

Polgervsky

Collection de Monographies Scientifiques Étrangères publiée sous la direction
de M. G. JUVET, Professeur à l'Université de Neuchâtel, N° VI.

A. WEGENER

DOCTEUR ÈS SCIENCES

PROFESSEUR DE MÉTÉOROLOGIE A L'UNIVERSITÉ DE HAMBOURG

LA

Genèse des Continents et des Océans

traduit sur la troisième édition allemande

par M. REICHEL

LICENCIÉ ÈS SCIENCES

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ALBERT BLANCHARD

3, et 3 bis, Place de la Sorbonne

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1

1924

A LA MÊME LIBRAIRIE

H. WEYL

PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE ZURICH

Temps, Espace, Matière

Leçons sur la Théorie de la Relativité générale

Traduit sur la quatrième édition allemande par G. JUVET et R. LEROY

« Il a paru un excellent livre détaillé de M. H. WEYL sur la théorie de « la relativité généralisée. Ce livre a paru sous le titre : *Temps, Espace, Matière*. Nous le recommandons chaleureusement aux mathématiciens « et aux physiciens. »

« A. EINSTEIN »

(Préface de la 3^e édition de la *Théorie de la Relativité*).

1922. Un volume gr. in-8° de 290 pages et 15 figures..... 20 fr. »

Max BORN

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE FRANCFORT

La Constitution de la Matière

Traduit par H. BELLENOT.

1922. Un vol. gr. in-8° de 84 pages et 36 figures..... 6 fr. »

W. KOSSEL

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE KIEL

Les Forces de Valence et les Spectres de Röntgen

Deux mémoires sur la structure électronique de l'atome, traduit par M. GOLAY. 1922, 1 vol. gr. in-8° de 70 pages et 11 figures.... 4 fr. 50

RICCI et LEVI CIVITA

Méthodes de Calcul différentiel absolu et leurs applications

1923, brochure gr. in-8° de 77 pages 9 fr. »

A. SOMMERFELD

PROFESSEUR DE PHYSIQUE THÉORIQUE A L'UNIVERSITÉ DE MUNICH

La Constitution de l'Atome et les Raies Spectrales

traduit par H. BELLENOT, 1923, 2 volumes gr. in-8° brochés de 743 pages
et 123 figures 55 fr. »

e
s
e
s
e
a

AVANT-PROPOS

Il nous a paru intéressant et même utile de présenter au public de langue française la traduction d'un ouvrage qui développe sur la genèse des continents des idées très hardies et très neuves.

M. E. Gagnebien, l'auteur du seul article français qui ait paru à notre connaissance sur les problèmes soulevés par M. Wegener, ne craint pas d'affirmer que « la Géologie depuis la synthèse générale qu'en fit Edouard Suess, depuis la découverte, par Marcel Bertrand, Schardt, Lugeon, Termier, des grandes nappes alpines de charriage, ne s'est enrichie d'aucune idée plus importante, ni plus nouvelle que la théorie de Wegener » (1).

Trois éditions allemandes de cet ouvrage ont paru, la première en 1915, la seconde en 1920 et la troisième qui est celle que nous avons suivie pour la présente traduction date de 1922 (elle est postérieure à l'article cité). De l'une à l'autre, l'Auteur a développé ses idées et augmenté le faisceau des preuves très variées sur lesquelles repose son argumentation.

Nous espérons que la théorie de Wegener soulèvera en France autant de discussions qu'elle en a soulevé en Allemagne, en Hollande, en Scandinavie ou en Suisse; notre but sera atteint si ces discussions précisent et développent les solutions des problèmes que posent la géophysique et la géologie.

Nous tenons à remercier M. Emile Argand de l'intérêt qu'il a témoigné à notre entreprise.

LES EDITEURS ET LE TRADUCTEUR.

(1) *Rev. gén. des Sciences*, 30 mai 1922.

TABLE DES MATIÈRES

Principes de la théorie des translations continentales.

	Pages
CHAPITRE I. — La théorie des translations.	1
II. — Rapports de la théorie des translations à celles de la contraction du globe, des ponts continen- taux et de la permanence des océans.	9

Les preuves.

CHAPITRE III. — Arguments tirés de la géophysique.	22
IV. — Arguments géologiques	33
V. — Arguments paléontologiques et biologiques	58
VI. — Arguments paléoclimatiques	72
VII. — Arguments géodésiques	89

Éclaircissements et conclusions.

CHAPITRE VIII. — La viscosité du globe	96
IX. — Le fond des océans.	111
X. — La sphère de sial.	117
XI. — Plissement et disjonction.	126
XII. — Le bord des continents	138
XIII. — Les forces translatrices.	150

A. WEGENER

DOCTEUR ÈS SCIENCES
PROFESSEUR DE MÉTÉOROLOGIE A L'UNIVERSITÉ DE HAMBOURG

LA

Genèse des Continents et des Océans

traduit sur la troisième édition allemande

par M. REICHEL

LIGENCIÉ ÈS SCIENCES

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ALBERT BLANCHARD

3, et 3 bis, Place de la Sorbonne

A. WEGNER

Genese des Continents
et des Océans

PAR M. WEGNER

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ALBERT BLANCHARD

2, rue Cassini, 26

1891

I. PRINCIPES DE LA THÉORIE DES TRANSLATIONS CONTINENTALES

CHAPITRE I

La théorie des translations

Si l'on considère les rivages de l'Atlantique sud, on ne manquera pas d'être frappé de leur allure semblable. L'angle droit que forme le cap Saint-Roque se répète exactement dans le golfe de Guinée et, plus au sud, à chaque promontoire de la côte brésilienne correspond une baie de forme semblable du côté africain. Mesurées au compas sur un globe terrestre, les grandeurs de ces objets se révèlent identiques.

Cette frappante concordance a été pour nous le point de départ d'une nouvelle conception sur la nature et les mouvements de l'écorce terrestre. Nous l'avons nommée « théorie des translations continentales » ou, plus brièvement, « théorie des translations », car elle se fonde sur l'hypothèse de grandes poussées horizontales, qui ont déplacé et déplacent probablement encore les socles continentaux.

D'après cette manière de voir, le socle sud-américain a été, il y a des millions d'années, relié à celui de l'Afrique au point de ne former avec lui qu'un seul continent. Ce n'est qu'au Crétacé que cette masse se partagea en deux moitiés distinctes qui s'écartèrent l'une de l'autre comme des icebergs. L'Amérique du Nord a subi la même dérive, après avoir été soudée à l'Europe, du moins par le Groenland et Terre-Neuve, laquelle se juxtaposait à l'Irlande. Une fente méridienne sépara ces continents. Elle atteignit l'Irlande au Tertiaire supérieur et, progressant du sud au nord, elle se bifurqua à la latitude du Groenland qu'elle isola de plus en plus

durant le Quaternaire. Remarquons à ce propos que les plateformes continentales, zones peu profondes bordant les socles continentaux, seront toujours considérées ici comme leur appartenant. La limite des continents n'est donc pas la ligne de rivage mais celle où s'amorce la région actique.

La théorie des translations suppose également que l'Antarctique, l'Australie et l'Inde ne formaient avec l'Afrique qu'une seule masse, recouverte en partie, par des mers épicontinentales. Un système de failles disloqua cette masse au cours du Jurassique, du Crétacé et du Tertiaire et ses fragments distincts dérivèrent chacun de leur côté. (Les trois planisphères des figures 1 et 2 montrent les divers stades de ces déplacements : Carbonifère inférieur, Eocène, début du Quaternaire). Pour l'Inde péninsulaire, le phénomène fut quelque peu différent. L'Inde était primitivement reliée au continent asiatique par un pont dont la majeure partie était faiblement immergée. Séparée de l'Australie au Jurassique inférieur et de Madagascar au passage du Crétacé au Tertiaire, elle chemina vers l'Asie en plissant graduellement les masses de jonction qui vinrent constituer, de la sorte, le train de plis le plus gigantesque de la croûte terrestre : l'Himalaya et les nombreuses chaînes de l'Asie centrale.

Il est d'autres régions où la translation des masses continentales eut une part active à la genèse des montagnes. Les deux Amériques, par exemple, en dérivant vers l'ouest, se sont plissées au contact du fond du Pacifique, dont la résistance dut être d'autant plus forte qu'il a existé comme tel — et s'est donc refroidi profondément — depuis les temps géologiques les plus reculés. Ainsi s'est formée l'immense cordillère andine qui s'étend de l'Alaska à l'Antarctique. Les chaînes de la Nouvelle-Guinée, qu'une mer épicontinentale sépare du bloc australien dont elle fait partie intégrante, ont surgi, de même, sur le bord antérieur de ce radeau en dérive. Avant de se séparer du socle antarctique, l'Australie ne se déplaçait pas dans la même direction qu'aujourd'hui : sa côte est était alors le bord avançant (voir figure 1 et 2) et c'est en Nouvelle Zélande qu'il faut chercher les plis qui s'y formèrent car primitivement, cette île appartenait au bloc australien. Lorsque ce continent se mit à dériver vers le Nord, elle s'en détacha et, cessant de participer à sa translation, elle s'en vint former une guirlande bien caractérisée. Les cordillères de l'Est australien sont plus anciennes encore. Elles

surgirent à la même époque que les plissements précurseurs (pré-cordillères) des Andes, époque où les continents ne formaient encore qu'une seule masse dérivante dont le bord antérieur se plissait.

Au cours de leurs déplacements, dirigés le plus souvent vers l'ouest, les socles continentaux ont eu la tendance à se rapprocher de l'équateur. La ceinture de chaînes tertiaires occupant, de l'Himalaya à l'Atlas, la zone équatoriale d'alors, est en rapport avec ce phénomène.

Nous avons dit plus haut, que la guirlande néo-zélandaise est une ancienne chaîne côtière australienne. Sa séparation témoigne d'un phénomène qui s'est manifesté en de nombreux endroits, mais qui accompagna plus spécialement les translations dirigées vers l'ouest. En se déplaçant, les aires continentales jalonnent leur route de fragments de leur bord postérieur. C'est ainsi que les chaînes côtières du bord oriental de l'Asie se disposent en guirlandes d'archipels et que les petites et les grandes Antilles participent de moins en moins à la dérive de l'Amérique.

L'arc des Antilles du sud, reliant la Terre de Feu à l'Antarctique est l'effet d'un retard analogue; toutes les pointes sud des continents s'infléchissent ou se fragmentent en s'attardant. Elle se tourneront vers l'est, puisque la dérive vers l'ouest prédomine; mentionnons l'extrémité sud du Groenland, le banc de la Floride, la Terre de Feu, la Terre de Graham, Ceylan.

On remarquera aisément que la théorie des translations implique l'existence d'un état d'équilibre spécial entre les fonds océaniques et les socles continentaux. Elle admet, en effet, que ces objets n'ont pas la même constitution : les socles continentaux dont l'épaisseur atteint une centaine de kilomètres, baignent dans un magma d'une espèce différente dont ils n'émergent que de 5 kilomètres environ, et qu'ils laissent à nu au fond des océans. La croûte superficielle de la lithosphère ne recouvre donc plus complètement le globe; au reste, nous ne savons pas si elle l'a jamais fait et nous ne chercherons pas à le démontrer ici. Mais elle s'est en tout cas rétrécie au cours des temps géologiques; des plissements et des compressions horizontales augmentèrent son épaisseur et elle finit par se diviser en masses continentales distinctes dont l'ensemble n'occupe aujourd'hui que le quart, environ, de la surface du globe. Les fonds océaniques, au contraire, représentent une zone plus profonde de l'écorce terrestre, zone que nous supposons exister aussi sous les

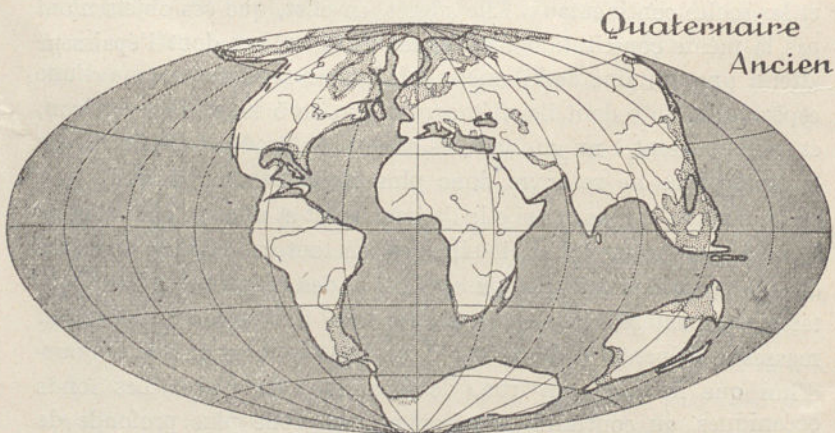
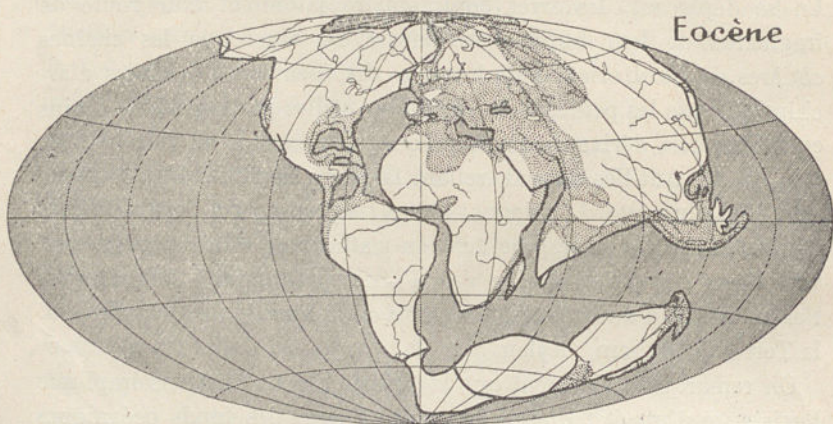
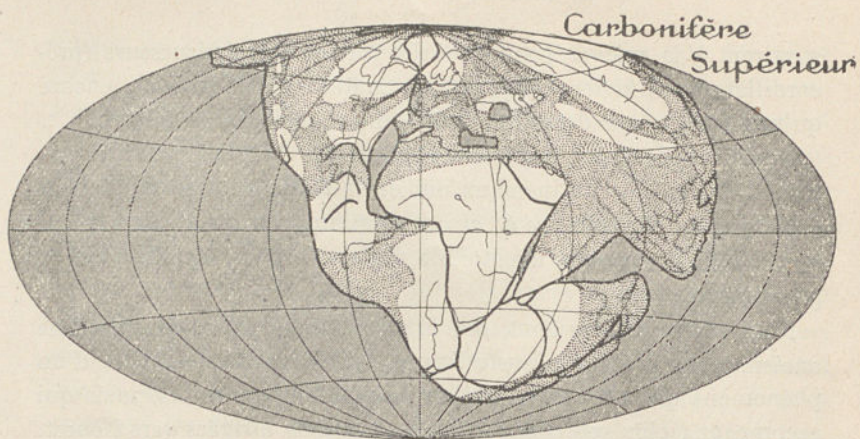


Fig. 1. — La carte du globe à 3 époques de l'histoire géologique selon la théorie des translations continentales.

En hachures : domaines abyssaux ; ponctué : mers épicontinentales. — Les contours actuels des continents sont uniquement comme points de repère.

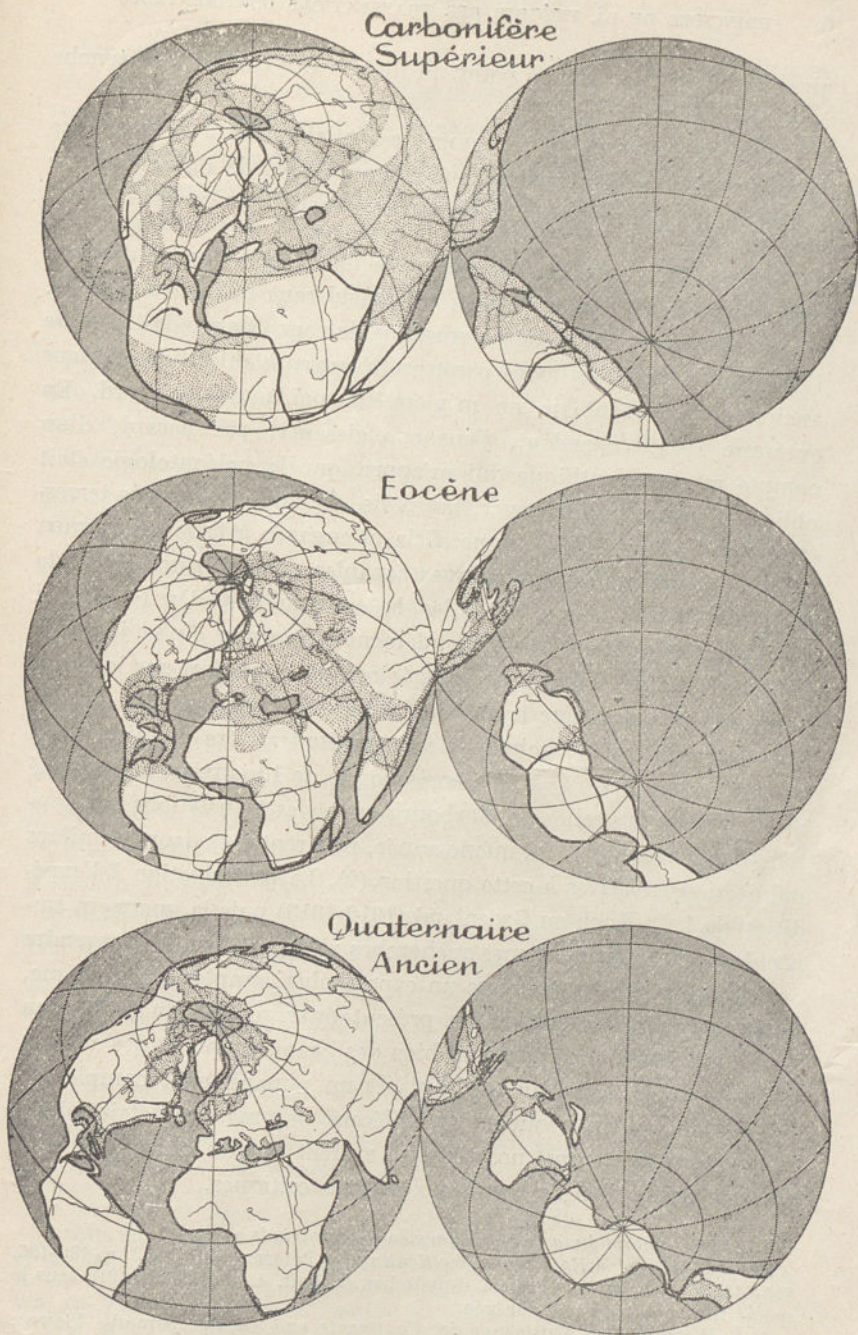


Fig. 2. — Les mêmes reconstructions (autre projection).

aires continentales. Sur ce point, la théorie des translations touche à la géophysique.

Le présent ouvrage sera consacré essentiellement à l'exposé des fondements de ces nouvelles conceptions. Avant de l'aborder, que le lecteur me permette quelques remarques sur leur genèse.

C'est en 1910 que, pour la première fois, l'idée des translations continentales me vint à l'esprit; en considérant la carte du globe, je fus subitement frappé de la remarquable concordance des côtes de l'Atlantique, mais, estimant par trop invraisemblable l'idée de leur ancien emboîtement, je ne m'y arrêtai point tout d'abord. En automne 1911, cependant, j'eus connaissance, par hasard, d'un compte rendu scientifique qui m'apprit que la paléontologie était obligée d'admettre l'existence, autrefois, de communications terrestres entre le Brésil et l'Afrique. Cela m'engagea à faire un examen préalable des données géologiques capables de confirmer l'idée de la dérive des continents et elles la confirmèrent dès l'abord si abondamment que je fus profondément convaincu de sa justesse. Le 6 janvier 1912, à la Société de géologie de Francfort sur le Main, je donnai une première conférence publique intitulée « La formation des accidents principaux de la croûte-terrestre (continents et bassins océaniques) (1) » puis une seconde, le 10 janvier, à la société des Sciences Naturelles de Marbourg sur « les translations horizontales des continents ». La même année, parurent mes deux premières publications relatives à cette question (2). La participation à l'expédition de J. P. Koch au Groenland (1912-1913) puis la guerre m'empêchèrent de continuer mes recherches; mais je pus les reprendre en 1915 et mettre sous presse un exposé plus complet du problème. Ce fut la première édition du présent ouvrage (3). En 1920, j'en livrai une deuxième, contenant bien des changements et des adjonctions (4). L'édition d'aujourd'hui est un remaniement complet de la précédente. Un groupement différent des matières était nécessaire car, entre temps, nos théories avaient fait du chemin et elles avaient suscité déjà de nombreux articles critiques.

(1) « *Die Herausbildung der Grossformen der Erdrinde* ».

(2) A. WEGENER. *Die Entstehung der Kontinente*. *Peterm. Mitt.* 1912, p. 186-195, 253-256, 305-309, et dans la *Geol. Rundschau*, 3. Heft. 4, p. 276-292, 1912 sous le même titre, mais un peu abrégée.

(3) A. WEGENER. *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* Samml. Vieweg, n° 23, 94 p. Braunschweig 1915.

(4) 2^e édition, Coll. *Die Wissenschaft* n° 66, 135 p. Braunschweig 1920.

En passant en revue les travaux d'anciens auteurs, j'y ai trouvé, plus d'une fois, des idées analogues aux miennes. LÖFFELHOLZ VON COLBERG (1), KREICHGAUER (2), EVANS et d'autres supposent que l'ensemble de la croûte terrestre peut subir une rotation, ne modifiant pas la disposition de ses parties constituantes. WETTSTEIN, dans son livre, remarquable à tous égards (3), parle déjà des déplacements continentaux. D'après lui, les continents — qu'il limite toutefois à leurs parties émergées — ne subissaient pas seulement des translations, mais aussi des déformations ; en tant que masses plastiques soumises à l'attraction solaire, tous voyageraient vers l'ouest (idée que E.-H. SCHWARZ admet aussi, voir *Géogr. Journal*, vol. XL, 1912, p. 294-299). Mais, à son avis, les bassins océaniques sont dus à l'affaissement d'anciens continents. Il émet, en outre, sur ce qu'il nomme les « homologues géographiques » et sur d'autres problèmes concernant la face de la terre, des idées quelque peu fantaisistes auxquelles nous ne nous arrêterons pas ici. C'est en constatant, comme nous, la concordance des côtes de l'Atlantique Sud que PICKERING (4) a été amené à supposer qu'elles sont les bords d'une fracture élargie. Cependant, il n'a pas remarqué que nous sommes obligés d'admettre que l'Amérique ne s'est pas séparée de l'Afrique avant le Crétacé ; il relègue cette séparation à la vague époque primitive où, suivant G.-H. DARWIN, la lune, en se détachant de la terre, créa le bassin du Pacifique (5). Les idées de F. B. TAYLOR se rapprochent davantage des miennes : dans un travail publié en 1910 (6), il suppose qu'au Tertiaire, certains continents ont subi des déplacements horizontaux tout à fait appréciables, en rapport avec les grandes failles qui, à cette époque, se sont produites en de nombreux endroits. La séparation du Groenland d'avec l'Amérique du Nord l'amène à des considérations pratiquement

(1) CARL FREIHERR LÖFFELHOLZ VON COLBERG. *Die Drehung der Erdkruste in geologischen Zeiträumen* 62 p. Munich 1886. (2^e édit. très augmentée, 247 p. Munich 1895).

(2) D. KREICHGAUER. *Die Äquatorfrage in der Geologie*, 394 p. Steyl 1902.

(3) H. WETTSTEIN. *Die Strömungen des Festen, Flüssigen und Gasförmigen und ihre Bedeutung für Geologie, Astronomie, Klimatologie und Meteorologie*, 406 p. Zürich 1880.

(4) *The Journ. of. Geology*, 15, n° 1, 1907 : et *Geo* 43, 385, 1907.

(5) Cette idée, à laquelle souscrivent encore certains géologues, est de l'hypothèse pure. SCHWARZSCHILD, LIAPUNOW, RUDZKI. SEE et d'autres l'estiment inadmissible. A mon avis, la lune a une genèse toute différente (voir A. WEGENER, *Die Entstehung der Mondkrater*, Samml. Vieweg, n° 55, 48 p. Braunschweig 1921).

(6) F. B. TAYLOR, *Bearing of the tertiary mountain belt on the origin of the earth's plan*. B. geol. S. Am. 21 (2), 179-226, juin 1910.

identiques aux miennes. Il admet, toutefois, que des effondrements ont concouru à la formation de l'Atlantique et que le seuil longitudinal de cet océan est un dernier reste des masses englouties. Selon lui, la tendance qu'ont les terres à s'écarter des pôles aurait présidé, comme le pense aussi KREICHGAUER, à l'arrangement des grands trains de plis, tandis que les déplacements des continents ne joueraient à cet effet qu'un rôle secondaire; aussi ne cherche-t-il pas longuement à le prouver.

Je ne pris connaissance de ces travaux qu'à une époque où j'avais déjà tracé les grandes lignes de la théorie des translations. Il n'est certes pas impossible qu'on découvre d'autres travaux contenant des idées semblables aux miennes et les anticipant sur tel ou tel point. L'historique de la question n'a pas encore été fait et nous n'avons pas eu l'intention de l'entreprendre ici.

CHAPITRE II

Rapports de la théorie des translations à celles de la contraction du globe, des ponts continentaux et de la permanence des océans.

La géologie ne s'est pas encore tout à fait affranchie de l'idée d'une contraction graduelle de la terre. Emise, en particulier, par DANA, ALB. HEIM, E. SUESS, cette idée figure encore aujourd'hui dans les traités de géologie, au chapitre des lois fondamentales (2). En se refroidissant, notre globe se contracte ; son écorce doit se rider comme la pelure d'une pomme qui, en séchant, diminue de volume. SUESS l'exprime en ces quelques mots : « C'est à l'écroulement terrestre que nous assistons » (3). On ne peut refuser à cette théorie le mérite « historique » d'avoir pendant longtemps fourni à nos connaissances géologiques une grande synthèse donnant réponse à tout. Grâce à sa longue durée, elle a pu, dans un grand nombre de cas particuliers, servir de base à des déductions si justes qu'elle conserve, dans sa grande simplicité, et à cause de ses nombreuses applications, quelque chose de très séduisant. Toutefois, on ne saurait douter qu'elle soit en contradiction avec toutes les données nouvelles de la géophysique et que les recherches géologiques récentes la confirment de moins en moins.

Telle fut, notamment, la découverte, dans les Alpes, des nappes de recouvrements ou charriages. Elle rendit encore plus difficilement admissible le fait que les montagnes seraient dues à la contraction du globe. Ce mode de plissement, très répandu, que nous ont révélé les travaux de BERTRAND, SCHARDT, LUGEON et autres exige, en effet, de l'écorce du globe un raccourcissement bien plus considérable qu'on ne l'eût précédemment imaginé. HEIM estimait autrefois que

(1) E. KAYSER, *Lehrb. d. allg. Geologie*, 5. Aufl. Stuttgart 1918.

(2) L. KOBER, *Der Bau der Erde*. 324 p. Berlin 1921.

(3) E. SUESS, *Das Antlitz der Erde* I. 778, 1885. Trad. E. DE MARGERIE. *La Face de la Terre*, I. p. 823.

les Alpes avaient diminué de moitié le territoire au dépens duquel elles se sont formées; la découverte des charriages — aujourd'hui universellement reconnus — l'obligea à porter au quart ou même au huitième la valeur de ce rétrécissement (1). Comme les Alpes ont une largeur de 150 kilomètres environ, elles couvriraient, déroulées, un espace de 600 à 1.200 kilomètres soit 5 à 10° de latitude. Il est impossible d'attribuer un phénomène d'une telle envergure à un abaissement graduel de la température du globe.

