Après un examen attentif des données de la géologie, WESTOLL arrive à la conclusion suivante :

“ Purely geological evidence taken piece by piece cannot prove or disprove drift. Many kinds of evidence, individually supporting the drift theory with only a few probability, may collectively form a linked network that argues powerfully in its favour ”.

Cette conclusion est certes modérée ; cependant nous croyons devoir y apporter une restriction, que nous avons déjà cherché à mettre en évidence au cours

de notre exposé : Le simple jeu des facteurs géologiques normaux ne peut-il pas donner une apparence de dérive des masses continentales ? Il en est certainement ainsi si l'on songe au déplacement le long des failles de décrochement (Strike slip faults) tant sur les grands fonds océaniques qu'à l'intérieur des masses continentales. Il n'empêche que l'évolution géologique pure et simple suffit pour expliquer la majeure partie des faits observés, sans qu'il faille admettre une action de dérive suite à la désagrégation d'une Paugée, à l'intervention de facteurs bien mal précisés.

Nous avons fait appel antérieurement à un article récent du professeur SCHEINMANN relatif au problème de la dérive (1). Notre savant confrère conclut en disant qu'à l'heure actuelle il n'est guère possible d'arriver à un accord entre partisans et adversaires de la dérive. Il est nécessaire d'être en possession d'autres matériaux que ceux dont nous disposons aujourd'hui. Cependant ajoute-t-il certaines conclusions semblent devoir s'imposer : Ni la forme des continents, ni leur similitude quant à la structure géologique ne sont aptes à résoudre le problème ; le paléomagnétisme n'est pas d'un grand secours ; la glaciation du Paléozoïque supérieur ne justifie pas l'abandon des idées acquises qui sont en harmonie avec les faits. Nous devons admettre le rôle des courants de convection dans le manteau, avec l'espoir que la géologie et la géophysique joueront un rôle important en la matière.

On peut se rallier provisoirement aux conclusions très modérées du savant russe.

(1) Y.M. SCHEINMANN, *Réflexions à propos de la dérive* (traduit du russe), *Geotectonica* n° 2, mars-avril 1966, Moscou.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	5
INTRODUCTION	7
PREMIÈRE PARTIE. — Les données du problème	11
Chapitre I. — La constitution physique de la Terre	11
A. L'intérieur de la Terre	12
B. La croûte terrestre	15
C. La chaleur interne du Globe	17
D. Le comportement des matériaux terrestres sous l'action des contraintes	20
Chapitre II. — La discontinuité du Sial. L'origine des masses continentales.	21
A.1. — Théorie des courants de convection	22
A.2. — Théorie de Grussov	26
A.3. — Théorie de l'impact	27
B.1. — Hypothèse de Chevallier et Cailleux	28
B.2. — Hypothèse de Belousov	28
C. Expansion de la Terre	30
C.1. — Théorie d'Egyed	31
C.2. — Théorie de S.W. Carey	32
D. Théorie de Jean Lagrula	33
E. Conclusion.....	33
Chapitre III. — La structure des masses continentales	35
A. Les zones plissées (Orogènes)	37
B. Failles radiales et décrochements horizontaux (Strike-slip faults)	55
Chapitre IV. — Les océans	65
A. Les eaux océaniques	65
B. La constitution des fonds océaniques	66
C. Le relief des fonds océaniques.....	73
1. Iles, reliefs volcaniques et guyots	73
2. Les crêtes médianes	75
D. La ligne andésitique du Pacifique et ses fosses marginales	81
E. Les failles radiales	84
Remarque au sujet des failles bordières du Pacifique	89
F. La sédimentation sur les fonds océaniques	90
G. Le domaine de la Téthys	93
H. Les rivages des océans	96
Chapitre V. — L'arrangement systématique des continents et des océans	100
A. La symétrie dans l'ordonnance des structures	100
B. La forme en S des axes des océans et des continents	106

DEUXIÈME PARTIE. — Les moyens d'investigation. L'examen critique des données du problème	111
Chapitre I. — Les enseignements de la géographie physique et de la géologie stratigraphique	113
Chapitre II. — Le paléomagnétisme et le déplacement des pôles	127
Quelques remarques au sujet de la méthode paléomagnétique	148
Chapitre III. — La paléoclimatologie	156
A. L'utilisation des paléoflores	156
B. L'utilisation des faunes anciennes	165
C. Les sédiments exceptionnels	169
Conclusions	170
Chapitre IV. — Les glaciations	178
Chapitre V. — Les enseignements de la paléontologie et de la biologie	201
Chapitre VI. — Les enseignements de la paléogéographie	212
Chapitre VII. — Les enseignements de la géologie structurale	228
A. Les orogènes	228
B. Les déformations épéirogéniques	235
C. Les failles radiales (décrochements horizontaux)	236
D. Observations à propos de la sismicité	241
E. Particularités locales	243
F. Essais sur la base de la géochronologie	257
Chapitre VIII. — Les enseignements tirés de l'étude des crêtes médianes des océans	260
Chapitre IX. — Réflexions à propos des résultats acquis en géophysique	269
A. Croûte terrestre et Manteau	269
B. A propos des rides médianes des océans	270
C. Observations à propos du flux de chaleur vers l'extérieur de la Terre	273
Chapitre X. — Les variations de longitude	275
Chapitre XI. — Les forces en action	278
Chapitre XII. — Dérive et expansion	285
A. Hypothèse d'Egyed	285
B. Hypothèse de Carey	291
Chapitre XIII. — Réflexions à propos de la disposition systématique des masses continentales	298
TROISIÈME PARTIE. — Conclusions générales	305
1. L'hypothèse du fixisme	305
2. L'hypothèse de la dérive	307
3. A propos de la théorie de l'expansion	313
4. Les contraintes	314