E. KAYSER fait remarquer, il est vrai, qu'une contraction de 1.200 kilomètres ne diminue que de 3 % la circonférence terrestre et, par là, son rayon. Mais, si l'on calcule la perte de température à laquelle elle correspond, cette contraction, si faible à première vue, prend une importance considérable. En effet, si l'on se base sur le coefficient moyen de dilatation des quatre corps les plus abondamment représentés (2), on constate que le plissement tertiaire a exigé, à lui seul, une diminution de température d'environ 2.400°. Pour les époques antérieures, où l'écorce terrestre se plissait en de plus nombreux endroits, on obtiendrait des valeurs encore bien plus élevées. Ces résultats ne concordent pas avec les données de la physique théorique : d'après les calculs de LORD KELVIN fondés sur la quantité minimale de chaleur émanant actuellement de l'intérieur de la terre, il ne peut être question de supposer qu'aux temps géologiques ce dégagement calorifique était à ce point plus élevé qu'aujourd'hui. Sans doute, RUDZKI (3) a montré que, dans ses déductions mathématiques, LORD KELVIN n'a pas tenu compte du travail fourni par l'attraction des masses, travail qui dégagerait assez de calories pour maintenir la température à peu près constante, si bien que la contraction resterait en quelque sorte le seul phénomène appréciable. Toutefois RUDZKI s'est empressé d'ajouter que les coefficients de dilatation choisis sont probablement trop élevés pour s'appliquer à la masse interne du globe, soumise à une pression formidable. Les calculs de LORD KELVIN conservent donc toute leur valeur. Si la géophysique n'est pas encore à même de donner à cette question une réponse satisfaisante, l'étude de la radioactivité semble au moins lui fournir des données plus certaines. Le dégagement considérable

(1) ALB. HEIM, *Bau der Schweizer Alpen* Neujahrsblatt d. Naturf. Ges. Zurich 1908 110, Stück, p. 24.

(2) Nickel (0,000 013); Fer (0,000 012); CoCa, (0,000 015); Quartz (0,000 010); moyenne (0,000 0125).

(3) RUDZKI, *Physik der Erde*, p. 418. et sq. Leipzig 1914.

de chaleur provoqué par la désintégration du radium suffirait amplement à empêcher le refroidissement de notre planète, si la proportion de cet élément contenue dans les roches — qui, suivant JOLY, en ont toutes des traces suffisantes — reste constante jusqu'au centre de la terre (1). Il nous semble prématuré d'admettre, avec STRUTT, que le radium n'existe que dans les parties supérieures de l'écorce terrestre. Quoi qu'il en soit, nous voyons qu'il ne peut plus bien être question pour le globe d'une contraction appréciable due à son dégagement de chaleur et, pour le moment, rien ne nous empêche même de conclure que sa température est en train de s'accroître.

Si, malgré cela, la terre se contracte, nous sommes forcés d'admettre avec HEIM, que le raccourcissement d'un grand cercle ne le déforme qu'en un seul endroit. Et cela signifie que la poussée orogénique est capable de se transmettre au sein de la lithosphère, sur un arc de 180° de méridien (supposition tout à fait inadmissible à notre avis). De nombreux auteurs tels que AMPFERER (2), REYER (3), RUDZKI (4), ANDRÉE (5), se sont élevés avec raison contre de semblables hypothèses. Ils prétendent entre autres que si c'est bien la contraction qui occasionne les plissements, la terre devrait s'être ridée sur toute sa surface et régulièrement comme la pomme qui sèche. Tout récemment, KOSSMAT (5) a montré, qu'on ne peut expliquer la formation des montagnes sans faire appel à des mouvements tangentiels de grande envergure incompatibles avec la théorie de la contraction. Ainsi, peu à peu, les doutes s'accroissent. La géologie a dû reconnaître, depuis quelque temps déjà que « la théorie de la contraction est loin de jouir de son ancienne faveur et qu'en attendant, on n'en a trouvé aucune qui puisse la remplacer en tous points et donner l'explication de tous les phénomènes » (7).

J'ai l'impression que, s'il est un problème en face duquel la

(1) RUDZKI, *Ibid.* p. 122 Leipzig 1911 ; V. WOLFF, *Der Vulkanismus* I, p. 8 Stuttgart 1913.

(2) AMPFERER, *Ueber das Bewegungsbild von Faltengebirgen*. Jahrb. d. Kais. Kön. Geol. Reichsanstalt 56, 539-622, Vienne 1906.

(3) REYER, *Geologische Prinzipienfragen*, p. 140 et sq. Leipzig 1907.

(4) RUDZKI, *loc. cit.*, p. 122.

(5) ANDRÉE, *Ueber die Bedingungen der Gebirgsbildung*, Berlin 1914.

(6) KOSSMAT, *Erörterungen zu A. Wegeners Theorie der Kontinentalverschiebungen*, Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin 1921, p. 103.

(7) E. BÖSE, *Die Erdbeben* (collect. « Die Natur », s. d.), p. 16; une constatation analogue a été faite par ANDRÉE (voir ouvrage cité).

théorie de la contraction est obligée de reconnaître sa banqueroute, c'est bien celui du rapport des fonds océaniques aux socles continentaux. En 1878 déjà, ALBERT HEIM (1) le souleva incidemment, voici en quels termes: « Tant que nous n'aurons pas des données plus précises sur les fluctuations des aires continentales... et des mesures plus complètes sur l'étendue des terres qui, par compression, donnèrent lieu à la plupart des chaînes de montagnes, nous n'en saurons guère davantage sur les rapports de causalité existant entre les chaînes et les continents et sur le pourquoi des formes que ces derniers affectent les uns par rapport aux autres ». Mais le problème prit un intérêt de plus en plus grand à mesure que les sondages marins se faisaient plus nombreux et mettaient mieux en évidence l'uniformité des vastes plaines abyssales qui répètent, 5.000 mètres plus bas, celles des surfaces continentales.

En 1918, E. KAYSER (2) écrivait ce qui suit au sujet des socles continentaux : « Comparées à la masse énorme de ces continents toutes les saillies paraissent insignifiantes ; même de hautes chaînes telles que l'Himalaya ne sont à la surface de ces socles que des rides passagères. Cette simple constatation semble déjà rendre insoutenable l'ancienne idée, suivant laquelle les montagnes seraient l'armature des continents... Nous devons admettre plutôt, que les continentaux : « Comparées à la masse énorme de ces continents ne sont que des accidents récents ». Mais, comment rendre compte des continents par la théorie de la contraction ? L'éroulement général aurait épargné ces compartiments de la lithosphère qui, restés en saillie comme des horsts ou des paliers, se maintiendraient grâce à la pression de voûte. L'immensité des masses en jeu nous interdit pareille explication. L'idée d'une pression de voûte universelle, constamment en action au sein de la croûte terrestre (3), est en flagrante contradiction avec l'isostasie, théorie récente, toujours mieux établie, suivant laquelle l'écorce terrestre flotte dans un magma plastique. L'hypothèse de la contraction du globe qui, depuis Lyell, suppose une alternance sans fin d'affaissements

(1) A. HEIM, *Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung*, 2. Teil p. 237. Basel 1878.

(2) E. KAYSER, *Lehrb. d. allgem. Geologie*, 5^e édit. p. 132, Stuttgart 1918.

(3) Cette idée a été déjà réfutée par H. HERGESELL pour les zones supérieures de l'écorce. H. H. *Die Abkühlung der Erde und die gebirgsbildende Kräfte*. Beitr. z. Geophysik. 2 p. 153, 1895.

continentaux et de surrections d'abysses est démentie par la loi de la permanence des océans et des continents. Nous ne pouvons pas admettre cette loi sans restriction, ainsi que nous le ferons voir plus loin, mais ses arguments contraires à la théorie de la contraction sont parfaitement justifiés. Si l'on tient compte de l'isostasie, reconnue partout, il semble physiquement impossible que tout un continent s'affaisse au point de perdre 5.000 mètres en altitude. D'ailleurs l'extrême rareté des sédiments abyssaux trouvés parmi les dépôts marins répandus sur les aires continentales actuelles, nous indique que celles-ci n'occupèrent jamais les grandes profondeurs océaniques. Elles n'ont été recouvertes que par des mers peu profondes. Ainsi, la théorie de la contraction n'explique même plus les traits principaux de la face de la terre.

La théorie des translations continentales évite toutes les difficultés dont il vient d'être question. Elle ne s'oppose pas à l'hypothèse des grands mouvements de compression horizontale que l'on est obligé d'invoquer pour expliquer la formation des chaînes plissées ; au contraire, elle seule la rend admissible ; car, si la terre se ride plus fortement que ne l'exige sa contraction, à chaque frocement doit correspondre ailleurs une déchirure. C'est pourquoi nous sommes obligés d'admettre que les parties superficielles de la lithosphère ne couvrent plus le globe entier. Ce sont elles qui forment les masses continentales, si nettement distinctes des bassins océaniques et dont la présence ne saurait s'expliquer autrement. La théorie des translations continentales remplace donc celle de la contraction terrestre, laquelle doit être complètement abandonnée.

Il nous faut encore examiner à la lumière de nos théories deux idées opposées l'une à l'autre : celle des ponts continentaux effondrés et celle de la permanence des océans.

En présence de ces idées, la théorie des translations joue un rôle un peu différent ; car, pour le dire tout de suite, les arguments allégués en faveur de l'une et de l'autre sont parfaitement justifiés. S'ils semblent contradictoires, c'est que leurs défenseurs ne se fondent que sur une partie des faits dont ils pourraient disposer. Notre hypothèse tient compte de l'ensemble des données certaines ; elle réconcilie ces théories adverses en satisfaisant à leurs exigences respectives. Pour traiter de cette question, il nous faudra élargir un peu le champ des connaissances auxquelles nous avons fait appel jusqu'ici.

Les partisans des ponts continentaux défendent leur point de vue en alléguant l'étroite parenté entre les faunes ou les flores des continents actuellement séparés. Ces rapports sont indubitables ; des trouvailles paléontologiques de plus en plus abondantes les confirment. A l'heure actuelle, une entente presque parfaite règne parmi les savants qui se sont occupés de ces questions. Tous — à l'exception de ceux pour qui les arbres cachent la forêt — reconnaissent la nécessité d'admettre l'ancienne existence de ces ponts continentaux (1). Nous donnerons à ce propos au chapitre V un résumé des opinions de vingt auteurs en indiquant les ponts continentaux dont l'existence leur a paru certaine. Ainsi, entre l'Amérique du Nord et l'Europe il y eut assurément communication terrestre. Interrompue à plusieurs reprises, elle ne se rompit définitivement qu'à l'époque glaciaire. Une autre relia jusqu'au Crétacé l'Afrique à l'Amérique du Sud. Une troisième : le pont lémurien, fit communiquer Madagascar et l'Inde péninsulaire jusqu'au début du Tertiaire ; enfin, le continent de Gondwana unissait l'Afrique à l'Australie en embrassant Madagascar et l'Inde péninsulaire ; il se morcela au Jurassique inférieur.

Entre l'Amérique du Sud et l'Australie, il y eut sans doute, une communication permettant l'échange des faunes ; toutefois, l'idée d'un pont continental occupant le Pacifique Sud n'a été avancée que par un très petit nombre d'auteurs. La plupart admettent que c'est l'Antarctique qui servit de passage. Elle n'est pas loin, en effet, des points les plus rapprochés de ces deux continents et de

(1) Il existe, en effet, actuellement encore, des adversaires de l'idée de ces anciennes communications. Parmi eux, signalons en particulier G. PFEFFER.

Il objecte que certaines formes, aujourd'hui confinées dans les régions australes, ont été trouvées fossiles dans l'hémisphère nord. Selon lui, il n'y aurait aucun doute à ce qu'elles aient été jadis plus ou moins universellement répandues. A notre avis, cette conclusion ne s'impose en aucune façon et il est encore bien moins certain qu'il faille même, ainsi qu'il le suppose, attribuer une extension universelle aux formes non rencontrées jusqu'ici dans l'hémisphère nord, formes australes dont la répartition actuelle est manifestement discontinuée. En cherchant à expliquer les particularités de l'ère de dispersion des faunes uniquement par des migrations effectuées entre les continents boréaux et austraux par des ponts méditerranéens il émet une hypothèse peu fondée. (ARLDT. Südatlantische Beziehungen. Peterm. Mitt. 62, 44-46, 1916). Il est à peine besoin de dire qu'en admettant d'anciennes communications directes entre les continents austraux, on explique la parenté de leurs faunes bien plus simplement et plus complètement que si l'on fait des terres de l'hémisphère nord un centre d'où ces faunes se seraient répandues en suivant les méridiens. Nous ne nions pas que Pfeffer ait quelques exemples à l'appui de son hypothèse, mais leur généralisation est trop prématurée.

plus, la parenté de leurs faunes se limite aux espèces supportant le froid.

Il nous faut admettre, naturellement, qu'il a existé, en outre, un grand nombre de ponts recouverts aujourd'hui par des mers néritiques. Jusqu'à présent, les partisans des ponts continentaux n'ont fait aucune distinction entre les ponts traversant les bassins océaniques et ceux qui ne devaient être que des zones d'émergence de plateformes continentales. Il y a là pourtant, un point des plus importants à préciser. Notons bien que la théorie des translations, si elle renouvelle le problème des ponts continentaux qu'on suppose avoir existé sur l'emplacement des mers profondes, laisse intacte celle des ponts occupant desmers épicontinentales (mer de Bering, par exemple) puisqu'elle attribue leurs apparitions et leurs disparitions à des mouvements verticaux alternants (1).

Nous avons vu que les partisans des ponts continentaux disposent d'un puissant argument : les faunes et les flores des continents aujourd'hui séparés par de vastes mers, offrent de part et d'autre des traits de parenté évidents et possédaient même aux temps géologiques des espèces identiques. En présence de ce fait, on ne peut guère douter qu'autrefois de larges communications unissaient ces terres. Mais, jusqu'à présent, à la lumière de la théorie de la contraction, il semblait aller de soi que ces ponts étaient de vrais continents intermédiaires qui, par affaissement, gagnèrent peu à peu les profondeurs océaniques, car on était loin d'envisager la possibilité de déplacements horizontaux.

La théorie des translations pourra comme le fait remarquer von ÜBISCH, satisfaire aux exigences de la paléontologie aussi bien que celle des effondrements, admise jusqu'ici et même mieux, car la grande distance séparant actuellement les continents austraux rendra toujours tant soi peu énigmatique la proche parenté de leur faune et de leur flore fossile, même si jadis des continents intermédiaires permettaient à celles-ci de se répandre de l'un à l'autre (2).

(1) Mentionnons à ce propos un des nombreux malentendus par lesquels DIENER croit réfuter nos théories dans son article intitulé « *Die Grossformen der Erdoberfläche* » (Mitt. d. Kais. Kön. Geol. Ges. Wien. 57. 329-349, 1915). « Si, dit-il, on replace l'Amérique à côté de l'Europe, on coupe le pont qui l'unit au socle asiatique par le détroit de Bering ». — Cette objection, que le canevas de Mercator peut suggérer, disparaît si l'on recourt au globe. Tout revient à une rotation de l'Amérique du Nord autour de l'Alaska.

(2) La plupart de ces malentendus ont déjà été relevés par Köppen dans la

L'argumentation de la deuxième loi que nous avons à examiner, loi de la permanence des océans et des continents ne repose pas sur la paléontologie mais sur la géophysique. Elle n'est pas précisément contraire à l'idée des anciennes jonctions territoriales mais plutôt à celle des continents intermédiaires. Nous avons mentionné le premier de ces arguments. Aucun continent n'offrant de dépôts abyssaux de quelque importance, les socles continentaux doivent être regardés sans aucun doute comme permanents. Certains dépôts, réputés abyssaux, se sont en réalité constitués en mer peu profonde : ainsi la craie, comme l'a montré CAYEUX. Mais on admet encore que les sédiments très pauvres en calcaire, tels que les radiolarites des Alpes et certaines argiles rouges, rappelant l'« argile rouge » actuelle, proviennent des abysses puisque l'eau de mer ne dissout le calcaire qu'aux grandes profondeurs (2). L'interprétation exacte de ces roches est cependant encore discutée. Certains auteurs pensent qu'elles se sont formées sous 1.000 à 2.000 mètres seulement, ce qui les ferait appartenir encore aux socles continentaux. Quoi qu'il en soit, même si nous estimons avec KOSSMAT et ANDRÉE que les radiolarites alpines se sont déposées à une profondeur de 4.000 à 5.000 mètres, elles occupent par rapport à l'étendue des continents, un espace trop restreint pour que le principe de la permanence des aires continentales en puisse être infirmé. Ainsi, à aucune époque de l'histoire du globe, les socles continentaux n'ont constitué le fond des océans. Ils ont toujours existé comme tels. L'idée de Lyell suivant laquelle ils auraient subi des alternances répétées de surrections et d'affaissements ne concerne plus que les légères oscillations verticales qui donnèrent lieu aux transgressions et régressions marines.

Cela étant, il devient fort embarrassant de jeter au travers des abysses des ponts continentaux. Car, si la saillie de ces derniers n'a pas été compensée ailleurs par des cuvettes affaissées, les bassins océaniques diminués auraient été bien trop restreints pour contenir

Geographische Zeitschrift. (Über Isostasie und die Natur der Kontinente, Geogr. Zeitschr. 25, p. 39-48, 1919).

(1) L. V. UBISCH, *Wegeners Kontinental-Verschiebungstheorie und die Tiergeographie*, Verb. d. Physical. Méd. Ges. z. Würzburg 1921, p. 1-13.

(2) On trouvera dans l'ouvrage de DACQUÉ, *Grundlagen und Methoden der Paläogeographie*, p. 215, léna 1915, une discussion détaillée au sujet de ces soi-disant dépôts abyssaux.

la masse d'eau du globe. On ne peut ériger de pareils socles au sein des océans sans faire monter leur niveau au point d'immerger tous les continents, anciens et modernes. Seules les hautes chaînes de montagnes seraient épargnées par cette inondation générale. En d'autres termes, l'hypothèse des ponts continentaux ne peut en aucune façon nous conduire au but cherché qui est d'établir une jonction territoriale entre de vastes continents.

Pour éviter ces difficultés, reconnues déjà par WILLIS et PENCK, il nous faudrait imaginer — supposition gratuite et d'ailleurs invraisemblable puisque les preuves nous manquent — que la quantité d'eau totale de notre planète augmentait à mesure que s'affaissaient les continents intermédiaires. Personne, du reste, ne s'est avisé de défendre sérieusement cette idée. Il est bien plus vraisemblable d'admettre que la masse d'eau des mers est restée sensiblement constante. Du fait qu'à toutes les époques géologiques, une part considérable des socles continentaux demeura émergée, nous déduisons que la surface totale du fond des océans n'a pas subi de changements importants. Les bassins océaniques doivent donc être mis au rang des traits permanents de la face de la terre, et cela au même titre que les continents dont l'immobilité n'était pas mise en doute jusqu'ici.

Les partisans de la permanence s'appuient en outre sur le principe connu en géophysique sous le nom d'isostasie ou d'équilibre isostatique de l'écorce terrestre, suivant lequel, nous l'avons vu, la croûte superficielle formée de roches légères flotte dans un magma un peu plus dense. De même qu'un radeau enfonce à mesure qu'on le charge, ainsi la carapace de notre globe fléchit à l'endroit où quelque objet externe, un glacier continental par exemple, vient augmenter son poids. Elle enfonce suivant le principe d'Archimède pour ne reprendre son niveau initial que lorsque la cause a cessé d'agir — dans l'exemple cité, lorsque la glace a disparu —. Les lignes de rivages témoignent des divers stades de ces déplacements verticaux. C'est en les repérant exactement que de Geer (1) a pu établir, pour la dernière glaciation de la Scandinavie, une carte d'isobases montrant que cette péninsule était en son milieu, d'au moins 250 mètres plus bas qu'aujourd'hui, cote qui diminuait vers l'extérieur du massif. Pour la grande glaciation on doit

(1) G. DE GEER, *Om Skandinaviens Geografiska Utveckling efter Istiden*. Serviges Geologiska undersökning; Série C. N° 161 a et b. Stockholm 1896.

admettre ces chiffres encore plus grands. DE GEER a démontré que le bouclier canadien eut à subir une déformation du même ordre. En tablant sur l'isostasie, on peut, suivant RUDZKI (1) calculer approximativement l'épaisseur de ces inlandsis. Ainsi, celle de la calotte glaciaire scandinave dut s'élever à 930 mètres et celle de la calotte laurentienne à 1.670 mètres ; cette dernière fit fléchir de 500 mètres le territoire qu'elle recouvrit. Comme le magma sous jacent n'est pas fluide, mais d'une très grande viscosité, l'équilibre hydrostatique ne peut se rétablir qu'après coup ; les lignes de rivages ont commencé à se former, le plus souvent, après le retrait des glaces et cependant avant la remontée au territoire. De nos jours encore, la Scandinavie s'élève à raison d'un mètre environ par siècle : on peut le constater d'après les nivellements. De semblables fléchissements peuvent aussi se produire sous l'effet de l'accumulation des sédiments. OSMOND FISHER est le premier à l'avoir remarqué. Tout apport superficiel provoque, à longue échéance, il est vrai, l'abaissement du territoire qui le reçoit et dont la surface se maintient de ce fait, à peu près à la même altitude. Ainsi, les sédiments peuvent acquérir une épaisseur de plusieurs kilomètres, sans cesser pour cela de s'accumuler en eau peu profonde.

La théorie de l'isostasie que nous devons à PRATT — bien que le mot n'ait été introduit qu'en 1892 par DUTTON — se trouve confirmée, au point de vue physique, par les mesures de l'intensité de la pesanteur. En 1855 déjà, PRATT avait remarqué que l'Himalaya n'exerce pas sur le pendule une attraction correspondant à sa masse apparente (2). Cette anomalie fut constatée, dans la suite, aux abords de toutes les grandes chaînes de montagnes si bien qu'on dut supposer quelque défaut de masse compensateur, comme l'ont montré notamment, les travaux de AIRY, FAYE et HELMERT. KOSSMAT a fait du reste tout récemment, un exposé très clair de cette question (3).

(1) RUDZKI. *Physik der Erde*. p. 129, Leipzig 1911.

(2) A Kalia, ville de la plaine du Gange, située à 56 lieues anglaises du pied de l'Himalaya, la composante nord de la déviation du pendule n'atteint que 1" alors que l'attraction de la montagne devrait l'élever à 58". A Jalpaiguri, on trouve 1" au lieu de 77". (d'après Kossmat).

(3) F. KOSSMAT, *Die Beziehungen zwischen Schwereanomalien und Bau der Erdrinde*. Geol. Rundschau, 12, p. 165-189, 1921.

Sur les océans d'autre part, on a pu constater que la valeur de g est à peu près normale, bien qu'ils représentent à la surface du globe un défaut de masse évident. Les premières mesures faites sur des îles fournirent, il est vrai, des résultats plutôt contradictoires. Mais actuellement, nous sommes en possession de données concordantes ne laissant subsister aucun doute sur cette anomalie. HECKER, en effet, réussit au cours de plusieurs traversées de l'Atlantique, de l'Océan Indien et du Pacifique, à déterminer la valeur de g en pleine mer et cela grâce à la méthode de MOHN consistant à lire simultanément les données du baromètre à mercure et celles du thermomètre à ébullition, le pendule étant inutilisable à bord. A l'inverse de ce

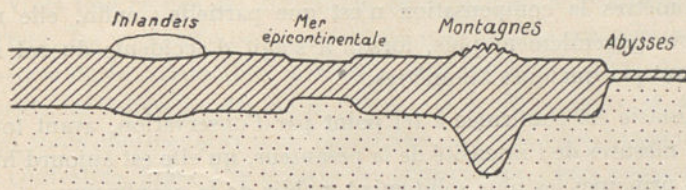


Fig. 3. — Coupe de la lithosphère d'après la loi d'isostasie.

qu'on observe dans les montagnes, il doit donc exister, sous les océans un excédent de masse, compensant le défaut que représentent leurs bassins. Pour expliquer ces anomalies, plusieurs hypothèses ont été émises. PRATT se figurait l'écorce terrestre comme une pâte, primitivement d'épaisseur uniforme, qui se serait peu à peu gonflée et comprimée de manière à former les continents et les bassins océaniques. HELMERT et HAYFORD reprirent cette idée en la développant et elle fut généralement adoptée. Mais aujourd'hui, une autre théorie a pris sa place, théorie dont SCHWEYDAR (1) est le principal défenseur mais qui fut émise en 1859 déjà par ATRY. Elle envisage les continents comme des masses plus légères que leur magma sous-jacent. HEIM fut certainement le premier à supposer, de plus, que sous les chaînes de montagnes cette écorce de densité moindre est plus épaisse qu'ailleurs et qu'elle y refoule plus bas le lourd magma (voir fig. 3). Sous les océans, au contraire, elle doit être réduite à très peu de chose, voir manquer totalement selon nos théories.

(1) W. SCHWEYDAR, *Bemerkungen zu Wegeners Hypothese der Verschiebung der Kontinente*. Zeitschrift, d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin 1921, p. 120-125.

Il importe avant tout de préciser dans quelle mesure l'isostasie s'applique aux masses dont se compose la croûte terrestre. Lorsqu'il s'agit de masses considérables, telles que des continents entiers ou de grands bassins océaniques, elle peut être admise sans plus. Mais elle ne s'applique plus à des détails tels que des montagnes isolées. Des accidents relativement aussi réduits, peuvent être supportés par l'élasticité de la masse entière comme une pierre placée sur un glaçon flottant. Dans ce cas, l'isostasie se réalise uniquement entre l'eau d'une part, et de l'autre le glaçon supportant la pierre. Ainsi, sur les continents, en présence de masses se mesurant par centaines de kilomètres il est bien rare que le pendule ne vérifie pas les principes isostatiques ; si elles ont seulement quelques dizaines de kilomètres la compensation n'est que partielle ; enfin, elle ne s'observe généralement plus, lorsqu'il s'agit d'accidents du sol ne dépassant pas quelques kilomètres.

L'isostasie est confirmée à tel point par l'observation, avant tout par les mesures de l'intensité de la pesanteur, qu'elle est aujourd'hui un des principes les plus solidement établis de la géophysique.

Or, elle pose précisément comme impossible, le fait qu'un domaine abyssal tout entier passe par surrection graduelle à l'état de continent ou qu'un continent (non surchargé) s'affaisse au point d'occuper le fond d'un bassin océanique. Des changements de niveau de peu d'amplitude, atteignant peut être quelques centaines de mètres et provoquant l'émergence ou l'immersion d'une plateforme continentale sont tout à fait admissibles ; ils peuvent notamment faire suite aux déplacements des pôles, la croûte terrestre n'adoptant son nouveau régime de rotation qu'avec un certain retard dû à son inertie. Mais c'est une erreur de croire qu'entre de semblables immersions et celles qui aboutiraient à l'engloutissement d'un continent entier sous 5.000 mètres d'eau, il n'y ait qu'une différence de degré. Car, dans ce cas, il s'agit du passage du niveau de fréquence maximum des altitudes positives à celui des altitudes négatives. Et alors, pourquoi cette prédominance de deux niveaux si nettement distincts ? Nous ne saurions à quelle cause physique attribuer l'absence d'un niveau intermédiaire de quelque importance.

Il est clair que les partisans de la loi de la permanence ont d'excellents arguments à opposer à la théorie des ponts continentaux effondrés. Mais, comme ils admettent, eux aussi, que les continents ont toujours été à la place qu'ils occupent actuellement, leurs

arguments, bien fondés, les amènent à des conclusions inconciliables avec les données paléontologiques. Ils disent, en effet : « les grands bassins océaniques sont un trait permanent de la surface du globe; si leur forme a subi de légers changements, ils n'en contiennent pas moins à être les vastes dépressions primitives que l'eau vint remplir lors de son apparition » [WILLIS] (1). Si l'on admet les translations horizontales, on ne peut plus souscrire entièrement à cette affirmation. Et nous en gardons toutefois le fait suivant : c'est que la surface totale des océans ou des continents est demeurée à peu près la même — dans la mesure des rétrécissements qu'ont subis ces derniers.

Voilà tout ce que ces arguments nous permettent réellement d'affirmer. Du moment que nous devons nous libérer entièrement de la théorie de la contraction, il nous a suffi de tenir compte des arguments les mieux fondés de la théorie de la permanence et de celle des ponts continentaux pour réconcilier ces deux idées apparemment si contraires, grâce à la théorie des translations. Nous pouvons nous résumer ainsi :

Les continents furent jadis reliés entre eux, non par des ponts continentaux aujourd'hui effondrés, mais parce que leurs masses, rapprochées entraient en contact.

La loi de la permanence subsiste; elle ne s'applique pas aux divers océans ou continents mais à l'ensemble des surfaces qu'ils occupent respectivement.

Au cours des chapitres suivants, nous exposerons avec plus de détails les principaux arguments militant en faveur de la théorie des translations.

(1) BAILEY WILLIS, *Principle of palaeography*, Sc. 31. N. S., N° 790, p. 241-260, 1910. C'est bien là l'expression la plus forte de cette idée, d'autres auteurs tels que SOERGEL (*Die Atlantische « Spalte », Kritische Bemerkungen zu A. Wegeners Theorie von der Kontinentalverschiebung*, Monatsber. d. Deutsch. Geol. Ges. 68, p. 200-239, 1916), cherche un moyen terme en réduisant les continents intermédiaires à des ponts aussi étroits que possible, bordant les bassins océaniques. Ce compromis ne semble pas très heureux : il explique plus difficilement la parenté des faunes et ne satisfait pas à toutes les exigences de la géophysique.

II. LES PREUVES

CHAPITRE III

Arguments tirés de la géophysique

La statistique des surfaces terrestres de même altitude met en lumière le fait curieux que l'écorce du globe présente deux niveaux nettement prédominants entre lesquels les surfaces d'altitude moyenne sont une minorité. De ces deux altitudes, la plus élevée répond aux aires continentales, la plus basse aux domaines abyssaux. Pour s'en rendre compte, il suffit de diviser la surface du globe en kilomètres carrés et de classer ces derniers par rang d'altitude. En portant en abscisses les surfaces et en ordonnées les altitudes, on obtient une courbe connue sous le nom de courbe hypsographique, où ces deux paliers apparaissent nettement. En chiffres, la fréquence des différentes altitudes peut s'exprimer comme suit d'après les calculs les plus récents de H. WAGNER (1)

	PROFONDEURS							HAUTEURS				
au dessous de	6	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0-1	0-1	1-2	2-3	3 km.	et au dessus
	1,0	16,5	23,3	13,9	4,7	2,9	8,5	21,3	4,7	2,0	1,2	0/0

On s'en fera une idée plus claire encore en considérant le graphique de TRABERT (2) (fig. 5). Il est basé sur d'anciennes mesures, il est vrai, mais qui diffèrent trop peu des mesures récentes pour que ce fait ait quelque importance ici. Les surfaces de même altitude y ont été réparties de 100 en 100 mètres. Leurs pourcent de fréquence se réduisent donc au 1/10 environ de ceux qu'indique le

(1) H. WAGNER. *Lehrbuch d. Geographie*, Bd. I, Allg. Erdk., 2. Teil : Physikal. Geographie. p. 271, Hannover 1922. Pour établir ses moyennes, il a tenu compte de la nouvelle bathymétrie des océans publiée par KOSSINNA (*Die Tiefen des Weltmeeres*, Veröff. d. Institut für Meereskunde, Neue Folge A. Heft. 9 Berlin 1921). Les figures que nous donnons ici sont basées sur les données de KRÜMMEL et de TRABERT qui diffèrent peu de celles qu'on a obtenues récemment.

(2) TRABERT *Lehrbuch d. Kosmischen Physik* p. 277, Leipzig et Berlin 1914.

précédent tableau. Les deux maxima tombent, dans ce cas, à 4.700 mètres et à +100 m. approximativement. Ajoutons à ce propos que le nombre croissant des sondages fait valoir de mieux en mieux la brusque déclivité marquant le passage du plateau continental aux grandes profondeurs. (Comparer à ce point de vue les anciennes cartes bathymétriques à celles de GROLL (1) par exemple). Tandis qu'en 1911, TRABERT attribuait encore 4,0 % de

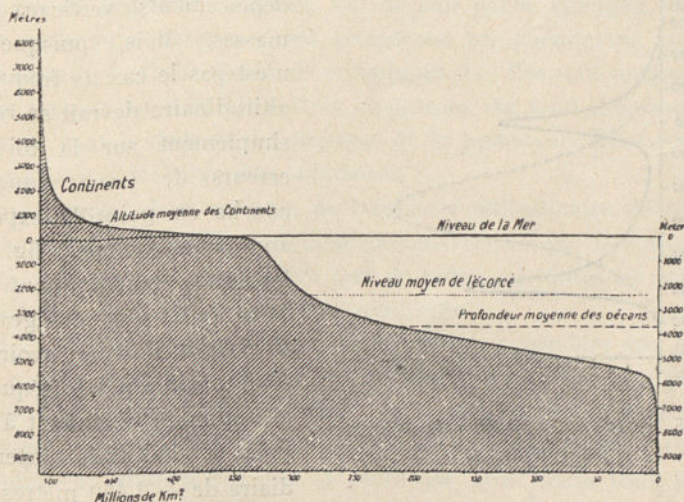


Fig. 4. — Courbe hypsographique de la surface terrestre, d'après KRÜMMEL

fréquence aux zones comprises entre 1 et 2 kilomètres de profondeur et 6,0 % à celles comprises entre 2 et 3 kilomètres, WAGNER, en basant ses calculs sur les dernières cartes bathymétriques de GROLL, trouve respectivement 2,3 et 4,7 % seulement, pour les mêmes zones. Aussi peut-on bien s'attendre à voir ces deux maxima s'accuser plus fortement encore.

La géophysique, n'a guère de donnée plus claire et plus certaine que celle que nous avons énoncée au début de ce chapitre. Le fait que la surface du globe se répartit à deux niveaux privilégiés, représentés par l'alternance caractéristique des aires continentales et des surfaces abyssales, est bien connu depuis au moins 50 ans

(1) GROLL, *Tiefenkarten der Ozeane*, Veröff. d. Inst. S. Meereskunde. N. E. A. Heft 2. Berlin 1912.

et pourtant, jusqu'ici, personne n'a cherché à l'expliquer. Seul SÖR-
GEL, dans sa polémique dirigée contre la théorie des translations (1),
essaye de le faire, en attribuant ce fait à des soulèvements et des
affaissements. Mais cette tentative repose sur des considérations
fausses. S'il existait primitivement un seul niveau d'équilibre, ainsi
qu'il le croit, il faudrait qu'une cause physique eût motivé sa

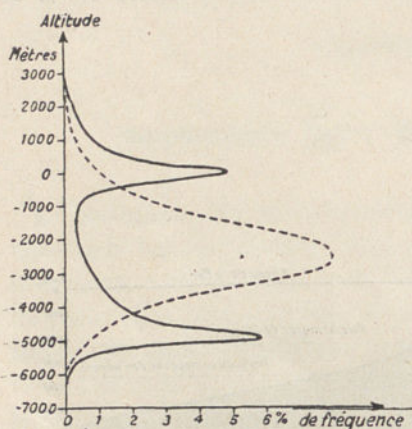


Fig. 5. — Les deux maxima de fréquence
altitudinaire.

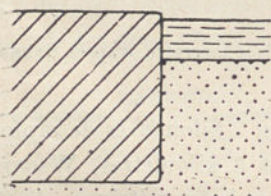


Fig. 6. — Coupe schématique à travers le
bord d'un continent.

continetales et les fonds océaniques comme deux couches distinctes
de l'écorce terrestre. Elles se comporteraient entre elles comme
des icebergs envers l'eau qui les baigne — soit dit en exagérant un

séparation en deux niveaux
de fréquence maximum, par
déplacements verticaux des
masses. Mais, puisque ce
n'est pas le cas, la fréquence
altitudinaire devrait se régler
simplement sur la loi des
erreurs de GAUSS (que la
courbe en pointillé exprime
approximativement fig. 5)
les écarts étant d'autant plus
rares qu'ils sont plus grands.
Il devrait donc y avoir un
seul maximum de fréquence
altitudinaire répondant à peu
près à l'altitude intermé-
diaire de -2.450 mètres. Au
lieu de cela, nous en constata-
tions deux et la courbe qui
les exprime répète deux fois
celle de GAUSS. Il faut en
conclure qu'il existait, pri-
mitivement déjà, deux ni-
veaux privilégiés. De là il n'y
a qu'un pas, inévitable sem-
ble-t-il, à concevoir les aires

(1) W. SÖRCEL, *Die Atlantische «Spalte» Kritische Bemerkungen zu Wegeners Theorie von der Kontinentalverschiebung*, Monatsber. d. D. Geol. Ges. 68, 200-239, 1916.

peu. Ce pas nous paraît si aisé et si naturel que nos après venants seront bien étonnés d'apprendre que nous avons mis si longtemps à le franchir. La figure 6 offre une coupe verticale schématique du bord d'un socle continental.

Il faut naturellement se garder de schématiser à l'excès cette nouvelle manière de concevoir le sol sous-océanique. En comparant les continents à des icebergs tabulaires, on doit tenir compte du fait qu'entre ces derniers, la surface de la mer peut se couvrir de glace fraîche, ou de fragment détachés, soit de leur partie émergée, soit de leur socle subaquatique. Nous retrouvons un phénomène analogue à certains endroits des fonds océaniques. Les îles sont toujours enfouies jusqu'à 50 à 70 kilomètres au-dessous du fond des mers, comme on peut le déduire des mesures de la pesanteur. Elles sont comparables aux icebergs non tabulaires.

L'argument des deux maxima de fréquence altitudinaire devrait suffire entièrement à justifier nos conceptions (rendues par le schéma de la fig. 6) mais on se demandera tout de même, si toutes les données de la géophysique se concilient avec elles.

Il est clair que les anomalies de la pesanteur constatées sur les océans s'expliquent tout aussi bien par notre hypothèse que par celle qui supposait leur fond constitué par la matière des continents simplement réduite à une plus faible épaisseur et non absente. Car elles indiquent uniquement que la roche est plus dense sous les océans que sous les continents. Nous n'avons pas besoin d'entrer plus avant dans cette question.

En ce qui concerne le magnétisme terrestre, A. NIPPOLDT nous fit remarquer que, de l'avis général, les fonds océaniques seraient formés de substances plus susceptibles de s'aimanter ; ils seraient donc plus riches en fer, probablement, que les socles continentaux. La discussion relative au globe magnétique construit par HENRY WILDE (1) souligna ce fait. Elle montra en effet qu'il faudrait recouvrir de tôle ses surfaces océaniques pour obtenir une répartition des forces magnétiques répondant à la réalité. A. W. RÜCKER (2) parle de cet essai en ces termes : « M. WILDE a construit un bon modèle de globe magnétique : il comprend un champ primaire dû à une sphère uniformément aimantée et un champ secondaire produit par

(1) Roy. Soc. Proc. June 19, 1890 et January 22 1891.

(2) A. W. RÜCKER, *The secondary magnetic field of the earth*. Terrestrial Magnetism and atmospheric Electricity 4. 113-129 March-December 1899.

des masses de fer disposées près de la périphérie (du globe) et aimantée par induction. Ce fer a été placé principalement sous les océans... M. WILDE insiste avant tout sur ce fait ». RACLOT (1) de même, a confirmé récemment que le modèle de WILDE donne bien les traits principaux de la répartition du magnétisme terrestre. On n'a pas encore réussi, il est vrai, à calculer la différence au point de vue du magnétisme entre les continents et les surfaces océaniques. Cela tient apparemment à l'influence d'un champ magnétique d'origine inconnue bien plus vaste que les précédents, et qui n'aurait pas égard à la topographie du globe. Mais nous ignorons son origine. Les faits concernant le magnétisme terrestre ne nous empêchent en aucune façon de supposer qu'il y a plus de fer dans les roches sous-océaniques que dans celles dont se composent les continents. C'est même l'avis des géophysiciens (tels que AD. SCHMID) qui ne tiennent pas pour concluante la démonstration de WILDE. On admet généralement que la teneur en fer de l'enveloppe silicatée du globe augmente avec la profondeur, et que l'intérieur de la terre est occupé principalement par ce métal. De ce fait, les roches sous-océaniques appartiendraient à une couche plus profonde de la lithosphère. D'autre part, le magnétisme cesse en général à la température du rouge, soit à 15 ou 20 kilomètres de profondeur, d'après le degré géothermique moyen (2). La zone fortement aimantée devrait donc occuper les couches supérieures des fonds océaniques et cela semble bien s'accorder avec notre hypothèse qui en élimine les roches faiblement magnétiques.

La sismologie confirme aussi notre hypothèse. E. TAMS (3) a cherché si les ondes sismiques superficielles se propagent à la même vitesse sur les fonds océaniques que sur les continents et il a obtenu les valeurs suivantes:

(1) Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 164, p. 150, 1917.

(2) D'après J. Friedlaender, (*Beitr. z. Geophys.* 11, Kl, Mitt. 84-94 1912), la conductibilité thermique doit-être plus faible qu'ailleurs dans les roches volcaniques entrant en question ici, (degré géothermique dans la lave : 17m) de sorte que l'épaisseur de la zone magnétique ne pourrait bien être que de 8 à 9 km. sous les océans.

(3) E. TAMS. *Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der seismischen oberflächenwellen längs kontinentaler und ozeanischer Wege*, Centralblatt f. Min.-Geol. u. Paläont. 1921, p. 44-52 et 75-83.

1. Fonds océaniques		<i>n</i>
Californie 18 avril 1906 . . .	$v = 3,847 \pm 0,045$ km/sec.	9
Colombie 31 janvier 1906 . . .	$3,806 \pm 0,046$ »	18
Honduras 1 juillet 1907. . . .	$3,941 \pm 0,022$ »	20
Nicaragua 30 décembre 1907 . .	$3,916 \pm 0,029$ »	22

2. Continents.

Californie 18 avril 1906. . . .	$3,770 \pm 0,104$ »	5
Philippines I 18 avril 1907. . .	$3,765 \pm 0,045$ »	30
— » II 18 avril 1907. . . .	$3,768 \pm 0,054$ »	27
Buchara 21 octobre 1907. . . .	$3,837 \pm 0,065$ »	19
» 27 octobre 1907. . . .	$3,760 \pm 0,069$ »	11

Ainsi, bien que les valeurs de ces deux tableaux empiètent en partie les unes sur les autres, leurs moyennes respectives n'en attestent pas moins une sensible différence de vitesse. La propagation des ondes est de 0,1 km/sec. plus rapide à la surface des fonds océaniques qu'à celle des continents. Ce résultat concorde bien avec celui que l'on peut obtenir par un calcul basé sur les propriétés physiques des roches éruptives profondes.

D'ailleurs, TAMS a cherché à établir ses moyennes sur le plus grand nombre possible d'observations. Sur 38 tremblements de terre, il obtient pour le Pacifique $v = 3,897 \pm 0,028$ km/sec ; sur 45 pour l'Eurasie ou l'Amérique $v = 3,801 \pm 0,029$ km/sec. soit les mêmes valeurs que précédemment.

ANGENHEISTER (1) a fait récemment une étude semblable. Il base ses calculs sur une série d'ébranlements observés sous le Pacifique. Il tient compte non seulement des ondes principales mais aussi des premiers frémissements — que TAMS négligeait. Ainsi, sur un nombre restreint de données il est vrai, il constate une différence bien plus grande encore : « La vitesse des ondes principales est, dit-il, sous le Pacifique du 21 au 26 % plus grande que sous le continent asiatique. Pour les frémissements précurseurs P et S (2)

(1) G. ANGENHEISTER, *Beobachtungen an pazifischen Beben*. Nachr. d. Kgl. Ges. d. Wiss. z. Göttingen. Math.-Phys. Klasse 1921, 34 p. — Le travail d'OMORI mentionné dans l'édition précédente indiquait une différence bien plus grande ; mais comme il repose sur de fausses considérations sur la nature des ondes sismiques, nous le passerons sous silence.

(2) On désigne par P (*undae primea*) les ondes élastiques longitudinales, le premier des frémissements précurseurs ; et par S (*undae secunda*) les ondes transversales, le 2^e frémissement précurseur.

le temps mis à parcourir 6° respectivement de 13 et de 25 sec. plus faible sous le Pacifique que sous l'Europe ce qui donne aux ondes S sous l'Océan une vitesse de 18 % supérieure. L'intensité de l'ébranlement diminue plus rapidement sous le Pacifique que sous l'Asie. La période des longues ondes (II phase) est plus grande sous le Pacifique qu'en Asie. » Toutes ces différences indiquent conformément à notre hypothèse, que le sol sous-océanique est occupé par des roches se distinguant de celles des continents, en particulier par leur densité plus forte. Il importe de noter qu'il s'agit ici avant tout, d'ondes de surface ; les données qui les concernent peuvent seules fournir des preuves certaines de l'absence totale des roches légères superficielles au fond des océans.

Nous sommes bien près de nous demander si l'on ne peut pas se procurer quelques échantillons de cette roche sous-océanique. La chose sera impossible longtemps encore. Jusqu'ici, la drague en a rapporté toutefois des menus fragments; et il est intéressant de constater qu'ils sont, d'après KRÜMMEL (1), en majeure partie d'origine volcanique. « Les pierres ponceuses dominent, accompagnées de fragments de sanidine, de plagioclases, de hornblende, de magnétite, de verre volcanique avec son produit de désagrégation la pélagonite ; on trouve aussi de la lave, de l'argile andésitique, etc. » En fait, les roches volcaniques se distinguent par leur forte densité, leur teneur en fer plus élevée et on les fait provenir, en général, des grandes profondeurs terrestres. SUESS a nommé « sima » l'ensemble des roches basiques où le basalte domine, et cela d'après les premières lettres de leurs composants essentiels : le silicium et le magnésium. Il les distingue des roches, riches en silicium et en aluminium, qu'il groupe sous le nom de « sal ». Elles sont représentées principalement par les gneiss et les granites qui forment le soubassement de nos continents (2). Pour donner suite à une proposition de PFEFFER j'emploierai de préférence le mot « sial » afin d'éviter la confusion possible du mot « sal » avec le terme latin signifiant le sel. Le lecteur aura probablement déjà conclu de ce qui vient d'être dit que les roches du groupe du sima, dont nous ne connaissons que

(1) KRÜMMEL, *Handb. d. Ozeanographie*. 1. 193 et 197, Stuttgart, 1907.

(2) Cette distinction fut déjà proposée par ROBERT-BUNSEN. Il rangeait les roches non sédimentaires en « trachytiques normales » (basiques) et en « pyroxénitiques normales » (riches en acide silicique); SUESS leur donna, toutefois, des noms moins encombrants.

les représentants intrusifs amenés par le volcanisme à la surface du sial des continents où elles paraissent étrangères, ne sont réellement à leur place que sous les socles continentaux et qu'elles forment en même temps le sous-sol des bassins océaniques. Le basalte a toutes les propriétés que nous demandons à la roche cachée sous les océans. Sa densité est bien à peu près celle que, par un calcul basé sur l'épaisseur des socles continentaux, nous demandons à la masse qui les baigne.

Il n'est pas superflu de donner à ce sujet quelques précisions. L'épaisseur des socles continentaux a été calculée d'une manière différente par HAYFORD et par HELMERT. Le premier, se basant sur les anomalies de la pesanteur constatées aux Etats-Unis en quelques centaines de points, établit ce qu'on appelle « le niveau d'équilibre » de la pression (notamment). Ce niveau se confond avec la surface de base des socles continentaux ; il le place à — 114 kilomètres. HELMERT n'arriva pas loin du même chiffre en mesurant la gravité à 51 stations côtières : il trouva — 120 kilomètres. La concordance relative de ces valeurs, obtenues par des méthodes différentes, les rend plus certaines ; mais il ne faudrait pas en inférer que les socles continentaux ont partout la même épaisseur (1). Les lois de l'isostasie n'en seraient pas satisfaites. On doit admettre, en effet, que cette épaisseur est beaucoup plus faible sous les plateformes continentales que sous les hauts plateaux tels que le Tibet (2). Elle aurait comme limites 50 et 300 kilomètres.

Nous sommes donc à même de calculer facilement dans quel rapport les densités du sial et du sima doivent se trouver pour qu'un bloc de sial de 100 kilomètres d'épaisseur (M) dépasse de 4,8 kilomètres le niveau du sima (surfaces abyssales) qui le baigne, autrement dit qu'il soit immergé de 95,2 km. (voir fig. 7). A la base des socles continentaux, il doit y avoir équilibre de pression. Si nous désignons par x la densité du sial et par y celle du sima, et que nous

(1) Ces évaluations reposent sur l'hypothèse de PRATT. SCHWEYDAR, fait remarquer dans une note préliminaire que, si l'on renonce à l'hypothèse d'Airy, l'on peut attribuer 200 km d'épaisseur aux socles continentaux, et dans ce cas une différence de densité de 0,034 entre le sial et le sima suffit à faire émerger les masses continentales de 5 km. environ. (SCHWEYDAR. *Bemerkungen zu Wegeners Hypothese der Verschiebung der Kontinente*. Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin 1921, p. 121.)

(2) HAYDEN place, sous l'Himalaya, le niveau de compensation à 330 km. et sous l'avant pays de cette chaîne à 144 km. Son estimation, il est vrai, ne résiste pas à toute les objections.

tenons compte de celle de l'eau de mer, soit 1,03, nous devons avoir l'égalité suivante :

$$100 x = 95,2 y + 4,7 \cdot 1,03$$

$$x = 0,952 y + 0,048.$$

Or, comme les roches volcaniques telles que les basaltes, diabases, métaphyres, gabbros, olivines, andésites, porphyrites, diorites,

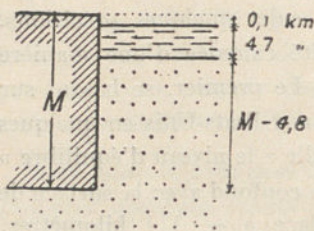


Fig. 7. — Coupe schématique à travers le bord d'un socle continental

etc., ont en général une densité d'environ 3,0 (atteignant rarement 3,3) nous pouvons poser $y = 3,0$, d'où $x = 2,9$. En fait, WHITMANN, CROSS et GILBERT indiquent pour le gneiss 2,615 comme densité moyenne (12 mesures), d'autres valeurs oscillent entre 2,5 et 2,7. Cette petite différence s'explique aisément du fait que la densité croît avec la profondeur aussi bien dans la sphère de sial que dans celle de sima. Le

basalte nous est venu des grandes profondeurs, tandis que le gneiss fait partie des couches superficielles. Il est vrai qu'on ne peut pas donner à cela des preuves mathématiques, car nous ne savons pas de combien la densité croît avec la profondeur. Nous savons seulement, par l'étude des tremblements de terre, que la densité moyenne de l'enveloppe silicatée du globe, épaisse d'environ 1.500 km. atteint (déjà) 3,4. Au point de vue quantitatif, en tout cas, ces chiffres répondent bien à notre hypothèse (1).

Pour terminer, il nous faut encore mentionner, l'uniformité des fonds océaniques puisqu'elle parle en faveur de nos idées. On a remarqué, il y a bien longtemps déjà, que le sol des océans ne présente souvent sur de grandes étendues, que des dénivellations extrê-

(1) Le petit tableau suivant montrera d'une manière plus précise le rapport de a densité à la profondeur d'immersion. L'épaisseur des socles y est calculée pour un sima de densité 3,0. Si cette densité décroît de 0,1 comme celle du sial les valeurs de ce tableau ne doivent être diminuées que de 5 0/0.

ÉPAISSEUR DE LA MASSE DE SIAL PLONGEANT DANS LE SIMA DE DENSITÉ 3,0

Densité du sial		2,6	2,7	2,8	2,9	2,95
Altitude de la surface émergée	100 m.	24	32	48	96	192 km
	4000 m.	53	71	106	213	430 "

mement faibles — particularité qui n'est pas sans utilité pratique pour la pose des câbles. Ainsi, sur 100 sondages effectués pour placer un câble sur un parcours de 1.540 kilomètres entre les îles Midway et Guam on a constaté une différence de niveau de 767 mètres seulement (les altitudes extrêmes repérées étant — 5510 et — 6277 mètres). Sur une distance de 10 mille marins, où la moyenne de 14 sondages donna — 5.938 mètres d'altitude, les plus grands écarts ne furent que de + 36 et — 38 mètres (1). Toutefois le principe de l'uniformité des fonds océaniques a donné lieu récemment à quelques objections, le réseau des sondages ayant manifestement de trop grandes mailles. En effet, sur les continents, des mesures d'altitudes prises à des endroits aussi espacés pourraient faire croire à une semblable uniformité. Pourtant, KRÜMMEL et, avec lui, la plupart des savants sont revenus de ce scepticisme d'un temps à l'idée que — les sillons abyssaux mis à part — la différence entre les surfaces continentales et celles des abysses est tout de même foncière. Elle est d'autant plus frappante qu'au fond des mers les reliefs pourraient être bien plus accusés en raison de la perte de poids que l'eau leur fait subir. L'uniformité des fonds océaniques est l'indice de leur plasticité plus grande et de leur degré plus élevé de fluidité.

Les chaînes plissées manquent au fond des océans. Alors que les socles continentaux sont sillonnés en tous sens par des plissements anciens et récents, les immenses surfaces abyssales ne nous ont révélé jusqu'ici, malgré bien des sondages, aucune formation qui puisse être assimilée avec quelque vraisemblance à une chaîne de montagne. Certains auteurs considèrent, il est vrai, le seuil de l'Atlantique de même que la dorsale séparant les deux fosses voisines de Java, comme des chaînes plissées en voie de formation; mais cette idée a si peu de partisans que nous pourrions nous contenter ici de renvoyer à la critique d'ANDRÉE (2).

Comment expliquer cette absence de montagnes, car enfin, il faut bien admettre que des compressions se produisent aussi dans le sima? La réponse s'entend d'elle même si, en matière d'orogénèse, nous tenons compte de l'isostasie. Du moment que les socles continentaux de 100 kilomètres d'épaisseur, sont, en majeure partie, enfouis dans le sima, ils doivent lors d'une compression se tuméfier davantage par le bas que par le haut. Une petite partie, seulement, de

(1) KRÜMMEL. *Handb. d. Ozeanographie* I. p. 91 Stuttgart 1907.

(2) K. ANDRÉE, *Über die Bedingungen der Gebirgsbildung*. S. 86 ff. Berlin 1914.

la contraction horizontale se traduira par l'élévation du terrain. (Nous reviendrons sur ce point au chapitre XI.) Par conséquent, si le resserrement des masses continentales fait saillir avant tout leur face interne, il est clair que le sima, soumis à une compression horizontale pourra d'autant moins accuser des reliefs extérieurs ; la matière visqueuse s'écoulera par dessous ou par les côtés des socles, PENCK (1) a prétendu que « l'absence de failles sismiques sur le front des continents en dérive paraît démentir formellement ces idées sur la constitution de la croûte terrestre et sur la mobilité des continents. » Son objection n'est donc pas décisive. En revanche, le fait que les abysses n'ont pas de chaînes plissées, nous confirme qu'ils appartiennent au sima. Plissés, les fonds océaniques le sont certainement ; mais, s'ils étaient recouverts de sial, leurs plissements se manifesteraient en partie du moins, par des accidents de surface. Ces faits seront encore exposés avec plus de précision au chapitre IX.

Les arguments allégués au cours de ce chapitre au sujet de la constitution des fonds océaniques sont remarquablement concordants. C'est pourquoi cette face de nos conceptions a été, jusqu'ici, la moins attaquée de toutes. La plupart des géophysiciens, notamment, l'ont sans doute admise.

(1) A. PENCK. *Wegeners Hypothèse des Kontinentalen Verschiebungen*, Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu. Berlin 1921, p. 110-120.

CHAPITRE IV

Arguments géologiques

La structure géologique des deux bords de l'Atlantique fournit un contrôle très précis à l'hypothèse de leur ancienne jonction. Il faut nous attendre, en effet, à retrouver de chaque côté de cette faille immensément élargie, les plissements ou autres formations qu'elle a partagés et leurs portions disjointes doivent être orientées de telle façon qu'elles joignent exactement lorsqu'on replace les continents côte à côte. Comme cette reconstruction s'opère d'après les contours des masses continentales qui s'emboîtent parfaitement, on ne peut pas l'adapter de force aux exigences de la géologie. Nous y trouverons donc un critère tout à fait indépendant qui peut fournir à la théorie des translations des preuves de première importance.

La faille atlantique a sa largeur maximale à son extrémité sud, c'est-à-dire à l'endroit où elle prit naissance. Elle y atteint 6,220 kilomètres. Entre le cap Saint-Roque et le Cameroun, il n'y a plus que 4,880 kilomètres ; entre le banc de Terre Neuve et la plateforme des îles Britanniques : 2.410 ; entre le Scoresby Sound et Hammerfest : 1.300 ; enfin, le Spitzberg n'est plus qu'à 2 à 300 kilomètres de la plateforme du Nord-Est du Groenland et ce sont là, semble-t-il, les points les plus récemment séparés par la fracture.

Commençons par le sud notre comparaison. L'extrême sud de l'Afrique est parcouru de l'est à l'ouest par une chaîne permienne (les Zwarte Berge). Si l'on rétablit les continents dans leur position initiale, cette chaîne se prolongerait au sud de Buenos-Aires dans une région qui, au premier abord ne présente sur la carte rien de très particulier. Cependant, chose intéressante, KEDEL y a constaté de vieux plissements qui, aux points de vue tectonique, stratigraphique et paléontologique ne ressemblent pas seulement à ceux qui leur font suite au N.-W., c'est-à-dire aux Cordillères traversant les provinces de San Juan et de Mendoza pour aboutir aux Andes,

mais avant tout aux chaînes du Cap. « Nous trouvons dans les Sierras de la province de Buenos-Aires et plus spécialement dans leurs chaînons méridionaux, une série stratigraphique très semblable à celle des montagnes du Cap. La concordance semble porter au moins sur trois termes : les grès inférieurs de la transgression éodévonienne, les schistes fossilifères qui répondent à la plus grande extension de cette transgression, enfin, une formation plus jeune, très caractéristique : les conglomérats glaciaires du paléozoïque supérieur. Les sédiments dévoniens aussi bien que les conglomérats glaciaires sont, ici comme dans les montagnes du Cap, fortement plissés. La poussée s'est effectuée principalement du sud au nord, dans l'une et l'autre de ces chaînes » (1). Nous avons donc la preuve qu'il s'agit ici d'un long plissement qui traverse la pointe sud de l'Afrique, pénètre en Amérique, au sud de Buenos-Aires et suit finalement le cours des Andes après s'être infléchi vers le nord. A l'heure actuelle, un fond océanique uniforme sépare de plus de 6.000 kilomètres les deux tronçons de cette chaîne. Leurs extrémités se raccordent parfaitement dans notre reconstruction qui, en cet endroit plus qu'en tout autre ne se prête à aucune adaptation. Les distances qui les séparent respectivement du Cameroun et du Cap Saint-Roque sont exactement pareilles (2). C'est une preuve très frappante de la justesse de notre reconstruction. Le fait que la chaîne sud-africaine en touchant la côte atlantique, envoie vers le nord une ramification (Monts Cedar) ne diminue pas de beaucoup la valeur de cette concordance. Cette branche, en effet, ne tarde pas à s'effacer ; elle a le caractère d'une déviation locale qui peut être due à quelque discontinuité présente au lieu de la future

(1) KEIDEL. *Ueber das Alter der Verbreitung und der gegenseitigen Beziehungen der verschiedenen tektonischen Strukturen in den argentinischen Gebirgen*. Etude présentée à la xii^e session du Congrès géologique international, reproduite du Compte-rendu, p. 671-687 [Tirage à part sans date]. — Voir aussi son exposé très détaillé intitulé : *La geología de las Sierras de la Provincia de Buenos Aires, y sus Relaciones con las Montañas de Sud Africa y los Andes*. *Anales del Ministerio de Agricultura de la Nación, Sección Geología, Mineralogía y Minería* tomo xi, Num. 3. Buenos Aires 1916.

(2) Ce n'est pas le cas, il est vrai, lorsqu'on mesure ces distances à partir de l'isobathe — 1000 m. du cap Saint-Roque et du Cameroun. D'ailleurs, pris à cette profondeur, les contours des continents ne s'emboîtent plus. Nous montrerons plus loin que les anciennes limites des continents se maintiennent bien mieux dans la partie supérieure du talus actuel que dans sa partie inférieure qui est d'une manière générale déformée par des épanchements latéraux ; il faut donc, pour établir la jonction des masses, se baser sur le bord supérieur du talus.

disjonction. De semblables ramifications sont encore bien plus fréquentes dans les chaînes européennes d'âge carbonifère et tertiaire. Elles ne nous empêchent pas, cependant, de ramener leurs plissements en un système défini et de les faire dépendre des mêmes causes. Et si les plissements africains ont duré jusqu'à une époque relativement récente, comme l'ont prouvé les dernières recherches, on n'en peut pas conclure qu'ils soient d'un autre âge que leurs prolongements américains. Nous lisons en effet dans KEIDEL : « Le conglomérat glaciaire représente dans les Sierras, la formation plissée la plus récente ; dans les montagnes du Cap, les couches d'Ecça, situées à la base de la série de Gondwana (Karroo), portent encore les traces d'un mouvement orogénique. De part et d'autre, les plissements principaux peuvent s'être effectués du Permien au Crétacé inférieur ».

L'exemple des chaînes du Cap se prolongeant dans les Sierras de Buenos-Aires est loin d'être le seul qui confirme notre hypothèse ; les côtes de l'Atlantique nous en fourniront encore bien d'autres. Le vaste plateau africain de gneiss qui n'a subi depuis longtemps aucun plissement — offre déjà, dans ses grandes lignes, une ressemblance frappante avec celui du Brésil. De plus, la nature des roches éruptives et sédimentaires aussi bien que les directions de leurs plissements, nous montreront que cette ressemblance ne se limite pas aux traits généraux.

Les roches éruptives de ces deux continents n'ont été mises en parallèle que tout récemment par BROUWER (1). Il n'y trouve pas moins de cinq termes de comparaison : 1. le vieux granit, 2. le granit récent, 3. les roches alcalines 4. les roches volcaniques d'âge jurassique et la dolérite intrusive, 5. la kimberlite, l'alnoïte, etc. Le vieux granit est représenté, au Brésil, par ce qu'on appelle le « complexe brésilien » et en Afrique, par le « complexe fondamental » (sud-ouest africain), le « Malmesbury System » (sud de la Colonie du Cap) et le « Swaziland System » (Transvaal et Rhodesia). Ces roches occupent la plus grande partie des côtes atlantiques du Brésil et de l'Afrique, conférant en bien des points le même caractère à la topographie. Le granit récent est intrusif, au Brésil, dans les pro-

(1) H. A. BROUWER, *De alkaligesteenten van de Serra do Gericino ten Noordwesten van Rio de Janeiro en de overeenkomst der eruptiefgesteenten van Brazilië en Zuid-Afrika*. Kon. Akad. van Wetensch. te Amsterdam, 1921, Deel 29, p. 1005-1020.

vinces de Minas Geraes et de Goyaz « série granitique de Minas » où il renferme des filons aurifères comme dans la province de Sao Paulo. Les granits qui leur correspondent en Afrique sont le granit d'Erongo (pays d'Herero), le granit de Brandberg (nord-ouest du Damara) et les granits du « Bushveld Igneous Complex » (Transvaal). En outre, sur les deux rivages, les roches riches en alcalis occupent exactement les points qui, à notre avis, se touchaient primitivement : on les trouve du côté brésilien, à différents endroits de la Serra do Mar (Itatiaya, Serra do Gericino près de Rio de Janeiro, Serra de Tingua, Cabo Frio) ; du côté africain dans le Lüderitzland, les parages du Cap Cross, au nord de Svakopmund, ainsi que dans l'Angola. On peut encore faire entrer dans ce groupe les roches éruptives occupant, à quelque distance des côtes, sur une trentaine de kilomètres, les régions de Poços Caldas au sud de la province de Minas Geraes et de Pilandsberg au Transvaal. La texture de ces roches alcalines massives, filonniennes et effusives offre dans ces deux régions une identité tout à fait remarquable. A propos du quatrième groupe (roches éruptives d'âge jurassique et dolérite intensive) BROUWER nous donne les renseignements suivants : « L'étage de base du « Santa Catharina System » qui correspond à peu près à celui du Karroo présente également une série imposante de roches éruptives d'âge vraisemblablement jurassique, occupant de vastes étendues dans les provinces de Rio do Sul, Santa Catharina, Parana, Sao Paulo, Matto Grosso de même qu'en Argentine, dans l'Uruguay et le Paraguay ». En Afrique, c'est notamment dans la formation du Kaoko que nous les retrouvons, et cela entre 18 et 21° de latitude sud. Le cinquième groupe enfin (Kimberlite, Alnoïte, etc.) est le plus connu puisque les roches qu'il réunit renferment du diamant, au Brésil comme en Afrique où leurs dépôts se présentent sous une forme particulière qui leur a valu le nom de *pipes* en anglais. Les diamants blancs se rencontrent, au Brésil, dans la province de Minas Geraes et en Afrique, au nord de l'Orange seulement. Le diamant étant trop rare pour servir de terme de comparaison, c'est à sa roche mère, la kimberlite, que nous nous adresserons plutôt. Elle nous fera voir plus nettement ces homologues. Elle est surtout répandue en Afrique, mais elle se présente aussi, dans la province de Rio de Janeiro, sous forme de filons. Selon BROUWER « les roches à kimberlite dont on a pu constater la présence au Brésil sont presque toutes des variétés pauvres en mica et basal-

tiques, comme celles des régions côtières occidentales de l'Afrique du Sud », BROUWER relève aussi la grande parenté des roches sédimentaires de ces deux continents : « Certains groupes de roches sédimentaires manifestent de part et d'autre de l'Atlantique une identité tout aussi frappante, qu'il nous suffise de mentionner le Karroo et le système de Santa Catharina. A Santa Catharina et à Rio Grande do Sul, le conglomérat d'Orléans correspond à celui de Dwyka de l'Afrique australe et comme nous l'avons dit déjà, des masses considérables de roches volcaniques occupent les termes les plus élevés de ces séries dans l'un et l'autre de ces continents. Ce sont notamment celles du Drakensberg dans la Colonie du Cap et celles de la Serra Geral dans la région de Rio Grande do Sul. »

Selon DU TORR (1), il semblerait même que le matériel erratique

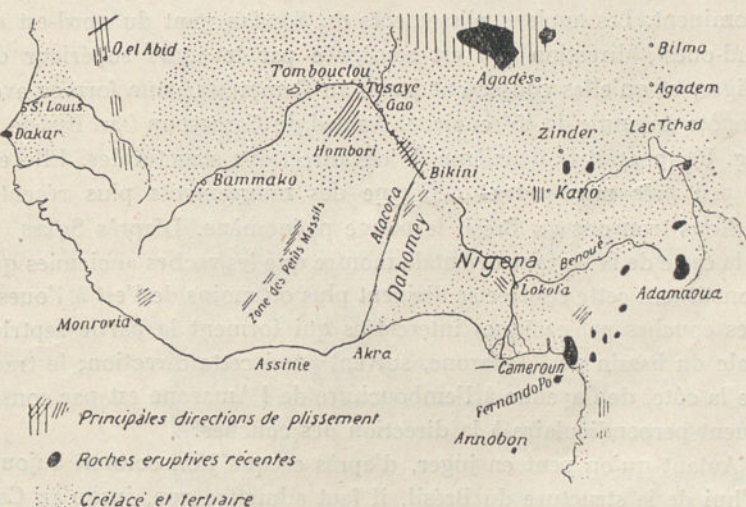


Fig. 8. — Direction structurales en Afrique, d'après LEMOINE.

permo-carbonifère de l'Amérique du Sud est venu d'Afrique. DU TORR cite à ce propos deux auteurs qui partagent son avis : « COLEMAN, dit-il, fait provenir d'une calotte glaciaire dont le centre devait se trouver au-delà des côtes, dans la direction du sud-est (2), le blocage

(1) ALEX. L. DU TORR, *The Carboniferous Glaciation of South Africa*. Transact. of the Geolog. Soc. of South Africa 25, 188-227, 1921.

(2) Son texte porte « South-west », c'est sans doute un lapsus. (WEGENER).

(tillite) du Brésil austral. WOODWORTH, avec lui, parle de certains cailloux erratiques d'un quartzite particulier ou de grès à nodules de jaspe zoné dont la description répond exactement à celle du blocage que les glaces transvaaliennes transportèrent vers l'ouest, de la chaîne des « Matsapheds » (Griqualand occidental) jusqu'au 18° méridien. Si nous admettons l'hypothèse de la dérive des continents, ne pourrait-il pas avoir été charrié bien plus loin vers l'occident? »

Nous avons vu que les directions de plissement des vieilles chaînes qui accidentèrent jadis ces vastes plateaux de Gneiss nous permettent d'établir d'autres rapprochements. Pour l'Afrique, nous prions le lecteur de s'en référer à la carte esquissée par LEMOINE (3). Nous la reproduisons ici à la fig. 8. Comme elle n'est pas uniquement structurale, ce que nous y cherchons n'est pas très apparent mais elle le montre tout de même. En Afrique deux directions structurales prédominent. Les anciens plissements du Soudan vont du nord-est au sud-ouest, direction qui est soulignée par le cours supérieur du Niger, et qu'elles conservent jusqu'au Cameroun pour former avec la côte un angle de 45° environ. Au sud du Cameroun (au bas de la fig. 8) apparaît la deuxième de ces directions structurales. Elle est à peu près nord-sud et concerne des mouvements plus récents.

Nous trouvons au Brésil le même phénomène. D'après SUESS (2) « la carte de la Guyane orientale montre que les roches anciennes qui constituent cette contrée se dirigent plus ou moins de l'est à l'ouest. Les couches paléozoïques intercalées qui forment la partie septriionale du bassin de l'Amazone, suivent aussi cette direction; le tracé de la côte, de Cayenne à l'embouchure de l'Amazone est par conséquent perpendiculaire à la direction des couches.

Autant qu'on peut en juger, d'après ce que l'on connaît aujourd'hui de la structure du Brésil, il faut admettre que, jusqu'au Cap San-Roque, le contour du continent est encore transversal à la direction du massif montagneux; mais, à partir de ce promontoire, l'allure de la côte, du moins jusqu'à l'Uruguay, est déterminée par celle des chaînons eux-mêmes ». Ici aussi, les fleuves se conforment à peu près à ces directions (L'Amazone pour la première, le Rio San Francisco et le Parana pour la seconde). Toutefois, des recherches

(1) LEMOINE. *Afrique occidentale*. Handb. d. Regionalen Geologie VII, G A, 14 Heft, p. 57, Heidelberg 1913.

(2) [SUESS. *La Face de la terre*. Tome II, p. 222.]

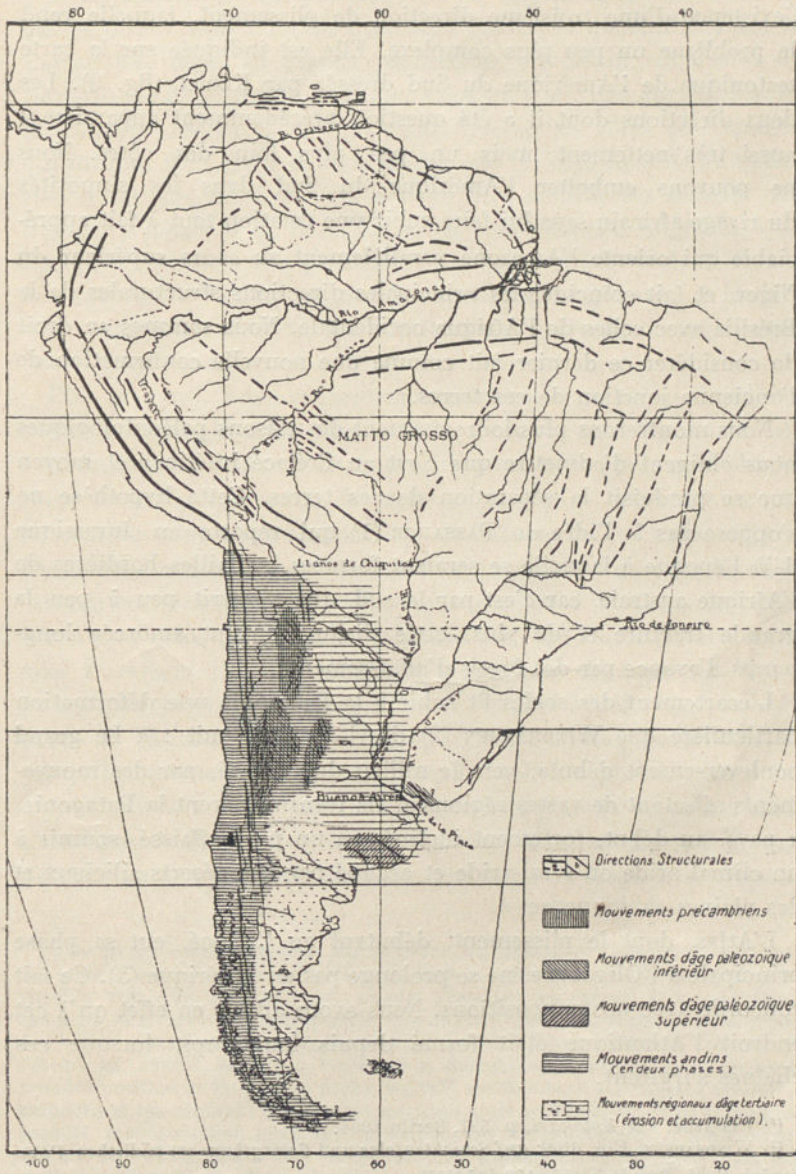


Fig. 9. — Carte tectonique schématique de l'Amérique du Sud d'après KEIDEL.

récentes — celles de KEIDEL (o. c.) notamment — ont démontré l'existence d'une troisième direction de plissement, laquelle rend le problème un peu plus complexe. Elle est indiquée sur la carte tectonique de l'Amérique du Sud dressée par KEIDEL (fig. 9). Les deux directions dont il a été question précédemment apparaissent aussi très nettement, mais un peu plus loin des côtes. Nous ne pouvons emboîter l'Amérique du Sud dans les sinuosités du rivage africain sans lui faire subir une rotation tout à fait appréciable qui oriente l'Amazone parallèlement au cours supérieur du Niger, et fait coïncider les principales directions structurales de la Brésilia avec celles de l'Afrique occidentale. Nous sommes en droit de considérer ce dernier fait comme une nouvelle confirmation de l'ancienne jonction de ces terres.

Nous montrerons plus loin comment des raisons paléontologiques nous obligent d'admettre que c'est au Crétacé inférieur et moyen que se produisit la séparation de ces terres. Cette hypothèse ne s'oppose pas à l'idée de PASSARGE (1) qui reporte au Jurassique déjà l'époque à laquelle se seraient formées les failles bordières de l'Afrique australe, car c'est par le sud que s'ouvrit peu à peu la grande fracture et de plus, cette disjonction fut amorcée longtemps d'avance par des fossés d'affaissement.

L'écartement des socles fit subir à la Patagonie une déformation particulière que WINDHAUSEN (2) décrit comme suit : « Le grand bouleversement débuta, vers le milieu du Crétacé, par des mouvements affectant de vastes régions ». Ils transformèrent la Patagonie, « pays, au début, fortement incliné, en un pays affaissé, soumis à un climat aride ou semi-aride et occupé par des déserts silicieux et des plaines sablonneuses ».

L'Atlas, dont le plissement, débutant au Crétacé, eut sa phase principale à l'Oligocène, ne se prolonge pas en Amérique (3). Ce fait concorde avec nos suppositions. Nous avons admis en effet qu'à cet endroit l'Atlantique était formé depuis longtemps, lorsque ces chaînes surgirent.

(1) PASSARGE. *Die Kalahari*, p. 597, Berlin 1904.

(2) WINDHAUSEN. *Ein Blick auf Schichtenfolge und Gebirgsbau im südlichen Patagonien*. Geol. Rundsch. 12, 109-137, 1921.

(3) GENTIL voit, il est vrai, dans les chaînes de l'Amérique centrale, dans les Antilles notamment, la suite de l'Atlas. JAWORSKI a montré que cette idée ne se concilie pas avec celle de SUSS, généralement admise, suivant laquelle la chaîne caraïbe se prolonge dans l'arc des petites Antilles et ne dirige vers l'est aucun embranchement.

Il est bien probable que là aussi, les terres africaines et américaines furent jadis réunies; mais elles durent se disjoindre avant le Carbonifère déjà. La grande profondeur du bassin occidental de l'Atlantique Nord semble indiquer aussi qu'il est très ancien. Enfin, la différence entre la péninsule ibérique et les côtes américaines qui lui font face, parle dans le même sens (1). Les Açores, les Canaries et les Iles du Cap Vert doivent être considérées comme des fragments détachés du bord des socles continentaux, fragments que l'on peut comparer aux glaçons du « vélage » qui flottent au devant des icebergs. GAGEL (2) estime également que les Canaries et Madère sont « des éclats détachés du continent euro-africain à une époque relativement récente ».

Plus au nord, nous rencontrons trois zones parallèles de plissements anciens. Comme elles se retrouvent de part et d'autre de l'Atlantique elles offrent de nouvelles preuves frappantes à l'hypothèse du contact primitif de ses rives. Les plus apparents de ces plissements sont d'âge carbonifère. Ils forment ce que SWÆSS appelle les chaînes armoricaines. Ces chaînes permettent de considérer le carbonifère productif de l'Amérique du Nord comme la suite directe de celui de l'Europe. Aujourd'hui fortement pénéplainées, elles traversent l'Europe orientale et centrale du S.-E. au N.-O., puis s'infléchissent vers l'Ouest, pour toucher l'Atlantique au sud-ouest de l'Irlande et en Bretagne, où elles donnent à la côte un aspect brutalement déchiqueté (côtes à rias). Les plis les plus méridionaux de ce système, une fois arrivés à la plateforme continentale atlantique de la France, semblent dévier brusquement pour réapparaître au sud du Golfe de Gascogne lequel s'ouvre à la manière

(1) De divers cotés surgissent sur ce point des objections à l'égard de la théorie des translations. Ainsi le Dévonien des régions côtières de l'Amérique du Nord appelle, vers l'est un continent auquel l'Espagne ne saurait être assimilée à cause de sa structure par trop différente de celle des dites régions. Pour répondre à cela, nous ferons remarquer d'abord qu'une large plateforme continentale s'étend au devant des côtes américaines. Ensuite: qu'il ne sera pas possible de prendre position en face de ce problème, tant qu'on n'aura pas réussi à rétablir la grandeur et les contours que le socle ibérique avait au Dévonien. Pour le moment, pareille reconstruction nous est impossible, car elle nous oblige à dérouler et à aplanir des terrains qui ont été plissés non seulement au Tertiaire, mais déjà au Carbonifère et cela d'une manière particulièrement intense en Espagne, précisément. C'est pourquoi, aussi longtemps que la théorie des translations elle-même ne sera pas en état de présider à cette construction, personne ne pourra dire si le Dévonien américain la dément ou la confirme.

(2) GAGEL. *Die mittelatlantischen Vulkaninseln. Handb. d. regional. Geologie.* VII, 10, 4 Heft. Heidelberg, 1912.

d'un livre jusqu'aux profondeurs abyssales. SUESS appelle cette branche la boucle des Asturies. Tandis que la chaîne armoricaine principale, bien qu'elle ait été rabotée par les vagues, se poursuit de toute évidence vers l'Ouest au sein de la plateforme continentale du nord de l'Europe ; elle pointe vers l'Océan Atlantique et exige quelque part une prolongation (1). Ce sont les Appalaches qui répondent à cette exigence, ainsi que MARCEL BERTRAND le fit voir le premier, en 1887. Les derniers chaînons de cet ensemble montagneux d'âge également carbonifère et dont les plis sont comme en Europe déversés vers le nord, occupent la Nouvelle Ecosse et le sud-est de Terre-Neuve, où ils forment une côte à rias. Ils doivent certainement se poursuivre vers l'est au travers du banc de Terre-Neuve. Dans son ensemble, cette chaîne se dirige vers le N.-E. mais, au voisinage de son point de rupture, elle tourne résolument vers l'est. On admit qu'elle faisait partie intégrante du grand système de plis que SUESS appela les « Altaïdes transatlantiques ».

La théorie des translations, qui permet de joindre bout à bout les deux tronçons apparents de la chaîne, simplifie beaucoup la question. La portion que l'on supposait effondrée est en effet plus longue que celles qui appartiennent aux continents actuels. Ce fait fut déjà considéré par PENCK comme difficilement admissible. Sur la ligne passant par les deux points de rupture, le fond de l'Océan présente quelques élévations que l'on prit jusqu'ici pour des sommets appartenant à la chaîne engloutie. A notre avis, ce sont des fragments détachés du bord des socles. Ce morcellement est d'autant plus explicable qu'il a lieu dans une zone de bouleversements tectoniques.

Une chaîne plus ancienne encore, formée entre le Silurien et le Dévonien, s'étend en Europe, immédiatement au nord de la chaîne hercynienne. Elle parcourt la Norvège sur toute sa longueur et traverse le nord des Iles britanniques. C'est la chaîne calédonienne de

(1) L'idée de KOSSMAT d'après laquelle tous les plissements européens opéreraient une conversion dans l'Atlantique pour se retrouver en Espagne, nous paraît difficilement admissible ; un arc montagneux aussi considérable ne saurait se placer dans la plateforme continentale. (KOSSMAT, *Die Mediterraneen Kettengebirge in ihrer Beziehung zum Gleichgewichtszustande der Erdrinde*, Abh. d. Math.-Phys. Kl. d. Sächsischen Akademie d. Wissenschaft. 38, N° 2 Leipzig 1921)

Suess, ANDRÉE (1) et TILMANN (2) en ont recherché la suite dans les « Calédonides canadiennes » (TERMIER) et plus particulièrement dans les Appalaches canadiennes qui sont de même âge. Le fait qu'en Amérique cette chaîne a été rajeunie par le plissement harmonicaire, ce qui ne se produisit pas en Europe septentrionale, mais seulement en Europe centrale (massifs de Stavelot et de l'Ardenne) ne porte évidemment pas atteinte à la vraisemblance de ces raccords. Les parties de cette chaîne qui entraient en contact autrefois doivent être cherchées d'une part, dans les Highlands écossais et le Nord de l'Irlande, de l'autre à Terre-Neuve.

Immédiatement au nord de la chaîne calédonienne, s'étendent les gneiss des vieux plis algonkiens des Hébrides et de l'Ecosse septentrionale. Ils se retrouvent en Amérique dans les montagnes du Labrador, lesquelles se prolongent, vers le sud, jusqu'au détroit de Belle-Isle et pénètrent au Canada. Leur direction est en Europe N.-E. S. O., en Amérique: tantôt la même qu'en Europe, tantôt est-ouest. DACQUÉ en conclut « que cette chaîne traversait l'Atlantique Nord ». Le segment de chaîne englouti, s'il existe réellement, doit avoir une longueur de 3.000 kilomètres. D'autre part, les plis des Hébrides, prolongés en ligne droite, n'atteindraient pas ceux du Labrador mais viendraient toucher l'Amérique du Sud après avoir parcouru sous l'Océan plusieurs milliers de kilomètres. Ici encore, la théorie de la dérive des continents, en supposant que l'Amérique a subi une torsion tandis qu'elle s'écartait de l'Europe, permet aisément d'établir le raccord de ces tronçons de chaînes.

Les moraines frontales de la grande calotte glaciaire qui recouvrit le Nord de l'Amérique et de l'Europe se trouvent aussi dans les régions que nous venons d'étudier. Notre reconstruction les met exactement dans le prolongement l'une de l'autre. Si, au moment où elles se sont formées, les continents avaient été aussi distants qu'ils le sont actuellement, — 2.500 kilomètres au point où les moraines touchent l'Atlantique — il eût été bien invraisemblable de pouvoir établir un raccord aussi exact, d'autant plus qu'en Amérique elles arrivent à la côte à 4° 30' plus au sud qu'en Europe.

Les correspondances géologiques dont nous venons de faire l'exa-

(1) K. ANDRÉE. *Verschiedene Beiträge zur Geologie Kanadas*. Schriften d. Ges. z. Belford. d. ges. Naturwiss. zu Marburg 13, 7, 437 f. Marburg 1914.

(2) N. TILMANN, *Die Struktur und tektonische Stellung der Kanadischen Appalachen*. Sitzber. d. naturwiss. Abt. d. Niederrhein. Ges. f. Natur-u. Heilkunde in Bonn 1916.

men : plissements du Cap et Sierras de Buenos-Aires, roches éruptives et sédimentaires des boucliers brésiliens et africains avec leurs directions structurales, chaînes armoricaines, calédoniennes et algonkiennes, enfin moraines frontales de la glaciation quaternaire sont autant de preuves qui, si elles ne sont pas toutes aussi certaines, ne forment pas moins, dans leur ensemble, un argument difficilement ébranlable en faveur de l'idée d'un écartement graduel des bords de l'Atlantique. Que ces différentes formations soient venues se raccorder avec une telle fidélité bien que nous eussions dû opérer la jonction des continents d'après leurs contours, c'est là un fait dont l'importance nous semble décisive. C'est comme si nous cherchions à remettre en place les fragments d'un journal, en nous fondant sur les particularités de la déchirure, pour vérifier ensuite, d'après le texte, la justesse de notre assemblage. Si les lignes sont rétablies, nous pouvons admettre que ces fragments faisaient réellement partie de la même feuille ; une seule ligne suffirait à prouver la grande vraisemblance de notre reconstruction. Si nous avons n lignes, cette probabilité s'accroît comme l'exponentielle n . Il n'est pas inutile d'insister sur la portée de ce raisonnement. Supposons qu'en nous basant sur le raccord des plissements du Cap et des Sierras de Buenos-Aires, nous puissions parier 10 contre 1 que la théorie des translations est vérifiée, nous pourrions, puisque nous disposons d'au moins 6 éléments indépendants de contrôle, élever 10 à la puissance 6 et parier 1 million contre 1 que nos suppositions se fondent sur une réalité. Ces chiffres sont peut-être exagérés, mais ils donnent une idée, néanmoins de la grande valeur probante que prennent les arguments indépendants lorsqu'ils se multiplient.

Au nord des régions que nous avons passées en revue, la faille atlantique se bifurque, isolant le Groenland. Elle s'amincit de plus en plus; aussi les raccords géologiques que l'on peut établir de l'un à l'autre de ses bords sont-ils pour nous de moins en moins probants car ils s'expliquent sans qu'il soit nécessaire de rapprocher les socles. Il n'est pas sans intérêt toutefois, de mener jusqu'au bout notre confrontation.

L'extrême nord de l'Irlande et de l'Ecosse, les Hébrides et les Far-Oer sont les fragments épars d'un vaste plateau basaltique qui comprenait l'Islande et, au Groenland, la presque île limitant au sud le Scoresby Sound pour s'étendre le long de la côte jusqu'au 75° Lat. N. Dans toutes ces régions, des intercalations de charbons à

plantes s'observent entre les coulées de laves ; on en a conclu que ces terres communiquaient jadis entre elles. Le Dévonien à faciès continental, l'« Old Red » — que l'on rencontre en Amérique de Terre-Neuve à New-York, en Angleterre, au Sud de la Norvège, dans les provinces Baltiques, au Groenland et au Spitzberg semble s'être déposé dans un domaine unique, aujourd'hui morcelé — par des affaissements, disait-on, par des disjonctions selon nous.

Mentionnons enfin les dépôts carbonifères non plissés que l'on trouve aussi bien au Spitzberg qu'au Groenland Nord-Est (par 81° de latitude).

Comme il était à prévoir, le Groenland offre également avec l'Amérique du Nord une ressemblance structurale. D'après la carte de l'Amérique du Nord dressée par le « U. S. Geol. Survey », les gneiss du Cap Farvel — et notamment des régions situées au N.-O. de ce point — sont traversées par des roches intrusives précambriennes que l'on retrouve à l'endroit précis où ce promontoire devait toucher la côte américaine, c'est-à-dire au nord du Détroit de Belle-Isle. Au nord-ouest du Groenland, dans la région du Smith

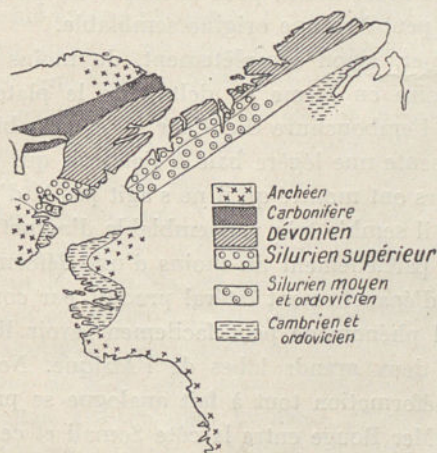


Fig. 10. — Carte géologique du Nord-Ouest groenlandais, d'après LAUGE-KOCH.

Sound et du Robeson Channel, la translation ne consiste plus en un écartement des bords de la fracture mais en un glissement des masses dans le sens de leur ligne de séparation, en ce qu'on appelle un déplacement en long. La Terre de Grinnel glisse le long du Groenland. C'est à ce mouvement qu'on peut attribuer la coupure rectiligne du bord des masses. On peut constater l'effet de cette dérive sur la carte du Nord-Ouest groenlandais dressée par LAUGE-KOCH (1) et dont nous donnons un croquis partiel à la fig. 10; il suffit

(1) LAUGE-KOCH, *Stratigraphy of Northwest Greenland*. Meddelelser fra Dansk geologisk Forening 5, n° 17, 1920, 78 p.

de prendre comme point de repère la limite entre le Silurien et le Dévonien, limite qui se trouve en effet sur la Terre de Grinnel, à $80^{\circ} 10'$, tandis qu'il faut la chercher à $81^{\circ} 30'$ au Groenland.

Donnons encore rapidement quelques indications de détails sur la façon dont nous avons opéré la soudure des continents. Nous présenterons plus loin une étude plus approfondie des phénomènes entrant ici en jeu ; phénomènes dus à la plasticité des masses de sial, à la fusion de leur base, etc. Mais, afin d'éviter tout malentendu, nous devons déjà en faire mention au cours de ce chapitre.

En joignant les côtes américaines à celles de l'Afrique, nous n'avons pas à tenir compte de la saillie que forme le banc des Iles Abrolhos. Ses contours irréguliers le rendent foncièrement différent de la plateforme assez rectiligne de l'Amérique du Sud et lui font supposer une origine à part. Il s'agit probablement de masses de sial granitiques qui, détachées de la base du socle sud américain, sont venues peu à peu occuper le bord postérieur de ce continent en marche. Il est probable que les granits des Seychelles ont été mis au jour de la même façon, après avoir reposé sous les régions marginales de Madagascar ou de l'Inde. Enfin, pour anticiper un peu, le bâti profond de l'Islande a peut-être une origine semblable.

Il faut de même supprimer, sinon complètement, du moins en grande partie, le promontoire en forme de delta que le plateau continental africain offre à l'embouchure du Niger — et cela bien que la côte brésilienne présente une légère baie à l'endroit qui lui correspond. Plusieurs auteurs ont montré qu'il ne s'agit pas là d'un simple delta. A notre avis, il semble très vraisemblable d'admettre que ce promontoire résulte partiellement du moins d'une déformation plastique, d'une sorte d'épanchement latéral produit par compression horizontale. Pareil phénomène peut facilement avoir lieu à l'angle que forment les deux grands lobes de l'Afrique. Nous verrons plus loin qu'une déformation tout à fait analogue se produit dans la région de la Mer Rouge entre la côte Somali et celle de l'Abyssinie. Le volcanisme qui se manifeste sur la ligne de fracture traversant le Cameroun est probablement en rapport avec ces phénomènes de compression. On l'observe au Kamerunberg et jusque dans les îles de Fernando Poo, Principe, S. Thomé et Annobom. Nous verrons, à plus d'une reprise que les volcans apparaissent aussi dans les zones comprimées par des forces tangentielles. Les socles en collision chassent vers l'extérieur le sima qu'ils

écrasent. Notre reconstruction a changé quelque peu la forme de l'Amérique du Nord. Le Labrador y semble, en effet, fortement refoulé vers le Nord-Ouest. Nous avons supposé que la violente traction qui eut pour dernier effet de séparer Terre-Neuve de l'Irlande, provoqua tout d'abord l'extension superficielle des masses continentales. Le socle de Terre-Neuve fut arraché et tourna sur lui-même de 30° environ, le Labrador tout entier subit un retard qui, par rapport à la translation du continent dont il fait partie, équivaut à une dérive vers le sud-est ; enfin, la fracture primitivement rectiligne, occupée par le Saint-Laurent et qui aboutit au Détroit de Belle-Isle, prit une forme d'S. Les mers épicontinentales telles que la Baie d'Hudson et la Mer du Nord ont dû prendre naissance, ou du moins s'agrandir sous l'effet de cet étirement. Pour remettre en place le socle de Terre-Neuve il faut donc lui faire opérer un double mouvement : une translation dirigée vers le N.-O et une rotation. Il vient ainsi se placer dans le prolongement de la plateforme de la Nouvelle-Ecosse, alors qu'aujourd'hui il accuse vers le sud une saillie très prononcée.

L'Islande dut être isolée par deux failles parallèles, ainsi que semble encore l'indiquer la carte bathymétrique actuelle. Il se peut aussi qu'entre les massifs gneissiques du Groenland et de la Norvège, une cassure (fossé d'affaissement) se produisit tout d'abord et qu'ensuite, des masses de sial en fusion, détachées de la base des socles, vinrent l'occuper en partie. Mais, comme cette faille contenait en outre du sima (comme actuellement la Mer Rouge) un nouveau rapprochement de ses bords a pu refouler vers le haut cette roche intrusive en la séparant même de son réservoir profond. Ce serait là l'origine des vastes épanchements de basalte qui caractérisent ces régions. Il est tout à fait plausible que ces phénomènes se produisirent précisément au Tertiaire car la translation que l'Amérique du Sud opéra vers l'ouest à cette époque, dut, tant que les chaînes armoricaines faisaient adhérer encore Terre-Neuve à l'Irlande, occasionner la torsion de l'Amérique du Nord et la compression des territoires situés au nord de cette zone d'adhérence.

C'est ici le lieu de dire quelques mots du seuil longitudinal de l'Atlantique (1). L'idée de HAUG suivant laquelle ce seuil serait une cordillère en formation au sein d'un immense géosynclinal repré-

(1) Voir la carte de l'Océan Atlantique de SCHOTT. *Geographie des Atlantischen Ozeans*. Hambourg 1912.

senté par l'Atlantique entier est généralement considérée aujourd'hui comme insuffisante. Nous nous en référons à ce propos à la critique qu'en fit ANDRÉE (1). Selon la théorie des translations, il s'agirait plutôt de l'ancien fond (*Grabensohle*) de la faille atlantique datant de l'époque où elle était encore relativement étroite et remplie de débris provenant de ses bords, de dépôts terrigènes et partiellement aussi de masses sialiques ressurgentes. Les îles couronnant cette longue dorsale sont toutes des fragments détachés des bords de la fracture à cette époque lointaine. Et cela n'empêche aucunement leur bâti visible d'être tout à fait volcanique. Ces matériaux de remplissage restèrent toujours au milieu de la fracture en train de l'élargir. Les dépôts qu'on a appelés les « sables abyssaux » (*Tiefseesande*) et dont les constituants minéraux peuvent atteindre 0,3 mm., se sont évidemment déposés non loin des côtes et pourtant la Valdivia et l'expédition allemande au Pôle Sud dirigée par DRYGALSKI en ont retiré du milieu de l'Océan. Ce fait semble confirmer tout particulièrement notre assertion car seule la dérive des continents permet de concevoir que tous les points du sol sous-océanique se trouvèrent une fois près des côtes.

Au sujet des correspondances géologiques existant entre les autres continents dont nous avons supposé l'ancienne jonction, il y a beaucoup moins à dire.

Madagascar est formée, comme la partie de l'Afrique qui lui fait face, d'un plateau de Gneiss à direction structurale nord-est. De part et d'autre de la ligne de disjonction, on trouve les mêmes sédiments. Ils nous indiquent que, dès le Trias, une fosse d'affaissement envahie par la mer séparait déjà ces terres. La faune malgache d'ailleurs nous oblige aussi de le supposer. Cependant, d'après LEMOINE, deux animaux d'Afrique ont encore pu coloniser l'île au Tertiaire moyen — alors que l'Inde péninsulaire s'en était déjà écartée. Ce sont : le *Potamocheerus* et l'hippopotame. LEMOINE les estime capables de traverser encore un bras de mer de 30 kilomètres (2). Or, aujourd'hui le Canal de Mozambique a 400 kilomètres de large. Ce n'est donc qu'après le Tertiaire que le socle malgache s'est détaché jusqu'à sa base de celui de l'Afrique. On comprend dès lors que la dérive de l'Inde péninsulaire vers le nord-est ait eu une avance si considérable sur celle de Madagascar.

(1) K. ANDRÉE, *Ueber die Bedingungen der Gebirgsbildung*. p. 86 et suiv. Berlin 1914.

(2) LEMOINE. *Madagascar*. Handb. d. regional. Geol VII, 4. 6. Heft, p. 27. Heidelberg 1914.

L'Inde péninsulaire est aussi un plateau de gneiss plissés. Le plissement l'accidente encore à son extrémité nord-ouest, où s'élèvent les vieilles montagnes des Arvali, bordant le désert de Tharr, et il apparaît ailleurs dans les Monts de Korana également très anciens. Les Arvalis ont une direction nord 36° est (Suess) et les Monts de Korana s'allongent du nord-est au sud-ouest. Cette direction concorde assez bien avec celle des plissements de Madagascar et de l'Afrique orientale et cela d'autant mieux qu'il faut faire subir à l'Inde une légère torsion pour la ramener à son point de départ. Il existe, en outre, une chaîne dirigée du nord au sud : chaîne des Ghâtes de Nellore ou Monts Vellaconda, plus récente que les précédentes, mais encore d'âge mésozoïque. Des plissements de même âge et de même direction lui correspondent en Afrique. Les couches diamantifères de l'Inde font suite à celles de l'Afrique Centrale. Notre reconstruction nous a amené à souder la côte occidentale de l'Inde à la côte orientale de Madagascar. Toutes deux sont une cassure remarquablement rectiligne d'un plateau de gneiss et elles donnent à entendre que l'Inde commença par glisser le long de Madagascar (déplacement en long, analogue à celui de la Terre de Grinell). Un épanchement de basalte s'observe aux deux points qui s'affrontaient jadis, à l'extrémité nord de la faille séparatrice, points actuellement distants de 10° de latitude. Il s'agit en Inde, de la table basaltique du Deccan. Comme elle date du commencement du Tertiaire, elle peut être en rapport avec la formation de la faille. A Madagascar, ce sont deux épanchements d'âge différents, mais encore peu précisés, semble-t-il. Ils couvrent toute la pointe nord de l'île.

Les gigantesques plis himalayens, essentiellement d'âge tertiaire, témoignent du rétrécissement d'un compartiment important de la croûte terrestre. Si on en rétablissait la forme primitive, l'Asie aurait des contours tout différents de ceux que nous lui connaissons. Il est probable que l'Asie orientale toute entière prit part à la compression, (Tibet et Mongolie jusqu'au lac Baïkal et peut-être même jusqu'au détroit de Bering.) D'après les dernières recherches, les mouvements orogéniques tertiaires ne se limitent aucunement à l'Himalaya : ils ont donné lieu à de grands chevauchements dans le complexe du Tien-Chan et, dans les Monts de Pierre-le-Grand, ils ont plissé l'Eocène que l'on trouve jusqu'à 5.600 mètres d'alti-

tude (1). Mais, là où de semblables plissements font défaut, nous constatons un soulèvement récent de territoires tabulaires qui est en relation tout aussi étroite avec l'effort orogénique tertiaire. Les masses énormes de sial que le plissement a refoulé vers la profondeur ont dû entrer en fusion et soulever, en se répandant sous eux, les



Fig. 11. — La compression lémurienne.

compartiments qui ont pris part à la compression. Considérons uniquement la partie la plus élevée du socle asiatique : son altitude moyenne est de 4.000 mètres et elle mesure dans le sens de la poussée 1.000 kilomètres. Si nous lui attribuons un rétrécissement de même ordre que celui des Alpes, soit au $\frac{1}{4}$ de sa largeur primitive — bien qu'elle témoigne d'une élévation plus considérable de territoire — nous obtenons pour l'Inde péninsulaire une

(1) R. VON KLEBELSBERG. *Die Pamir-Expedition des D. u. Österr. Alpen-Vereins vom geologischen Standpunkt.* Zeitschr. d. D. u. Österr. A-V. 1914 (XIV), p. 52-60, et d'après les renseignements que l'auteur nous a communiqués par lettre. Son travail principal n'est pas encore publié.

dérive de 3.000 kilomètres, qui lui permet d'avoir touché primitivement Madagascar. Dans ces conditions, il ne reste plus de place à une Lemuria effondrée. Nous retrouvons des traces de cette formidable compression de chaque côté de la zone relativement étroite où l'Inde opéra sa translation. Telles sont : la disjonction malgache, le système de failles de l'Afrique Orientale auquel se rattache la fosse du Jourdain et de la Mer Rouge. La presqu'île des Somali a dû être entraînée vers le nord et subir un léger mouvement de rotation. Les masses de sial du tréfond des chaînes abyssiniennes, masses refoulées à une profondeur où elles entrent en fusion, se sont coulées vers le nord-est pour monter à la surface du sol entre l'Abyssinie et la presqu'île des Somali. L'Arabie subit aussi une traction dirigée vers le Nord-Est. Elle a poussé comme un éperon dans les chaînes persiques le cap occupé par les derniers contreforts des Monts de l'Akdar. Le rebroussement en éventail des trains de plis de l'Indou-Kouch marque la limite occidentale du territoire comprimé, et nous trouvons, à sa limite orientale, un dispositif semblable, image spéculaire du précédent. En effet, les chaînes de la Birmanie prennent peu à peu une direction nord-sud, en s'engageant dans l'Annam, et elles se poursuivent dans la presqu'île de Malacca et à Sumatra. Les limites de cette compression qui affecta toute l'Asie orientale sont marquées au nord-ouest par les plis en échelons qui, de l'Indou-Kouch, atteignent le lac Baïkal et se prolongent jusqu'au Détroit de Bering, et à l'est par les lobes de la côte pacifique et les guirlandes insulaires qui les accompagnent.

Nous avons supposé que la côte orientale de la péninsule indoue se rattachait au bord occidental de l'Australie. Elle présente la même rupture brusque d'un plateau constitué par des gneiss qui ne cessent d'affleurer qu'en un seul endroit : l'étroite zone carbonifère du Godavari où l'on trouve les couches de Gondvana inférieures. Le Gondvana supérieur les recouvre en discordance à l'endroit où elles touchent la côte. L'Australie occidentale est un plateau gneissique à surface ondulée, semblable à ceux de l'Inde péninsulaire et de l'Afrique. Il se termine également par un escarpement qui, dans sa partie sud, forme le « Darling Range ». Une bordure de plaines d'affaissement précède cet escarpement. Elle est occupée par des sédiments paléozoïques et méozoïques dans lesquels des basaltes ont fait intrusion çà et là. Enfin, la côte même est longée par une étroite zone de gneiss qui n'affleure pas partout. Ces sédiments comprennent aussi une région houillère et cela dans les parages de la

rivière Irwin. Les directions structurales du plateau de gneiss australien sont nord-sud partout. Si l'on rattache l'Australie à l'Inde, ses plissements s'orientent vers le nord-est soit parallèlement à ceux de cette péninsule.

L'Australie Orientale possède une bordure de cordillères dont le plissement principal date du carbonifère. Dans le nord du continent, ces plis s'échelonnent et s'infléchissent vers l'Ouest mais il en est qui conservent jusqu'à leur fin la direction nord-sud. Ici, comme dans l'Indou-Kouch, l'échelonnement des plis nous indique que nous avons atteint une des limites latérales d'un mouvement de



Fig. 12. — Schéma de la rupture des chaînes d'îles sous la pression de la Nouvelle-Guinée.

compression: ce sont les derniers contreforts de l'immense chaîne andine qui, partant de l'Alaska, traverse quatre continents. Les chaînons occidentaux de la cordillère australienne sont les plus anciens. La Tasmanie est comprise dans cette zone de plissements. Il est intéressant de constater dans les Andes la réplique symétrique de ce complexe montagneux, là, les plus anciens seront donc les chaînons orientaux. Du côté australien, les plis les plus récemment formés ne se trouvent pas sur le continent même, mais en Nouvelle Zélande, d'après SUSS (1). Ils n'ont également pas affecté le Tertiaire: « de l'avis de la plupart des géologues qui se sont occupés de la Nouvelle Zélande, l'effort orogénique principal des chaînes maoriques se place entre le Jurassique et le Crétacé » (2). Auparavant, la mer recouvrait l'île entière. C'est le plissement qui « fit émerger la région néozélandaise » (2). Le Crétacé supérieur et le Tertiaire occupent avant tout les bords de l'archipel et le plus souvent, ils ne sont pas plissés. En outre, dans l'île du Sud, les sédiments crétacés se trouvent sur la côte orientale et non sur la côte occi-

(1) E. SUSS. *La Face de la Terre* II. 261.

(2) O. WILCKENS. *Die Geologie von Neuseeland*. Die Naturwissenschaften, 1920. Heft. 41, voir également. *Geol. Rundschau*, 8, p. 143-161, 1917.

dentale par laquelle cette île communiquait encore avec l'Australie. C'est au Tertiaire que dut se produire l'effondrement séparateur, puisque des dépôts de cet âge bordent l'île à l'ouest ». Au Tertiaire supérieur, des plissements, de peu d'importance il est vrai, des failles et des chevauchements donnèrent à la chaîne néozélandaise ses formes actuelles (1). La théorie des translations explique ces faits en supposant que la Nouvelle Zélande formait autrefois le bord oriental de l'Australie. Ses chaînes s'ajoutaient donc à la cordillère australienne. Le processus orogénique cessa au mo-

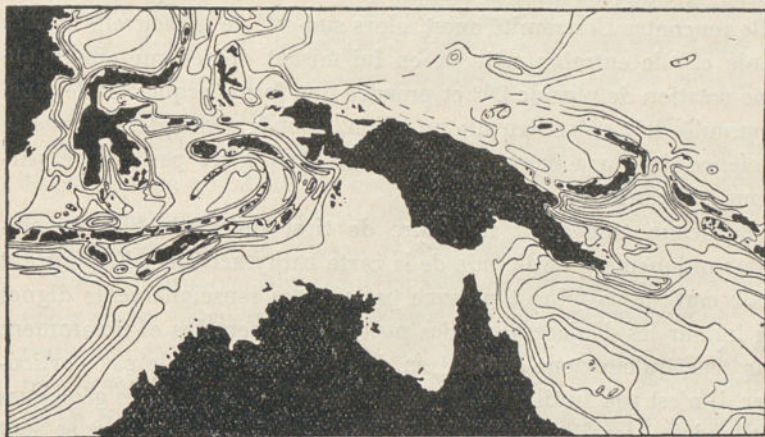


Fig. 13. — Carte bathymétrique des parages de la Nouvelle Guinée.

ment où se forma la guirlande. Il est fort probable que les dislocations qui se sont produites en Nouvelle Zélande au Tertiaire supérieur doivent leur origine à la disjonction australienne.

La carte bathymétrique des parages de la Nouvelle Guinée nous renseigne sur les derniers déplacements que le socle australien a effectué vers le nord-ouest. Nous voyons sur le schéma de la fig. 12 comment le promontoire néoguinéen en forme d'enclume (épaissi par des plissements récents) se coince entre les Iles de la Sonde et l'Archipel Bismarck, probablement réunis autrefois. Examinons sur la carte bathymétrique, fig. 13, les deux rangées méridionales des Iles de la Sonde (2). La rangée Java-Wetter, orientée à l'est à

(1) D'après Wilkens, ouvrage cité.

(2) C'est l'excellente carte bathymétrique des mers de la Sonde de MOLENGRAAFF qui en donne l'idée la plus claire, les courbes altimétriques y figurent aussi et avec les mêmes intervalles. G. A. MOLENGRAAFF, *Modern Deep-Sea Research in the East Indian Archipelago*, The geograph. Journal, Febr. 1921, p. 95-124.

l'ouest se termine en une spirale comprenant les îles Banda et le banc de Siboga. La rangée de Timor qui la précède a une allure plus mouvementée parce qu'elle reçoit directement le choc de la plate-forme continentale australienne; BROUWER le démontre avec des arguments géologiques détaillés (1).

Plus à l'est, ce train d'îles décrit une spirale emboîtant à peu près la précédente et se terminant à Bourou. Nous trouvons, à l'est de la Nouvelle Guinée, un phénomène très intéressant qui complète ceux que nous venons de décrire. En se déplaçant du sud-est au nord-ouest, la Nouvelle Guinée effleura les îles de l'Archipel Bismarck. Elle rencontra l'extrémité ouest, alors sud-est, de la Nouvelle Poméranie et elle entraîna cette île en lui faisant opérer sur elle-même une rotation de plus de 90° et prendre une forme arquée. L'île ainsi bousculée laissa derrière elle un sillon, dont la profondeur atteste la violence de l'arrachement, puisque le sima n'est pas encore parvenu à le combler.

Beaucoup trouveront téméraire de tirer de semblables conclusions uniquement de l'étude de la carte bathymétrique. Et pourtant cette carte nous fournit presque partout des renseignements dignes de foi sur les déplacements des masses continentales et notamment sur ceux qu'elles ont effectué en dernier lieu. Dans le cas particulier, il n'est pas inutile d'insister sur le fait que ce sont des géologues hollandais, travaillant aux Îles de la Sonde, qui les premiers se sont ralliés à l'hypothèse des translations continentales (2). En fait, bien des observations de détail parlent en faveur de nos conceptions. M. WANNER explique les profondeurs inattendues que l'on rencontre entre les îles de Bourou et de Sula Besi en supposant que Bourou se soit déplacée de 100 kilomètres (3), ce qui concorde bien avec nos

(1) H. A. BROUWER, *On the Crustal Movements in the region of the curving rows of Islands in the Eastern Part of the East-Indian Archipelago*. Kon. Ak. v. Wetensk. te Amsterdam Proceed. 22. Nr. 7 et 8, 1916. (voir aussi Geol. Rundsch. 8. Heft 5-8, 1917 et Nachr. d. Ges. d. Wissensch. z. Gottingen 1920).

(2) G. A. F. MOLENGRAAFF, *The coral reef problem and isostasy*. Kon. Akad. van Wetensch. 1916 p. 621 (Note). L. VAN VUUREN, H et Gouvernement Celebes, *Proeve eener Monographie* 1, 1920, (p. 6-50, notamment). — WING EASTON, *Het ontstaan van den maleischen Archipel, gezien in het licht van Wegener's hypothesen*, Tijdschrift van het Kon. Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap 38, Nr 4, Juillet 1921, p. 484-512; du même auteur: *On some extensions of Wegener Hypothesis and their bearing upon the weaning of the terms Geosynclines and Isostasy*, Verh. van het Geolog-Mijnbouwkundig Genootschap voor Nedertand en Kolonien, Geolog. Ser., deel V, Bl. 113-133, juillet 1921. (Je ne puis souscrire, toutefois, aux modifications que cet auteur propose d'apporter à la théorie des translations).

(3) WANNER, *Zur Tektonik der Molukken*, Geol. Rundsch. 12. 160, 1921.

vues. G.-A. MOLENGRAAFF (1) donne une carte des îles de la Sonde où figure une région occupée par des récifs de coraux surélevés de plus de 5 mètres. Cette région répond d'une manière frappante à celle où, d'après la théorie des translations, les masses de sial doivent s'épaissir par compression. Elle s'étend au devant du socle australien jusqu'à Célèbes inclusivement et au nord et nord-ouest de la Nouvelle Guinée, mais il faut en excepter la côte sud-ouest de Sumatra et de Java. Selon GAGEL (2) il existe au cap König Wilhelm ainsi qu'en Nouvelle Poméranie (3) des terrasses très récentes qui ont été soulevées de 1.000, 1.250, peut-être même de 1.700 mètres. Ce phénomène très frappant indique, en tout cas, que cette région aussi a été soumise, il y a peu de temps, à des forces tectoniques d'une rare intensité et cela s'accorde avec notre hypothèse qui en fait un lieu de rencontre des masses.

Deux dorsales sous marines relient la Nouvelle Guinée et le Nord-Est australien aux deux îles néozélandaises. Elles semblent indiquer le chemin suivi par l'Australie. Peut-être sont-elles formées par des portions détachées de la base de son socle.

Nous connaissons trop peu l'Antarctique pour pouvoir dire grand-chose de ses rapports avec l'Australie. La côte méridionale de l'Australie est occupée tout entière par une large bande de sédiments tertiaires qui s'engagent dans le détroit de Bass pour ne réapparaître qu'en Nouvelle Zélande. Elle ne s'étend pas sur la côte orientale de l'Australie. Il est donc possible qu'au Tertiaire déjà l'Australie et l'Antarctique furent séparés par une fosse d'affaissement inondée et peut-être même par des abysses, sauf au point qu'occupe le horst tasmanien.

Il est généralement admis que la structure géologique de la Terre de Victoria fait suite à celle de la Tasmanie. Nous trouvons d'autre part dans WILKENS (4) que l'incurvation que l'on observe dans le sud-ouest de l'archipel néozélandais (la « courbure d'Otago ») est brusquement interrompue par la côte sud-est de l'île australe. Ce n'est pas son extrémité naturelle. Il s'agit là sans doute d'une rupture. La suite de cette chaîne ne peut être cherchée que dans une

(1) G. A. MOLENGRAAFF. *De Geologie des Zeeën van Nederlandsch Oost-Indië* (Overgedrukt uit : *De Zeeën van Nederlandsch Oost-Indië*. Leiden 1921).

(2) GAGEL. *Beiträge zur geologie von Kaiser-Wilhelm-land*. Beitr. z. Geol. Erforsch. d. Deutsch. Schutzgebiete Heft 4. 55 p. Berlin 1912.

(3) K. SAPPER. *Zur Kenntnis Neu-Pommerns und des Kaiser Wilhelmlandes*. Petermanns Mitt 56, 89-193, 1910.

(4) O. WILCKENS, *Die Geologie von Neuseeland*. Geol. Rundsch. 8. 143-161, 1917.

seule direction : celle qui nous conduit aux cordillères de la Terre de Graham, aux « Antarctandes ».

L'extrémité orientale des chaînes du Cap présente une rupture analogue. D'après notre reconstruction, où nous avons assigné, à l'Antarctique une place encore arbitraire, il est vrai, le prolongement de ces plis doit se trouver entre Gaussberg et Coatsland, mais cette côte est encore inexplorée.

Les relations géologiques existant entre l'Antarctique et la Terre de Feu (voir fig. 14) fournissent à l'appui de la théorie des translations un exemple typique. Nous en avons déjà parlé, du reste. La Paléontologie nous apprend qu'entre ces terres, l'échange d'un nombre restreint de formes dut s'effectuer encore au Pliocène. Cet échange ne fut possible que si l'on admet que ces deux caps s'affrontaient au voisinage de l'arc des îles Sandwich du Sud. De là, ils ont ensuite dérivé vers l'ouest, tandis que leur étroite terre de jonction restait adhérente au sima. On peut voir nettement sur la carte bathymétrique (1) de quelle manière ces archipels s'échelonnent parce qu'ils se sont détachés successivement des socles en mouvement. Le groupe des Sandwich qui occupe le point à partir duquel s'est effectué ce double arrachement, a été tordu violemment par les poussées horizontales qui y firent surgir des masses intrusives de sima. Ces îles sont basaltiques et l'une d'elles (l'île Zawadowski) possède encore des volcans actifs. Au reste, d'après KÜHN (2), les plissements d'âge tertiaire supérieur qui bordent la cordillère andine n'affectent pas l'arc des « Antilles du Sud ». Les plissements qu'on a pu dater en Géorgie du Sud, dans les Orkney du Sud, etc..., sont, en effet, plus anciens. C'est là une particularité que la théorie des translations explique aisément. En effet, si le plissement de l'Amérique du Sud et de la Terre de Graham résulte réellement de leur dérive vers l'ouest, il dut cesser de se produire dans l'arc des Antilles du Sud du moment que ces îles restaient en arrière.

Nous pourrions mentionner encore, dans ce chapitre, les preuves fournies par les dépôts glaciaires permo-carbonifères répandus sur

(1) La meilleure carte bathymétrique du détroit de Drake est celle de H. HEYDE ; KÜHN l'a reproduite dans son travail sur les Antilles du Sud (voir note suivante). Ses divergences d'avec celle de Groll dont nous donnons ici une esquisse (fig. 14) ne portent pas à conséquence.

(2) F. KÜHN. *Der sogenannte *Sudantillen-Bogen und seine Beziehungen.* Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. z. Berlin, 1920. Nr. 8/10, p. 249-262.

tous les continents austraux. Ces dépôts sont manifestement répartis sur les fragments dispersés d'un continent unique — à peu près comme le « Old Red » de l'hémisphère nord — et la grande distance,

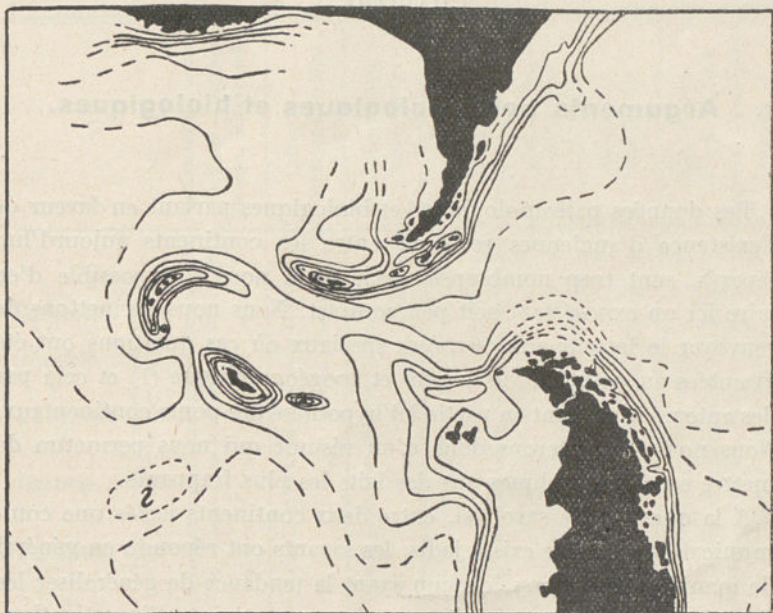


Fig. 14. — Carte bathymétrique du détroit de Drake, d'après Groll.

qui les sépare s'explique bien plus facilement par la théorie des translations que par celle des continents intermédiaires. Toutefois, comme ils intéressent en première ligne la climatologie, nous n'en parlerons en détail qu'au chapitre sixième.

CHAPITRE V

Arguments paléontologiques et biologiques.

Les données paléontologiques et biologiques parlant en faveur de l'existence d'anciennes relations entre les continents aujourd'hui séparés, sont trop nombreuses pour qu'il nous soit possible d'en faire ici un exposé tant soit peu complet. Nous nous permettons de renvoyer le lecteur aux ouvrages spéciaux où ces questions ont été discutées au point de vue phyto- et zoogéographique (1) et cela par des auteurs se ralliant en partie à l'hypothèse des ponts continentaux. Nous nous contenterons donc d'un résumé qui nous permettra de mettre en relief quelques-uns des faits les plus frappants.

A la question de savoir si, entre deux continents isolés une communication terrestre exista jadis, les savants ont répondu en général de manière fort diverse, chacun ayant la tendance de généraliser les données que lui fournissait son champ restreint d'investigation. Aussi sommes-nous heureux de ce que ARLDT ait donné une vue d'ensemble du problème en réunissant les différentes opinions émises au sujet de l'époque d'émersion de chaque continent intermédiaire, dont on supposa l'existence. Il va de soi que cette entreprise met au jour bien des contradictions ; mais en présence de la diversité des faits, il n'était guère possible de procéder autrement et le résultat semble bien justifier la méthode suivie. Voici la liste des auteurs dont il consulta les travaux (les cartes en particulier) : ARLDT, BURCKHARDT, DIENER, FRECH, FRITZ, HANDLIRSCH, HAUG, v. IHERING, KARPINSKY, KOKEN, KOSSMAT, KATZER, LAPPARENT, MATTHEW, NEUMAYR, ORTMANN, OSBORN, SCHUCHERT, UHLIG, WILLIS. Le tableau figurant à la page 59 est extrait de cette statistique. L'existence probable des ponts continentaux dont il est question dans les quatre premières colonnes fait l'objet du graphique de la figure 15. Pour

(1) Ces différents ponts continentaux ont été étudiés notamment par TH. ARLDT : *Handbuch der Paläogeographie*, 1, *Paläozoologie*. Leipzig 1917. On y trouvera aussi la plus grande partie de la bibliographie relative à ces questions.

chaque pont 3 courbes ont été tracées : la première exprime les voix affirmatives, la deuxième, les voix négatives, la troisième la différence des deux premières; celle-ci montre donc quelles sont les voix

	Australie — Afrique (Deccan, Madagascar)		Afrique — Amérique du Sud		Inde péninsulaire — Madagascar		Europe — Am. du Nord		Terre de Feu — Antarctique		Australie — Antarctique		Am. du Nord — Am. du Sud		Alaska — Sibérie		
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
Cambrien	i...	2	2	1		2		5		2		2		5		5	
	s...	3	1	3	1	3		6		3		3		6		6	
Silurien	i...	5		4	1	5		6	1	4		4		4	3	1	6
	s...	5		4	1	5		6	1	4		4		4	7	1	6
Dévonien	i...	5		4	1	5		6		4		4		3	3	2	4
	m...	5	1	5	1	5	1	7	1	1	4	1	4	4	4	1	7
Carbon	i...	2		2		2		3		1		1		1	2		3
	m...	5		5		5		6		1		3		4	7		7
Permien	s...	6		6		6		8		5		5		8		2	6
	i...	3		3		3		3	1	1	2	1	2	1	2	2	1
Trias	m...	1	1	2		2		1	2	2		2		1	2		1
	s...	2	1	3		3		1	2	3		3		2	1		3
Rhétien	i...	4	1	4	1	5		4	1	1	3		4	3	3		5
	m...	4		4		4		5		3		3		2	3		4
Lias	s...	5	2	5	1	6		4	3	1	4		5	8		8	
	i...	2		2		2		3		4		1		2		2	
Dogger	s...	2	3	5		5		4		4		4		6		4	2
	i...	1	3	4		4		2	1	3		2		4	3	1	
Malm	s...	3		3		3		2		2		2		3	1	2	
	i...	5		5		5		6		4		1	3	7		6	
Eocrétacé	s...	6		6		6		5	3	1	4	2	3	8		7	
	i...	1		1		1		1		1		1		1	1	2	
Meso crétacé	s...	5		4		6		1	5	1	4	1	4	3	4	2	5
	i...	7		2		5		8		1	6	1	6	4	6	4	6
Eocène	s...	6		3		3		1	5	5	2	6		3	3	2	5
	i...	6		1		5		1	5	6	2	2	4	1	5	8	7
Oligocène	s...	4		4		2		2		4		4		6		7	
	i...	6		6		1		4		4		6		2	6	7	1
Miocène	s...	3		3		3		2		2		1		3		3	
	i...	3		3		3		2		2		1		3		4	
Quaternaire	s...	3		3		3		1		3		3		4		3	
	i...	3		3		3		1		3		3		4		3	

qui l'emportent. Pour la rendre plus apparente nous avons mis en hachures la surface qu'elle limite. Les quatre terres de jonction dont il s'agit sont pour nous précisément les plus intéressantes. Le résultat de cette enquête est, malgré certaines divergences de détail, suffi-

samment clair dans ses grandes lignes. Nous pouvons l'exprimer comme suit : la communication qui dut exister entre l'Australie et l'Inde (y. c Madagascar et l'Afrique Australe) cessa tout au début du Jurassique ; celle qui reliait l'Amérique du Sud à l'Afrique dura jusqu'au Crétacé inférieur ou moyen ; enfin Madagascar fut séparée de l'Inde à la limite du Crétacé et du Tertiaire. Ainsi, jusqu'à ces diverses époques, la terre ferme unissait les continents austraux et cela depuis le Cambrien. Entre l'Europe et l'Amérique du Nord les relations furent loin d'affecter une telle continuité. Et cependant il règne à leur sujet une concordance de vues tout à fait satisfaisante. Elles furent entravées en particulier au Cambrien, au Permien, au Jurassique et au Crétacé, mais uniquement sous l'effet de transgressions marines qui ne s'opposèrent pas à leur rétablissement ultérieur. Leur rupture définitive, répondant à la formation d'un large bassin abyssal, ne peut dater que du Quaternaire.

Les deux colonnes de chiffres concernant les relations qui unissaient l'Antarctique d'un côté à la Terre de Feu, de l'autre au continent australien ne peuvent être appréciées au même titre que les précédentes. La prépondérance marquée des voix négatives est évidemment due au fait que nous ne connaissons l'Antarctique que très imparfaitement. Beaucoup d'auteurs ont nié l'existence de ces anciennes relations parce qu'ils n'en avaient pas de preuves suffisantes. C'est pourquoi il ne nous faut tenir compte ici que des avis positifs. Ils semblent indiquer que par le Détroit de Drake, un échange faunistique se produisit à différentes époques mais principalement du Crétacé au Pliocène ; entre l'Australie et l'Antarctique, cet échange eut lieu du Jurassique à l'Eocène (1). Ajoutons à cela que ARLDT n'a pas pris en considération les rapports très nombreux qui existèrent entre la faune australienne et celle de l'Amérique Australe, rapports qui furent rendus possibles grâce à l'Antarctique sans doute, mais nous n'en avons pas encore la preuve. Au reste son tableau statistique n'a pas été élaboré sous la forme la mieux adaptée à nos besoins.

Les deux dernières colonnes nous renseignent sur les ponts unis-

(1) Selon O. WILKENS, un pont parallèle à celui-ci — mais s'en différenciant sous bien des rapports — dut exister encore au Crétacé. Il reliait les terres suivantes (Nelle Guinée) — Nelle Zélande — Antarctique — Amérique du Sud. En effet, le Sénonien supérieur marin des côtes orientales de la Nelle Zélande offre une parenté faunistique avec celui des côtes occidentales de l'Amérique du Sud.

sant encore aujourd'hui certains socles continentaux. Il s'agit ici du pont de l'Amérique centrale et de celui du Déroit de Béring. Ces termes de jonction ne jouent aucun rôle dans la théorie des translations puisqu'elle maintient l'idée suivant laquelle leurs oscillations verticales les ont, par intermittence, immergés peu profondément. Nous avons pris comme exemple l'Amérique Centrale et le Déroit de Béring afin d'éviter certains malentendus. Un coup d'œil jeté sur la carte suffit à nous convaincre que l'Amérique du Nord n'est pas unie « comme par hasard » à l'Amérique du Sud. Ces masses continentales sont au contraire, depuis fort longtemps en communication bien que les territoires qui les relient aient été immergés parfois (comme le tableau d'ARLDT nous l'apprend). Ils émergèrent probablement au Silurien et au Dévonien puis au Permien, au Trias, au Crétacé, enfin, sans contredit, à partir du Miocène. Le fait que l'Amérique du Sud quitta l'ensemble euro-africain avant celle du Nord n'implique pas nécessairement une rupture des relations entre les deux parties du Nouveau-Monde. L'Amérique Centrale eut pourtant à subir de grandes déformations plastiques car, en dérivant vers l'ouest, l'Amérique du Sud pivotait sur son extrémité nord et c'était même là son mouvement principal.

Il se produisit au Déroit de Béring un phénomène analogue. Nous avons vu que l'objection de DIENER (1) ne serait valable que si la carte Mercator répondait à la réalité. Le globe nous enseigne que la dérive de l'Amérique du Nord fut aussi et avant tout, un mouvement de rotation. Les socles américains et asiatiques ne cessèrent pas de communiquer. Le déroit de Béring cache un pont qui fut émergé au Silurien, au Dévonien, du Carbonifère moyen, au Permien moyen, au Lias, au Dogger ; enfin du Crétacé au Quaternaire, si la mer ne le recouvrait pas, il dut cependant être occupé en partie par des glaces polaires et ne pas offrir de ce fait une voie de communication favorable.

Etudions à présent, au point de vue biologique, la grande fente atlantique. L'océan qui l'occupe est considéré d'une façon générale comme récent à l'inverse du Pacifique. Selon L. v. UBISCH « l'Atlantique ne possède pas les nombreuses formes animales très anciennes

(1) On ne peut replacer l'Amérique aux côtés de l'Europe sans briser le pont qui l'unit au socle asiatique par le déroit de Béring ». DIENER. *Die Grossformen der Erdoberfläche*. Mitt. d. k. k. geol. Ges. Wien. 58, p. 329-349, 1915. Du même auteur : *Die Marinen Reiche der Triasperiode* Denkschr. d. Akad. d. Wiss. in Wien, Math.-Naturwiss. Kl. 1915.

(*Nautilus*, *Trigonia*, *Otaria*...) que nous trouvons dans le Pacifique (1). M. W. MICHAELSON nous a fait remarquer que la répartition actuelle des vers de terre atteste d'une manière irrécusable l'existence d'anciennes relations entre les rives opposées de l'Atlantique puisque la mer est pour ces animaux un obstacle en général

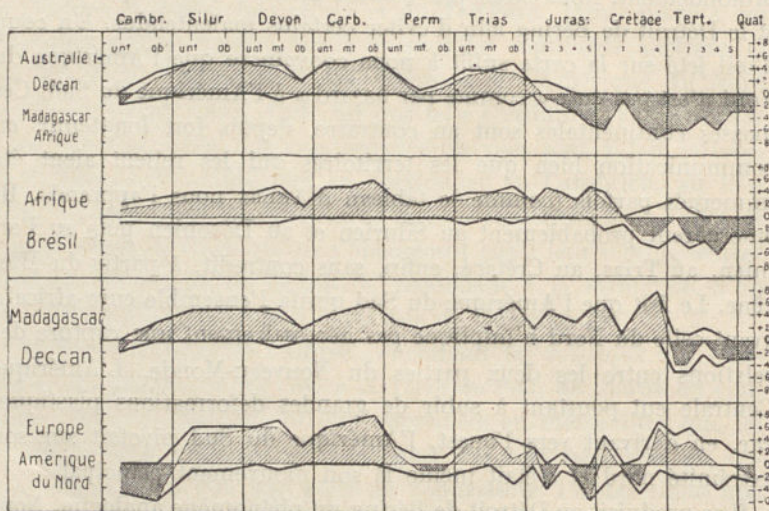


Fig. 15. — Graphique exprimant le nombre de voix parlant pour (courbe supérieure) ou contre (courbe inférieure) l'existence de quatre ponts continentaux depuis le Cambrien.

La différence (majorité) est marquée par des hachures, croisées en cas de négation.

unt = i ;

ob = s ;

mi = m

infranchissable (2). Ils offrent de part et d'autre de nombreux traits de parenté et cela à toutes les latitudes. Dans le sud, ces relations concernent plutôt les genres anciens (*Chilotacés*, *Glossolecinés*, *Microchétinés*, *Ocnerodrinilés*, *Microchétinés* récents, *Trigastarinés*), tandis que dans le nord, on trouve non seulement le genre *Sparganophilus*, encore assez ancien peut-être, mais aussi des genres sans doute récents appartenant aux *Lombricinés* qui sont répandus sans discontinuité du Japon au Portugal. Au-delà de l'Atlantique, (dans les Etats de l'Est seulement (!)) ils présentent des formes endémiques (3).

(1) L. V. UBISCH. *Wegeners Kontinentalverschiebungstheorie und die Tiergeographie*. Verh. d. Physikal. — Med. Ges. zu Würzburg, 1921 (Tirage à part, 43 p.)

(2) M. MICHAELSEN nous a obligeamment fourni les cartes de son ouvrage « *Die geographische Verbreitung der Oligochaeten* » 486 p. (Berlin 1903) en y ajoutant de précieux commentaires.

(3) C'est en partant de semblables considérations que IRMSCHER démontra que la

Nous reproduisons ici un deuxième tableau tiré de l'ouvrage d'ARLDT, tableau dont les chiffres nous fourniront de précieux renseignements à l'égard du pont nord-atlantique. Le nombre des Reptiles et des Mammifères communs à l'Europe et à l'Amérique du Nord y est indiqué en 0/0.

	Reptiles 0/0	Mammifères 0/0
Carbonifère.....	64	—
Permien.....	42	—
Trias.....	32	—
Jurassique.....	48	—
Cretacé inférieur.....	17	—
» supérieur.....	24	—
Eocène.....	32	35
Oligocène.....	29	31
Miocène.....	27	24
Pliocène.....	?	19
Quaternaire.....	?	30

L'allure de ces chiffres correspond bien au résultat de notre enquête (fig. 15). La plupart des savants admettent, en effet, que ces continents furent unis au Carbonifère, au Trias, au Jurassique inférieur, enfin du Crétacé supérieur au Tertiaire moyen. Ils s'accordent d'une manière frappante pour ce qui concerne le Carbonifère ; peut-être parce que sa faune est spécialement bien connue (1). Des recherches minutieuses ont été faites, de toutes parts, tant sur la faune que sur la flore du Carbonifère européen et nord-américain, notamment par DAWSON, BERTRAND, WALCOTT, AMI, SLATER, v. KLEBELSBERG. Ce dernier démontra en particulier l'unité faunistique des intercalations marines du Carbonifère productif de la zone qui s'étend du Donetz à l'Amérique du Nord, en passant par la Haute-Silésie, la Ruhr, la Belgique et l'Angleterre. Cette unité est d'autant plus frappante que la faible épaisseur de ces couches intercalées témoigne d'un temps relativement court. Les identités ne se limitent en aucune façon aux espèces dont l'extension était

phytogeographie s'accorde également avec la théorie des translations. (Leçon d'ouverture donnée le 11 oct. 1919 à Hambourg sur la Genèse des Continents dans ses rapports avec la répartition des végétaux). Il est vrai que la dissémination des graines, favorisée par les tempêtes, est si vaste que des mélanges floristiques peuvent s'effectuer à grande distance.

(1) Le pour-cent des formes identiques doit-être d'autant plus faible que la faune est moins connue.

plus ou moins universelle (1). Nous ne pouvons pas entrer ici dans plus de détails. L'absence, durant le Pliocène et le Quaternaire, de Reptiles communs aux deux continents est évidemment due à l'abaissement de la température. Le froid fit disparaître l'ancienne faune. Les Mammifères nous offrent, à partir du moment où ils ont apparu, un tableau analogue à celui des Reptiles. A l'Eocène, ils présentent de part et d'autre un nombre particulièrement grand d'espèces identiques. V. UBISCH nous dit à ce propos :



FIG. — 16. Répartition de quelques animaux des régions voisines de l'Atlantique nord.

Ponctué : escargots des jardins. Pointillé — vers de terre. Trait-point : perche
Hachures NE-SO : huître perlière. Hachures NO-SE : ombles (*Umbra*)

« A l'Eocène, nous retrouvons en Europe presque tous les sous-ordres américains de la classe des Mammifères. C'est aussi le cas pour d'autres classes d'animaux (2) ». On peut sans doute attribuer à la présence d'un inlandsis, le fait qu'au Pliocène ces relations faunistiques se font moins nombreuses (comme nos chiffres l'indiquent). Nous reproduisons ici le croquis cartographique dans lequel ARLDT a figuré l'aire de dispersion des organismes qui lui paraissaient les plus aptes à fournir des arguments décisifs à la question du pont nord-atlantique. Comme il vient d'être dit, les Lombricinés, vers de terre récents, sont répartis dans tous les territoires compris entre le Japon et l'Espagne et on les retrouve dans l'Est américain. L'huître perlière se montre aux points de rupture des continents : en Irlande et à Terre-Neuve et dans leurs régions limitrophes. La répartition de l'escargot des jardins (*Ta-*

(1) R. V. KLEBELSBERG, *Die marine Fauna der Ostrauer Schichten*. Jahrb. d. k. k. Geol. Reichsanstalt 62, 461-556, 1912. Nous nous en référons aussi aux communications que cet auteur nous fit par lettres.

(2) UBISCH, ouvrage cité p. 62.

chea hortensis (L) est plus frappante encore : Ce mollusque occupe en Europe les pays compris entre le Sud de l'Allemagne et l'Angleterre pour passer par l'Islande et le Groenland en Amérique où on le trouve au Labrador, à Terre-Neuve et dans les Etats de l'Est seulement. Les perches (Percidés) et d'autres poissons d'eau douce ont une aire de dispersion analogue. On pourrait mentionner aussi la bruyère commune (*Calluna vulgaris*) qui, au-delà de l'Europe ne se rencontre qu'à Terre-Neuve et dans les contrées qui s'en rapprochent le plus. Inversement, en Europe, un grand nombre de plantes américaines n'ont envahi que la côte occidentale de l'Irlande. Si, on peut invoquer le Gulf Stream comme agent de dissémination de ces dernières, on ne peut le faire pour la bruyère. Il existe plus d'un fait tendant à prouver que les relations entre l'Irlande et Terre-Neuve ont duré jusqu'au début du Quaternaire. En outre, le deuxième pont qui semble avoir existé plus au nord se serait rompu tout au plus vers le milieu de cette dernière période (1). Les recherches de WARMING et de NATHORST faites sur la flore du Groenland, nous instruisent sur ce point, elles montrent que les éléments européens dominent sur la côte sud-ouest, laquelle précisément s'appliquait, selon nous, à celles de la Scandinavie et de l'Ecosse septentrionale et cela au Quaternaire encore, tandis que l'influence américaine est prépondérante sur le reste de son pourtour, même au nord-est. D'après SEMPER, la flore tertiaire de la Terre de Grinnel présentait, chose curieuse, plus de traits de parenté avec celle du Spitzberg (63 %) qu'avec celle du Groenland (30 %) alors qu'aujourd'hui c'est naturellement l'inverse : Spitzberg 64 % ; Groenland 94 % (2). La carte où nous avons cherché à assigner aux continents la place qu'ils occupaient à l'Eocène donne la clef de l'énigme. Elle montre, en effet, qu'à cette époque, la Terre de Grinnel se trouvait plus près du Spitzberg que des régions groenlandaises où ces plantes fossiles furent trouvées.

D'après la figure 15, la question des ponts sudafrantiques est plus claire et plus simple que la précédente. STROMER, entre autres, nous a fait remarquer que la répartition de la flore à Glossoptéris,

(1) SCHARFF. *Über die Beweisgründe für eine frühere Landbrücke zwischen Nordeuropa und Nordamerika*. (Proc. of. the Royal Irish Ac. 28, 4, p. 4-28, 1909 : (Cité par ARLDT dans un compte rendu. Naturw. Rundschau. 1910).

(2) SEMPER. *Das paläothermale Problem, speziell die Klimatischen Verhältnisse des Eozäns in Europa und im Polargebiete*. Zeitschr. Deutsch. Geol. Ges. 48 p. 261 et suivantes. 1896.

des reptiles tels que les Mésosauridés (1) et de bien d'autres êtres vivants, implique l'existence d'une grande terre unissant les continents du sud. JAWORSKI en arrive à la même conclusion, après avoir fait la part de toutes les objections qui certes ne manquent pas, ici non plus. Il s'exprime ainsi : « Tout ce que nous savons de la géologie de l'Afrique occidentale et de l'Amérique du Sud confirme pleinement la supposition fondée sur les données anciennes et récentes de la géographie animale et végétale à savoir que durant les premières périodes géologiques, il dut exister entre l'Afrique et l'Amérique du Sud une communication terrestre traversant les régions qu'occupe actuellement l'Atlantique Sud » (2). ENGLER conclut de la répartition des végétaux : « La présence des types végétaux commune à l'Amérique et à l'Afrique s'expliquerait de la manière la plus satisfaisante si l'on arrivait à prouver qu'entre le Brésil septentrional (sud-est de l'embouchure de l'Amazone) et l'Afrique occidentale (Baie de Biafra) de grandes îles ou une masse continentale eussent existé. Il faudrait aussi démontrer qu'entre le Natal et Madagascar il y eut des terres s'ajoutant à celles qui, ainsi qu'on l'a supposé depuis longtemps, unissaient cette île à une Inde péninsulaire séparée du continent sino-australien. D'autre part, les nombreux traits de parenté reliant la flore du Cap à celle de l'Australie exige entre ces terres une communication. Il serait désirable de la faire passer par l'Antarctique » (3). C'est entre la Guinée et le Brésil septentrional que les relations semblent avoir duré le plus longtemps. « Le lamantin (*Manatus*) s'observe aussi bien dans l'Ouest Africain que dans les régions tropicales de l'Amérique. Il vit dans les fleuves et les mers chaudes et peu profondes ; il lui est cependant impossible de traverser l'Océan. On a conclu de ce fait qu'une zone de mers néritiques s'étendait entre les rivages septentrionaux de l'Afrique Occidentale et de l'Amérique du Sud. » (STROMES.)

Tous ces arguments sont naturellement ceux qu'ont allégués aussi les partisans des ponts continentaux. La théorie des transla-

(1) Selon STROMER, l'objection de DIENER, suivant laquelle les faunes de vertébrés permotriasiques de l'Amérique du Sud et de l'Afrique ne se ressemblaient pas, est négligeable car celles de l'Amérique du Sud ne sont pas encore suffisamment connues. (Geogr. Zeitschr. 1920 p. 287 et suivantes).

(2) JAWORSKI *Das Alter des südatlantischen Beckens*, Geol. Rundsch. 1921 p. 60-74.

(3) Extrait de l'article intitulé « *Geographie der Pflanzen* » dans le *Handwörterbuch der Naturwissenschaften*.

tions cependant, offre même à la question d'ordre purement biologique, une solution plus simple car, pour expliquer l'extension des faunes et des flores anciennes, elle tient compte non seulement des jonctions territoriales mais aussi des modifications que l'on peut apporter aux distances séparant les lieux de trouvaille. L'île de Juan Fernandez peut être à ce point de vue d'un intérêt particulier. D'après SKOTTSBERG elle n'offre aucune parenté biologique avec la côte du Chili dont elle est pourtant si voisine mais seulement avec la Terre de Feu (courants aériens et marins!), l'Antarctique, la Nouvelle Zélande et les îles du Pacifique. Ce fait concorde à merveille avec l'idée que l'Amérique du Sud se transporte vers l'ouest. Son rapprochement de Juan Fernandez est si récent que la différence de flore s'explique. Les partisans de la théorie des affaissements continentaux ne sauraient quelle cause invoquer ici.

Les Iles Hawaii ont aussi une flore apparentée, non pas à celle de l'Amérique du Nord qui est pour elles la terre la plus proche — terre située en outre du côté d'où lui viennent les courants marins et atmosphériques, — mais à celle de l'Ancien Monde (1). Et cela s'explique, semble-t-il, si l'on tient compte du fait qu'au Miocène, le Pôle Nord se plaçant au détroit de Bering, les Hawaii étaient à 40 ou 50° de latitude nord, donc sur le passage des grands vents d'ouest, venant du Japon et de la Chine, et que de plus, la côte américaine en était alors notablement plus éloignée qu'aujourd'hui.

Les relations biologiques entre le Deccan et Madagascar, rendues possibles grâce à un prétendu « continent lémurien » actuellement englouti, sont si connues que nous nous bornerons à renvoyer le lecteur aux renseignements que fournissent à ce sujet la figure 15 et le tableau d'ARLDT. Là encore, la théorie des translations a l'avantage, car, aujourd'hui, les régions intéressées présentent entre elles un grand écart de latitude. Si elles ont cependant un climat semblable, leur permettant d'héberger des espèces voisines, c'est qu'elles se trouvent à peu près à égale distance de l'équateur. Une telle différence de latitude reportée à l'époque de la flore à glossoptéris, nous poserait une énigme climatologique. Au reste, même prise dans son ensemble, la répartition des couches à glossop-

(1) A. GRISEBACH. *Die Vegetation der Erde nach ihrer Klimatischen Anordnung Ein Abriss der vergleichenden Geographie der Pflanzen*. Leipzig 1872 Bd. 2, 528 et 632. O. DRUDE, *Handbuch der Pflanzengeographie*. Stuttgart 1890, p. 487.

téris, tout en prouvant l'ancienne existence de communications terrestres entre les continents austraux, donne à la théorie des translations un avantage évident sur celle des affaissements. La situation actuelle des lieux de trouvailles rend en effet inadmissible qu'ils aient tous joui du même climat à une époque quelconque de l'histoire géologique. Nous n'entrerons dans plus de détails à ce sujet qu'au chapitre suivant.

Nous ne voulons plus parler ici que de la faune australienne, laquelle nous semble avoir dans le problème des translations une importance toute particulière. WALLACE (1) y distinguait nettement trois éléments ancestraux, et c'est une division à laquelle les études récentes — celles de HEDLEY en particulier — n'ont pas apporté de changements notables. Le plus ancien élément est représenté surtout dans le sud-ouest australien. Il offre des traits de parenté avec la faune de l'Inde et de Ceylan, de même qu'avec celle de Madagascar et de l'Afrique Australe. Il comprend entre autres des animaux aimant la chaleur de même que des vers de terre évitant les sols soumis au gel (2). Cette parenté date de l'époque où l'Australie était encore soudée à l'Inde ; c'est-à-dire d'avant le Jurassique inférieur, si l'on s'en réfère à la figure 15.

Le deuxième élément faunistique de l'Australie est bien connu. Il comprend les Marsupiaux et les Monotrèmes, mammifères particuliers qui marquent une différence si frappante entre la faune australienne et celle des Iles de la Sonde (faunes mammalogiques séparées par la « ligne de WALLACE »). Cet élément se retrouve en Amérique du Sud. L'Amérique du Sud est avec l'Australie, les Molluques et certaines îles des mers australes, une des principales terres où l'on rencontre des marsupiaux dont une espèce : l'opossum, pénètre jusqu'en Amérique du Nord. Elles y ont été trouvées

(1) WALLACE, *Die geographische Verbreitung der Tiere* Trad. allem. de MEYER. Vol 2 Dresde 1876.

(2) Selon MICHAELSEN, les Octocétinés créent une relation faunistique directe entre la N^{lle} Zélande, Madagascar, l'Inde péninsulaire et l'Indochine septentrionale sans toucher le continent australien qui s'étend pourtant au centre de leur aire de dispersion. Ce sont les nombreux genres de la sous famille de Mégascolecins qui mettent de la façon la plus manifeste l'Australie (y. c. pour certaines espèces, l'île Nord de la N^{lle} Zélande ou même l'Archipel entier) en relation avec Ceylan et tout spécialement les régions australes de l'Inde ; on peut y ajouter, dans certains cas, le nord de l'Inde et de l'Indochine et, chose curieuse, la côte occidentale de l'Amérique du Nord. Le fait que les vers de terre de l'Australie et de l'Afrique n'offrent entre eux aucune parenté confirme notre supposition suivant laquelle ces continents ne furent réunis que par l'intermédiaire de l'Inde et de l'Antarctique

fossiles, ainsi qu'en Europe, mais l'Asie n'en a fourni aucune trace jusqu'ici. Les Sarigues de l'Australie et de l'Amérique du Nord ont même des parasites identiques : BRESSLAU (1) fait remarquer que dans le groupe des Platodes, les Géoplanides (qui comptent 175 espèces environ) se retrouvent aussi bien en Amérique du Sud qu'en Australie. La distribution géographique des Trématodes et des Cestodes est naturellement celle de leur hôte, mais elle n'a été que rarement l'objet de recherches spéciales. Qu'il y ait là aussi des faits d'un haut intérêt zoogéographique c'est ce que nous prouvent les Cestodes du genre *Linstowia* qui se rencontrent exclusivement dans les *Didelphyides* (Sarigues) de l'Amérique du Sud et dans certains Marsupiaux (*Parameles*) et Monotrèmes (*Echidna*) de l'Australie. Au sujet des rapports faunistiques australo-américains, WALLACE dit entre autres : « Il est important de relever que les Reptiles qui aiment des climats torrides ne peuvent guère nous faire supposer que des relations étroites existèrent entre ces deux continents tandis que les Amphibiens et les Poissons d'eau douce qui supportent le froid nous le prouvent surabondamment. » Du reste, ce fait est attesté par leurs faunes entières, aussi WALLACE estime-t-il que c'est par leurs extrémités australes, voisines des régions froides que durent communiquer l'Amérique et l'Australie, si tant est qu'une semblable jonction exista. Les vers de terre ne l'ont pas utilisée, d'ailleurs. Comme ces faits nous ont porté à croire que c'est l'Antarctique qui a joué ce rôle, — nous avons vu qu'il offre en outre le chemin le plus court — il ne faut pas nous étonner qu'on ait refusé presque partout l'hypothèse d'un pont sud pacifique (qui ne paraît joindre les points les plus rapprochés que sur la carte Mercator) (2). Le deuxième élément faunistique

(1) E. BRESSLAU. Article concernant les *Plathelminthes* dans le *Handwörterbuch der Naturwissenschaften* 7, 993. — ZSCHOKKE, *Zentralbl. Bakt. Paras* 1, 36, 1904.

(2) BURCKHARDT est à peu près seul à supposer encore l'existence d'un semblable pont continental, du Dévonien à l'Eocène. Ses arguments ne relèvent pas de la biologie, à laquelle on ne peut s'adresser ici avec succès, comme l'a montré notamment SIMROTH (*Über das Problem früheren Landzusammenhang auf der südlichen Erdhälfte*. *Geogr. Zeitschr.* 7 p. 665-676, 1901) — mais de la géologie uniquement. La côte occidentale de l'Amérique du Sud présente, entre 32 et 39° de Lat. S., des conglomérats porphyroïdes que d'anciens auteurs estimaient d'origine volcanique, mais qui, selon B. doivent être considérés comme des galets littoraux agglomérés. Du moment que vers l'est des sables leur font suite, B. suppose qu'il s'agit là d'une ancienne ligne de rivage, appelant la terre ferme du côté du Pacifique et la mer du côté de l'Amérique. Nous serions, de plus, aux abords de l'embouchure d'un grand fleuve. SIMROTH (O. C.), ANDRÉE (*Das Problem der Permanenz der Ozeane und Kontinente*, *Petermanns Mitt.* 63, 348, 1917)

s'est donc constitué aux temps où l'Australie était encore reliée à l'Amérique du Sud par l'Antarctique, c'est-à-dire du Jurassique inférieur (époque à laquelle l'Inde se détacha de l'Australie) à l'Eocène (séparation de l'Antarctique). La situation actuelle de l'Australie n'isole plus ces formes animales. Elles envahissent les Iles de la Sonde de telle sorte que WALLACE devrait déjà faire passer sa frontière mammalogique entre les îles Bali et Lombok et par le Déroit de Makassar.

Le troisième élément comprend des animaux qui ont immigré en Australie le plus récemment. Venus des Iles de la Sonde, ils ont déjà pris possession du nord-est du continent. Le Dingo (chien sauvage), certains Rongeurs et Chiroptères y ont pénétré après notre époque glaciaire. Les vers de terre du genre *Phretima* qui, grâce à leur grande vitalité, ont pu supplanter la plupart des genres plus anciens et cela dans les Iles de la Sonde et le Sud-Est asiatique (régions côtières de la Malaisie, de la Chine et du Japon) ont colonisé entièrement la Nouvelle Guinée et se fixent déjà à la pointe Nord de l'Australie. Tout cela nous prouve l'établissement récent d'un échange actif de faunes et de flores.

Cette répartition en trois groupes faunistiques concorde de la façon la plus heureuse avec la théorie des translations. Pour s'en rendre compte, il suffit de jeter un coup d'œil sur nos essais de reconstruction de la planisphère à trois époques déterminées (cartes fig. 1). Nous y trouverons la solution immédiate des problèmes d'ordre purement biologique dont il vient d'être question. Ici encore, nous pourrions nous convaincre du grand avantage que notre hypothèse a sur celle des ponts continentaux. En effet, la plus faible distance séparant l'Australie de l'Amérique du Sud, autrement dit la Tasmanie de la Terre de Feu, équivaut à celle de l'Allemagne au Japon et l'Argentine moyenne est aussi éloignée du centre de l'Australie que de l'Alaska ; c'est la distance de l'Afrique australe au Pôle Nord. Peut-on croire vraiment que sur un tel parcours une simple jonction territoriale suffit à assurer l'échange des espèces animales ? Et n'est-il pas des plus étranges

DIENER, SÖRGE sont de ceux qui n'ont pas admis l'hypothèse de BURCKHARDT. ARLDT même, qui en est un des rares partisans, se voit obligé d'avouer que ce continent Pacifique est celui dont l'existence ancienne est le plus difficile à démontrer (*Die Frage der Permanenz der Kontinente und Ozeane*. Geog Anzeiger 19, 2-12, 1918). Il faudra donc trouver d'autres explications aux observations de BURCKHARDT.

que l'Australie n'ait eu aucun rapport faunistique avec les Iles de la Sonde combien plus rapprochées d'elle, îles qui nous paraissent, de ce fait, provenir d'un autre monde ? Personne ne pourra méconnaître qu'en réduisant à peu de chose la distance de l'Amérique du Sud à l'Australie pour créer d'autre part entre ce continent et les îles de la Sonde un large bassin abyssal, notre hypothèse fournit une solution au problème de la faune australienne.

CHAPITRE VI

Arguments paléoclimatiques

Ce n'est pas ici le lieu d'exposer tout au long le problème des climats des temps géologiques. Notre argumentation nous oblige toutefois d'en donner au moins le rapide aperçu grâce auquel nous pourrions faire valoir les raisons qui, dans ce domaine, militent en faveur de la théorie des translations.

Si la paléoclimatologie est une science encore fort peu développée, ce n'est certes pas parce qu'elle manque de données. Elle en dispose, au contraire, d'un nombre considérable mais, à vrai dire, nous ne pouvons pas les interpréter toutes avec la même certitude et, par malheur, il s'en trouve aussi qui l'ont été faussement. Une bonne part de ces données nous est fournie par les fossiles animaux et végétaux. Ainsi, l'ancienne limite entre la toundra, privée d'arbres et les forêts de la zone tempérée, limite coïncidant avec l'isotherme de $+10^{\circ}$ du mois le plus chaud, peut être rétablie le plus souvent avec une assez grande exactitude. Ces forêts dont les essences présentent des couches annuelles de croissance se distingueront à leur tour des forêts ombrophiles tropicales et, par endroits, de la végétation xérothermique subtropicale qui, d'ailleurs, n'occupe aujourd'hui aussi qu'un espace restreint. Les palmiers actuels ne se présentent que sous un climat dont la température moyenne du mois le plus froid ne descend pas au-dessous de $+6^{\circ}$. Il est très probable que l'existence des palmiers des temps géologiques dépendait de semblables conditions thermiques. Les coraux ont des exigences analogues : on les trouve seulement dans les eaux dont la température ne descend pas au-dessous de $+20^{\circ}$ C. Les Reptiles n'ont jamais pu vivre dans les régions polaires puisqu'ils n'ont pas de chaleur propre et les vers de terre non plus, les sols gelés ne leur convenant pas. En revanche, les Amphibiens et les Poissons d'eau douce peuvent s'y aventurer grâce à la chaleur relative de l'eau; les Mammifères ayant la leur supporteront aisément les climats les plus rigoureux, etc., etc.

Nous ne pouvons énumérer ici tous les facteurs concourant à nous révéler le climat sous lequel a vécu une faune ou une flore donnée. Considérés isolément, ces indices sont naturellement très peu sûrs ; car, les plantes comme les animaux, nous fournissent des exemples étonnants d'adaptation, certaines espèces supportant un climat totalement différent de celui sous lequel vivent leurs congénères. Mais dans ce cas il en va comme du calcul de la trajectoire d'un météore, calcul basé sur un grand nombre d'estimations peu précises : prises à part, les données peuvent être tout à fait incertaines souvent même fausses mais, selon les règles du calcul des probabilités, leur ensemble n'en fournit pas moins un résultat méritant créance.

Le règne inorganique nous apporte aussi des indices climatiques. Ils sont d'autant plus dignes de foi que l'adaptation n'y joue évidemment aucun rôle. Les limons à blocaux, les blocs erratiques striés, les roches polies attestent, notamment lorsqu'on les trouve répandus sur de vastes territoires, l'activité d'une calotte glaciaire et par suite, le climat polaire. Dans les régions marécageuses, les charbons ont pu se constituer à des températures extrêmement variées, mais il fallait toutefois que les précipitations y fussent supérieures à l'évaporation. Le sel, au contraire, ne peut se déposer que si l'évaporation l'emporte, par conséquent sous un climat aride seulement. D'épaisses couches de grès sans fossiles doivent être considérées comme une formation désertique : rouges, elles correspondent plutôt à un climat tropical, jaunes, plutôt à un climat tempéré (latérites des tropiques, terres rouges des régions subtropicales, limons jaunes des régions tempérées) et ainsi de suite.

La quantité énorme des faits de cette nature nous prouve à l'évidence que la plupart des contrées du globe ont eu, dans le passé, un climat bien différent de celui dont elles jouissent aujourd'hui. En voici un exemple particulièrement frappant :

Le Spitzberg, actuellement recouvert par les glaces et soumis aux rigueurs du climat polaire, portait au Tertiaire inférieur des forêts plus riches en essences que celles de l'Europe centrale d'aujourd'hui. On n'y trouvait pas seulement des pins, des sapins et des ifs, mais un grand nombre de végétaux à feuilles caduques : tilleul, hêtre, peuplier, orme, chêne, érable, lierre, prunellier, noisetier, épine blanche, boule de neige, frêne... de même que des plantes aimant la chaleur : lis des marais, noyer, taxodium, séquoia,

platane, châtaignier, gingko, magnolia, vigne. Il dut y régner un climat semblable à celui de la France actuelle et la moyenne annuelle de température y était probablement de 20° supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui. Si nous nous adressons à des terrains plus anciens, nous trouvons les indices d'une température encore plus élevée. Au Jurassique et au Crétacé inférieur, il y croissait des palmiers sajo qui ne se rencontrent de nos jours que sous les tropiques, des ginkgos actuellement réduits à une seule espèce habitant la Chine et le Japon méridional, des fougères arborescentes, etc... Enfin, au Carbonifère ancien, le Spitzberg hébergeait des Calamités, des lepidodendrons, des fougères arborescentes, bref, la flore des grands gisements houillers qui en Europe centrale répondent au Carbonifère récent, flore tropicale de l'avis des meilleurs connaisseurs. A cette époque, la moyenne annuelle de température dut être, au Spitzberg, de 30° plus élevée qu'elle ne l'est de nos jours.

Un changement de climat aussi radical nous fait entrevoir dès l'abord un déplacement des pôles (et de l'équateur) autrement dit de l'ensemble des zones climatiques. Et cette supposition se confirme du fait qu'à 90° au sud du Spitzberg, l'Afrique Centrale subissait, durant les mêmes époques, une révolution climatique de même amplitude, mais, qui s'opérait en sens contraire : Au Carbonifère, l'inlandsis ; aujourd'hui, les pluies équatoriales. D'autre part, si, de l'Afrique centrale, nous parcourons vers l'est un quart de circonférence terrestre, nous arrivons aux Iles de la Sonde, dont le climat ne fut pas modifié ; du moins à partir du Tertiaire, ces contrées conservèrent-elles le climat tropical. Les nombreuses plantes et animaux (palmier sajo, tapir, par exemple) qui s'y sont maintenus, l'attestent. A leurs antipodes, les régions septentrionales de l'Amérique du Sud manifestent un semblable état de choses : le tapir y vit encore, alors qu'on ne le trouve qu'à l'état fossile en Amérique du Nord, en Europe, et en Asie, et qu'il manque totalement à l'Afrique.

Il ne faut donc pas nous étonner, qu'en recherchant les causes des changements climatiques, l'on en soit arrivé de bonne heure à l'idée du déplacement des pôles ; on y revient sans cesse. En réalité, cette hypothèse en comporte deux : On peut supposer ou bien que l'ensemble de la croûte terrestre se déplace sur son substratum sans modifier la position que l'axe de rotation occupe par rapport à la

masse principale du globe, ou bien que cet axe est capable d'oscillations. Nous ne distinguerons pas ici ces deux hypothèses ; par migrations des pôles nous entendrons une fois pour toutes leur changement de place à la surface de la terre sans indiquer par là si ce changement résulte du glissement de l'écorce ou des oscillations de l'axe ou même du concours de ces deux phénomènes. HERDER déjà, dans sa *Philosophie de l'Histoire de l'Humanité* explique d'une façon analogue les fluctuations des climats anciens. Son idée fut aussitôt reprise et développée plus ou moins à fond par un grand nombre d'auteurs. Tels sont EVANS (1876), TAYLOR (1885), LÖFFELHOLZ VON COLBERG (1886), OLDHAM (1886), NEUMAYR (1887), NATHORST (1888), HANSEN (1890), SEMPER (1896), DAVIS (1896), REIBISCH (1901), KREICHGAUER (1902), GOLPIER (1903), SIMROTH (1907), WALTHER (1908), YOKOYAMA (1911), DACQUÉ (1915) ; ECKARDT en a parlé récemment au cours de nombreux travaux dont les derniers datent de 1921. E. KAISER, dans son *Traité de Géologie* (1918) ; KOSSMAT (1921) et d'autres (1) en font mention également. Pourtant, l'idée des déplacements polaires eut sans cesse de nombreux contradicteurs notamment au sein des géologues qui pour la plupart refusèrent tout d'abord de l'admettre. Mais depuis les travaux de NEUMAYR et de NATHORST, le nombre de ses partisans augmente, bien que très lentement. A l'heure actuelle, les géologues sont en majeure partie de l'avis de E. KAISER. Ils estiment qu'il est difficile de ne pas admettre un déplacement du pôle, pour le Tertiaire, en particulier. Il vaut bien la peine de prendre note de cette opinion en dépit de la violence étonnante que mettent à la combattre certains de ses adversaires.

Si impérieuses que soient les raisons favorables à l'idée que les pôles effectuent des migrations durant certaines périodes de l'histoire du globe, il est cependant indéniable que tous les essais tendant à préciser les emplacements qu'ils auraient occupés, n'ont abouti qu'à d'étranges contradictions. Aussi n'est-il pas étonnant que l'on se soit demandé souvent si l'hypothèse des migrations polaires ne nous engageait pas sur une fausse route. De semblables essais ont été entrepris notamment par LÖFFELHOLZ VON

(1) Pour la bibliographie d'avant 1918, voir Th. ABLDT. *Die Ursachen der Klimaschwankungen der Vorzeit, besonders der Eiszeiten*. Zeitschr. f. Gletscherkunde 41. 1918.

COLBERG (1), REIBISCH (2) et SIMROTH (3), KREICHGAUER (4) et JACOBITTI (5). REIBISCH a des idées très justes sur les déplacements effectués par les pôles à partir du Crétacé mais il a voulu ramener de force ces mouvements à une stricte oscillation dans un cercle déterminé. Cette conception est vraisemblablement incompatible avec les lois physiques du gyroscope. Elle est en tout cas sans fondement et les observations y contredisent sur bien des points. SIMROTH a recueilli un grand nombre de données biologiques capables de fournir de bons arguments en faveur des déplacements des pôles, mais elles ne peuvent nous convaincre de la validité de la soi-disante loi formelle des oscillations régulières. Il est plus rationnel de procéder d'une manière purement inductive, autrement dit de déterminer sans idées préconçues la situation des pôles d'après ce que les fossiles nous apprennent des anciens climats. KREICHGAUER est de ceux qui ont suivi cette voie. Il a exposé ses recherches dans un livre très clairement écrit mais où il table entre autres sur un dogme insuffisamment établi, au sujet de l'arrangement des chaînes de montagnes. Presque tous ces essais s'accordent à placer, au début du Tertiaire, le Pôle Nord au voisinage des Aléoutiennes d'où il aurait émigré peu à peu vers le Groenland qu'il dut occuper au Quaternaire. Pour les époques récentes, les avis ne comportent pas de divergences foncières, mais au sujet des périodes antérieures au Crétacé nous sommes en pleine cacophonie. Non seulement les opinions des auteurs cités plus haut diffèrent de beaucoup les unes des autres, mais toutes les reconstructions qu'ils projettent donnent lieu à des contradictions sans issue et de nature à empêcher formellement de déterminer avec quelque chance de succès l'allure des déplacements du pôle.

Les dépôts glaciaires permocarbonifères de l'hémisphère sud constituent le plus sérieux de ces obstacles. L'inlandsis a laissé des traces sur tous les continents austraux, traces parfois si distinctes que nous pouvons en déduire la direction d'écoulement de la glace (roches polies et striées). C'est en Afrique du Sud

(1) CARL. FREIHERR. LÖFFELHOLZ VON COLBERG. *Die Drehungen der Erdkruste in geologischen Zeiträumen. Eine neue geologisch-astronomische Hypothese.* Munich 1886; 2^e édition très augmentée 1895.

(2) P. REIBISCH. *Ein Gestaltungsprinzip der Erde*; 27. Jahresbericht d. Ver. Erdkunde zu Dresden 1901, p. 105-124. — Deuxième partie Mitt. Ver. Erdk. Dresden p. 39-53, 1905. III. Die Eiszeiten. Même périodique, 6, p. 58-75, 1907.

(3) H. SIMROTH. *Die Pendulationstheorie.* Leipzig 1907.

(4) KREICHGAUER, *Die Äquatorfrage in der Geologie.* Steyl 1902.

(5) E. JACOBITTI. *Mobilità dell'Assa Terrestre.* Studio Geologico. Torino 1912.

que ces indices ont été les mieux étudiés, tout d'abord. Puis, on les retrouva au Brésil, en Argentine, dans les Iles Falkland, au Togo, au Congo, enfin dans l'Inde péninsulaire, l'ouest, le centre et l'est de l'Australie (1). Même si nous plaçons le Pôle Sud en un point central satisfaisant aussi bien que possible aux exigences de ces diverses régions, soit environ par 50° S ; 45° E, le Brésil, les Indes et l'Est australien porteraient les témoignages de l'inlandsis à une latitude voisine de 10°. Autrement dit la glace aurait à peu près recouvert l'une des moitiés du globe (laquelle aurait donc joui d'un climat polaire). Quant à l'hémisphère restant, ses dépôts permocarbonifères, pourtant en partie bien connus, ne nous ont livré aucune trace certaine de glaciation mais plutôt celles d'une végétation tropicale. Il est à peine besoin de dire qu'une semblable répartition des climats est un non sens. De nombreux auteurs l'ont d'ailleurs fait remarquer déjà; signalons en particulier KOKEN (2) pour qui la seule solution est d'admettre la formation de ces calottes glaciaires à de hautes altitudes. Cette hypothèse doit paraître cependant tout aussi improbable aux climatologues que celle de F. V. KERNER attribuant ces glaciations à des anomalies thermiques dues à des courants marins froids. C'est pourquoi on a fait remarquer plus d'une fois que cette curieuse répartition des dépôts glaciaires permocarbonifères ne rend pas trop invraisemblable l'idée des mouvements horizontaux de l'écorce terrestre. C'est l'avis de A. PENCK notamment. L'hypothèse d'après laquelle ces dépôts se seraient constitués successivement, en raison des déplacements du pôle, ne se vérifie pas non plus car les antipodes des points considérés ne révèlent aucune trace d'un phénomène concomittant. En effet, si nous faisons voyager le Pôle Sud du Brésil à l'Australie par l'Afrique, le Pôle Nord doit se déplacer de la Chine à l'Est de l'Amérique Centrale où l'on n'a pas trouvé de dépôts glaciaires. Au reste, la grande rapidité avec laquelle il aurait dû effectuer un tel voyage est de nature à nous rendre, avec raison, sceptiques à l'égard d'une semblable supposition qui contredit d'autre part ce que nous savons de la position qu'occupaient au Carbonifère et au Permien, l'équateur et les zones désertiques. Plus nous avançons dans la

(1) Voir la carte qu'en donne DACQUÉ dans son ouvrage : *Grundlagen und Methoden der Paläogeographie*. Iéna, 1915.

(2) KOKUN. *Indisches Perm und die permische Eiszeit*. Festband d. N. Jahrb. f. Min. 1907.

connaissance des indices climatiques de ces époques, plus il nous semble évident qu'ils ne peuvent servir de base à aucun système, si nous conservons aux continents leurs emplacements actuels. On peut dire sans exagérer que l'apparente contradiction de ces observations a enrayé les progrès de la paléoclimatologie. Les recherches faites pour établir les positions successivement occupées par les pôles au cours de l'histoire de la terre devaient nécessairement se heurter à cet écueil.

La théorie des translations continentales fournit une solution saisissante à l'énigme des glaciations permocarbonifères. En effet, les terres qu'elle concentre autour de l'Afrique du Sud sont précisément celles qui portent les traces du glacier de telle sorte que la calotte glaciaire australe se réduit aux dimensions de celle qui recouvrait une partie de l'hémisphère nord, au Quaternaire. Dans le cas présent, l'hypothèse de la dérive des continents ne se borne plus à simplifier, elle fait mieux puisqu'elle fournit pour la première fois la possibilité d'une explication.

Etant donné la grande importance de ces questions au point de vue de la justesse de nos théories, nous nous proposons de les confronter, dans les pages qui suivent, avec d'autres indices des climats du Permocarbonifère, indices choisis parmi les plus marquants et nous verrons s'il est possible de situer les zones climatiques d'alors dans le cadre prescrit par l'hypothèse des translations.

Il nous faut supposer dès l'abord que cet inlandsis même ainsi réduit ne s'étendit à aucun moment à la fois dans toutes les contrées qui en conservent la trace mais qu'il y fit des incursions successives par suite des déplacements du pôle. L'âge de la plupart des dépôts marquant son passage n'a d'ailleurs pas encore été précisé assez exactement pour permettre à la géologie d'y reconnaître des différences avec une certitude absolue. Pourtant elle en admet déjà quelques-unes ; L. WAAGEN (1), par exemple, prétend qu'en Afrique et aux Indes les couches à glossoptéris reposent sur les limons à blocaux tandis qu'elles leur sont sous-jacentes en Australie. « Selon toute évidence, la glace a donc envahi l'Inde avant l'Australie. Nous pouvons attribuer à l'Indo-Afrique une glaciation carbonifère, à l'Australie une glaciation permienne. » Selon GERTH (2), les grès à glossoptéris et à gangamoptéris reposeraient

(1) L. WAAGEN. *Unsere Erde*, p. 437. München, Allg. Verl.-Ges., s. d.

(2) GERTH. *Die Fortschritte der geolog. Forschung in Argentinien und einigen Nachbarstaaten während des Weltkrieges*. Geol. Rundsch. 1921, p. 74-87.

sur le glaciaire, en Argentine aussi. D'après cela, il ne serait pas invraisemblable que les traces laissées par l'inlandsis le plus à l'ouest, c'est-à-dire au Brésil de même que celles du Togo et du Congo, datent même du Carbonifère ancien. Du moment qu'on a trouvé du glaciaire dans le Devonien inférieur de l'Afrique Australe (1), le Pôle Sud aurait commencé par cheminer du Cap vers Loanda puis il aurait regagné, à peu près par le même chemin, les parages de son point de départ. Il se serait dirigé ensuite vers la pointe sud de l'Inde (Carbonifère supérieur) pour pénétrer en Australie au Permien. Le Pôle Nord aurait effectué ses déplacements dans le Pacifique où les glaces ne pouvaient laisser de traces appréciables. Nous allons examiner à présent de quelle façon les autres données climatiques se comportent à cet égard. Les plus importantes d'entre elles ont fait l'objet du schéma de la figure 17.

Considérons la flore à glossoptéris tout d'abord.

Le climat sous lequel devaient vivre ces végétaux a été discuté : pour les uns il s'agissait du climat polaire de la toundra pour d'autres de celui de la zone tempérée; mais il est généralement admis que c'était un climat plus froid que celui dont jouissait la flore principale du Carbonifère, flore tropicale dont il sera question plus loin. A mon sens, nous pouvons, sans risque d'erreur, faire un pas de plus en estimant que c'était une flore privée d'arbres et qui devait certainement s'étendre au delà de leur limite septentrionale, limite qui ne correspondait pas nécessairement aux mêmes isothermes qu'aujourd'hui. Cette limite suit actuellement avec une exactitude qui étonne au premier abord (2), celui de 10° du mois le plus chaud; mais cette coïncidence s'explique du fait que les arbres sont soumis avant tout à la température de l'air, celle que l'on mesure en météorologie, tandis que la flore de la toundra, étroitement appliquée au sol bénéficie directement de la chaleur qui en émane lorsque le soleil donne jour et nuit sans interruption. Ainsi, jusque dans l'extrême nord, cette flore possède une période d'épanouissement plus longue que celle des arbres et elle jouit pendant ce temps d'une température de 10° et plus. Au Carbonifère, la limite des arbres dut correspondre comme de nos jours à une température donnée mais il se peut que pour des végétaux si différents

(1) H. CLOOS, *Geolog. Beobacht. in Südafrika*. III. Die vorkarbonischen glazialbildungen des Kaplandes. *Geol. Rundsch.* 6. Heft, 7/8, 1916.

(2) KÖPPEN. *Baumgrenze und Lufttemperatur*. *Petermanns Mitt.* 1919, p. 201-203.

des nôtres cette dernière n'ait pas été celle d'aujourd'hui (1). Cette flore « polaire » des continents austraux a été retrouvée en général dans des couches situées en partie au-dessus, en partie au-dessous des dépôts glaciaires et que l'on peut comparer à l'interglaciaire d'Europe. Mais, comme l'on pouvait s'y attendre, elle s'étend bien

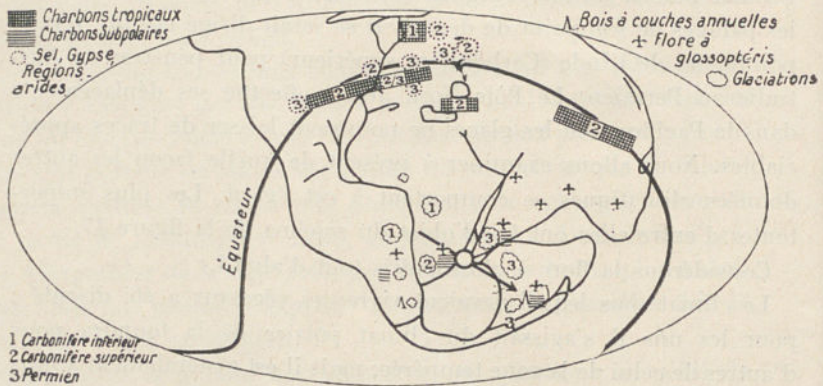


Fig. 47. — Indices climatiques du Permo carbonifère.

au-delà du front de la glaciation car on la trouve encore au Kachemir, dans l'Himalaya de l'Est, de même qu'en Indochine et à Bornéo.

Dans les terrains carbonifères, des essences portant des couches annuelles de croissance et témoignant probablement d'un climat boréal, le « Schneewaldklima de Köppen » n'ont été trouvées, à ma connaissance, qu'à deux endroits : en Australie (Nouvelles-Galles du Sud) par ARBER et aux Iles Falkland par HALLE.

Enfin, les terres de la zone antarctique d'alors renferment des couches houillères reliées étroitement à celles qui portent la flore à glossoptéris et situées le plus souvent juste au-dessus des moraines

(1) Aujourd'hui encore, une espèce de Fougère vit sur le pourtour de l'inlandsis groenlandais; mais les Fougères arborescentes s'arrêtent aux latitudes de 30 à 50° Sud. « Les points les plus voisins du Pôle Sud qu'atteignent encore les Fougères arborescentes sont la Tasmanie et Auckland (Nelle Zélande du Sud). En Amérique, la *Dicksonia sellowiana* et l'*Alsophila procera* s'étendent jusqu'à Sao Paulo (Brésil sud) et Misiones (Argentine du Nord). Dans la Colonie du Cap, l'*Hemitelia capensis* est l'espèce la plus australe ». ROBERT POTONIÉ, *Paläoclimatisches im Lichte der Paläobotanik*. Naturw. Wochenschr. 26 juin 1921, p. 383).

permocarbonifères. On les a trouvées en Argentine (Carbonifère inférieur), dans l'Afrique Australe, au Deccan et en Australie. Il s'agit là, évidemment, d'anciens marais tourbeux subpolaires correspondant exactement à ceux qui existent actuellement en Europe (ou dans la Terre de Feu).

Mais ces charbons ont peu d'importance comparés à la grande ceinture houillère qui s'étend de l'Amérique du Nord à la Chine en traversant l'Eurasie. Les restes des végétaux qu'elle renferme témoignent selon POTONIE (1) d'une flore tropicale. C'étaient des plantes à croissance rapide, à grands appareils végétatifs, sans couches annuelles et proches parentes de celles qui vivent actuellement dans les tropiques ; les fougères arborescentes et grimpantes y étaient nombreuses, enfin, la cauliflorie caractérisait aussi quelques-uns de ces végétaux : les Calamariées, certaines Lépidodendrées et Sigilariées par exemple. Autrefois, il était assez généralement admis que la formation de la tourbe nécessitait de basses températures ; elle ne pouvait donc avoir lieu sous les tropiques, parce que la putréfaction des organismes y est beaucoup plus active qu'ailleurs. Aussi longtemps que la présence de marais tourbeux n'avait pas été constatée dans la zone des pluies équatoriales, cette idée parut très vraisemblable ; mais il fallut y renoncer lorsqu'on découvrit un de ces marais dans la partie orientale de Sumatra, sur la rive nord du fleuve Kampar. Là aussi, l'eau est capable d'empêcher l'oxygène atmosphérique de favoriser la putréfaction et la tourbe se forme. Depuis lors, on a trouvé des marais semblables à Ceylan et dans l'Afrique équatoriale. On peut donc estimer clos le débat très vif que suscita la question de la provenance de nos houilles. Comme le fait voir la figure 17, *la ceinture de terrains houillers se place exactement sur le grand cercle situé à 90° du centre de la glaciation australe*. Nous donnons ici, à titre de comparaison, la carte de KREICHGAUER (fig. 18) pour montrer que seule l'hypothèse des translations continentales nous permet cette conclusion. De même qu'au début du Tertiaire, il y eut au Carbonifère une zone de plissements (le « *Karbonring* » de KREICHGAUER) occupant l'équateur et qui dut offrir précisément des conditions favorables à la formation de marais tourbeux. Mais on remarquera

(1) H. POTONIE, *Die Tropensumpfstachmoornatur der Moore der produktiven Karbons* Jahrb. d. Kgl. Preuss. Geol. Landesanstalt 30. Teil I, H. 3. Berlin 1909. — H. STREMMER, *Über tropische Moore*. « *Gaea* » 45, n° 11, 1909.

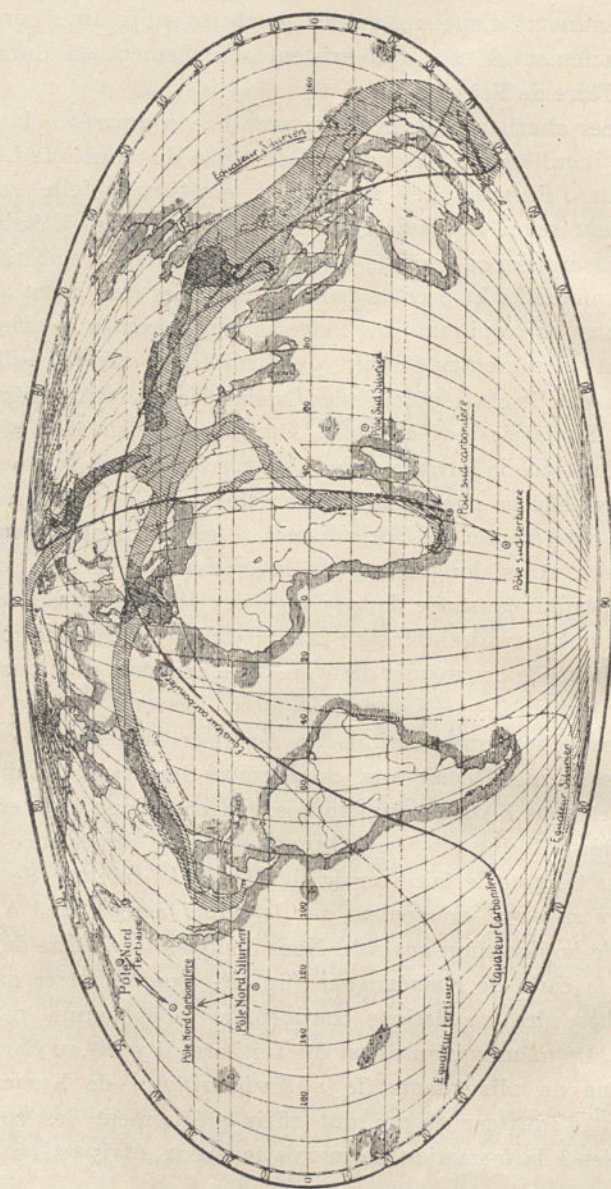


Fig. 18. — Zones de plissements carbonifères (en hachures) et positions de l'équateur, d'après KASCHKAUER.

sur la carte de KREICHGAUER qu'en Amérique du Nord et en Australie, cette ceinture s'écarte beaucoup de « l'équateur carbonifère » ; elle ne touche pas l'Amérique du Sud que cet équateur traverse cependant et de ce fait, visiblement à distance des dépôts témoignant d'un climat équatorial. De la comparaison de cette carte avec celle que nous avons esquissée en nous fondant sur la théorie des translations (fig. 17), il ressort nettement que cette dernière seule se prête à une figuration irrécusable de la zone des pluies équatoriales.

La répartition stratigraphique de ces grands dépôts houillers correspond à celle des dépôts glaciaires austraux, qui nous avaient permis de tracer l'allure des déplacements du Pôle Sud. Le carbonifère productif d'origine tropicale s'observe jusqu'au Spitzberg. Il constitue même selon ANDERSSON les deux tiers des charbons de cet Archipel. Or il date du Carbonifère inférieur (Kulm). Il se trouve d'après notre carte à 90° au nord des moraines du Congo et du Brésil qui datent aussi de cette époque. Les fossiles végétaux y sont tropicaux comme au Groenland Nord-Est par 81° de latitude et aux Iles Melville. Il s'agit donc, sans doute, de la zone des pluies équatoriales du Carbonifère inférieur. Les houilles de la ceinture carbonifère principale sont plus récentes pour la plupart : en Chine elles datent en partie du Carbonifère inférieur (Chan-toung, Tsétchouan du Sud), en partie du Carbonifère supérieur (versant nord du Nanchan), du Permien (Chansi, Tchili, Mandchourie) ou même du Trias (Hunan) (1). En Europe, la limite méridionale des charbons du Carbonifère inférieur passe par l'Ecosse, Chemnitz et Moscou. Les charbons du Carbonifère moyen s'arrêtent en Bretagne et en Haute-Silésie, tandis que ceux du Carbonifère supérieur atteignent l'Auvergne orientale, Baden, Brenner et Laibach. En France, en Thuringe, en Saxe et en Bohême, le Permien même renferme du charbon mais uniquement dans ses assises les plus basses, il est vrai. La masse principale des charbons d'Europe est fournie par le Carbonifère récent ; c'est aussi le cas pour l'Amérique du Nord où ces charbons passent également dans des couches de plus en plus élevées à mesure que l'on approche du Midi. (Ils occupent le Carbonifère ancien du Nouveau Brunswick à la Virginie, le Carbonifère récent de l'Ohio à l'Alabama). Les indices d'un climat désér-

(1) F. FRECH, *Die Kohlenvorräte der Welt*. Finanz-und Volkswirtschaftl. Zeitfragen, 43. Hft. Stuttgart 1917.

tique commencent à apparaître en Europe dans le Permien moyen déjà. Nous constatons donc que la zone houillère s'est déplacée du Spitzberg à l'Europe moyenne durant le Carbonifère et le début du Permien. Les divisions supérieures de cette dernière période n'ont révélé aucune trace de houille.

La zone sèche qui s'étendait plus au nord et qu'attestent les dépôts de sel et de gypse (1) opéra un déplacement semblable à celui que la répartition des couches houillères nous a permis d'attribuer à la zone des pluies équatoriales. Les faits que nous venons d'exposer en sont confirmés de la manière la plus heureuse. Alors que le charbon manque précisément au Permien, la dernière époque que nous considérons ici, les dépôts de sel font défaut à la plus ancienne, c'est-à-dire au Carbonifère inférieur. Ce n'est qu'à partir du Carbonifère inférieur qu'ils apparaissent, accompagnés de gypse. Au nord de la zone houillère, nous les trouvons dans l'Oural oriental et à Terre-Neuve déjà, où ils reposent sur les assises à charbons c'est-à-dire qu'ils leur sont postérieurs dans le temps. Selon SEMPER, le Spitzberg aurait aussi été soumis à un climat aride. La zone sèche a succédé immédiatement à celle qui a produit les houilles. Ce n'est qu'au Permien supérieur plus spécialement alors que les charbons ont cessé de se former, que se sont accumulées les plus grandes quantités de sel et de gypse, en Russie orientale, dans l'Allemagne du Nord, les Alpes méridionales et les Etats-Unis. Ainsi, du Carbonifère récent (Spitzberg), au Permien supérieur (Alpes orientales), la formation du sel subit un déplacement nord-sud de même ordre que celui des houilles. C'est pourquoi elle est l'indice certain de l'ancienne zone désertique de l'hémisphère nord.

Nous nous sommes bornés jusqu'ici à l'examen des données climatologiques les plus importantes, lesquelles, il faut le reconnaître, s'enchaînent logiquement, si l'on admet la dérive des continents. Cela nous mènerait trop loin d'énumérer en détail les données secondaires. Autant qu'on en peut juger, elles se conforment aussi, sans exceptions, au plan général que nous avons donné plus haut. Contentons-nous de quelques exemples seulement : selon HANDLIRSCH, la taille moyenne des ailes des Insectes atteignait en Europe, 51 mm. au Carbonifère inférieur et moyen pour s'abaisser à 20 et

(1) J. O. FREIHERR VON BUSCHMAN donne des renseignements utiles, au sujet des dépôts de sel, si précieux à la paléoclimatologie : « *Das Salz* » 2^e Bd. Leipzig 1906. La chronologie géologique y est parfois bien lacunaire malheureusement.

même 17 mm. seulement au Carbonifère supérieur et au Permien. Ce fait concorde avec l'idée qu'au Carbonifère inférieur, l'Europe était sous l'équateur et qu'au Permien déjà, elle entra dans la zone sèche. Des récifs coralliens datant du Carbonifère inférieur ont été retrouvés non seulement en Cantabrie et dans les Alpes Carniques mais aussi en Belgique, en Angleterre et en Irlande. En Amérique du Nord, ils datent du Carbonifère moyen et supérieur (C. moyen : Indiana, Thinois, Alabama ; C. supérieur : du Kansas au Texas) (1).

En revanche, le Permien de Timor ne renferme que des coraux isolés, mais aucun récif attestant une mer chaude.

Selon GERTH, le Permien de l'Uruguay et du Brésil porte les indices d'une augmentation rapide de la température ; à peine le mésosaure y a-t-il fait son apparition que l'on voit, dans les argiles schisteuses, des intercalations de calcaire et de dolomies qui se forment toujours en eau chaude. Les « Red Beds » permocarbonifères de l'Amérique du Nord occidentale offrent à nos vues une confirmation excellente puisqu'ils se sont formés, de toute évidence, dans les régions désertiques de la zone sèche. Nous avons supposé qu'en Afrique, de vastes territoires passèrent au cours du Carbonifère et du Permien d'un climat tempéré pluvieux à un climat aride et nous nous trouvons d'accord avec PASSARGE (2), qui, pour expliquer les particularités de leur topographie actuelle, admet qu'ils furent soumis à une longue période de sécheresse durant les temps mésozoïques.

A titre de comparaison, jetons encore un coup d'œil sur la répartition des climats du Dévonien. Nous sommes obligés, il est vrai, de tenir compte du fait que le cadre topographique actuel n'offre pas une image exacte de la position relative des terres à cette époque puisque les chaînes carbonifères l'ont modifiée. Nous avons déjà dit que des traces de glaciation ont été mises au jour dans le Dévonien inférieur de l'Afrique australe et que, dans l'hémisphère nord la présence d'une zone sèche est attestée par l'« Old Red » (Amérique du Nord, Groenland, Spitzberg et Europe septentrionale, voir *Arguments géologiques*). En Amérique du Nord et dans les Provinces Baltiques, ce grès renferme du sel et du gypse qui en attestent avec certitude la provenance désertique. L'équateur du Dévonien ancien occupait donc une position analogue à celle qu'il eut au Carbonifère

(1) TH. ARLDT, *Paläogeographie* 2. Leipzig 1921.

(2) PASSARGE, *Die Inselberglandschaft im tropischen Afrika*, Naturwiss. Wochenschr. N. F., 3, p. 657, 1904.

supérieur. Les charbons dévoniens de la région de Neukirchen, dans l'Eifel, appartiennent ainsi à la zone des pluies équatoriales. Les récifs de corail qu'on a trouvés dans le Dévonien de l'Angleterre, de la Belgique, du Sud de la France, du Nord-Ouest de l'Allemagne, de la Silésie et des Alpes se conforment à cet ensemble de faits. La plus grande partie de l'Afrique (grès nubien inférieur) et du Brésil était comprise dans la zone sèche australe. Nous ne pouvons pas entrer ici dans plus de détails, ces quelques exemples suffisent à nous prouver que les pôles avaient au dévonien une position assez rapprochée de celles qu'ils occupèrent au Carbonifère et au Permien.

L'ensemble des données que nous possédons sur le climat des temps permocarbonifères offre des zones climatiques d'alors, un tableau si convaincant que je ne vois pas comment on pourrait se passer de l'idée du déplacement des pôles. Aussi ces témoignages deviennent-ils des preuves solides en faveur de la théorie des translations.

Dans ce qui précède, nous avons pris le Carbonifère comme exemple parce qu'il montre de la façon la plus nette la simplification que l'hypothèse de la dérive des continents peut apporter à ces problèmes. Il est clair que cette hypothèse joue un rôle d'autant plus important que nous l'appliquons à une période plus reculée de l'histoire du globe car les continents s'y montrent de plus en plus éloignés de leur position actuelle. D'ailleurs, jusqu'ici, le Carbonifère est l'époque la plus ancienne à laquelle nous ayons appliqué la théorie des translations. Les critères que nous fournirait l'étude des déplacements du pôle au cours des époques subséquentes diminuent progressivement d'importance. Si nous voulions explorer à fond cette question, il nous faudrait établir la position successive des zones climatiques pour les temps secondaires, tertiaires et quaternaires avec autant de soin que nous l'avons fait pour le Permo-carbonifère et rechercher dans quelle mesure la théorie des translations peut y apporter des corrections utiles. Ce travail n'a pas encore été entrepris avec toute l'attention qu'il nécessite. J'espère pourtant le mener à bien dans un temps pas trop éloigné avec la collaboration de M. W. KÖPPEN et en publier les résultats dans un ouvrage spécial. Afin d'en donner une idée générale, nous nous bornerons à faire ici, provisoirement, un exposé sommaire des indices climatiques les plus frappants. Il est à prévoir que l'étude plus approfondie que nous projetons apportera

quelques modifications à ces chiffres ; mais il n'y a pas lieu d'en supposer le changement radical. Voici les positions occupées par le Pôle Nord et le Pôle Sud à ces diverses époques. Elles sont rapportées au système actuel de coordonnées terrestres supposé lié rigidement à l'Afrique.

	Pôle Nord		Pôle Sud		Allemagne
Actuel	90° N	—	90 S	—	50° N
Quaternaire.....	70 N	10° W	70 S	170° E	69 N
Pliocène.....	90 N	—	90 S	—	54 N
Miocène.....	67 N	172 W	67 S	8 E	37 N
Oligocène.....	58 N env.	180 W	58 S env.	0	29 N
Eocène.....	45 N	» 180 W	45 S	» 0	15 N
Paléocène.....	50 N	» 180 W	50 S	» 0	20 N
Crétacé.....	48 N	140 W	48 S	40 E	19 N
Jurassique.....	69 N	170 W	69 S	10 E	36 N
Trias... } Moyenne	50 N	130 W	50 S	50 E	26 N
Permien }					
Carbonifère.....	25 N	155 W	25 S	25 E	3 N
Dévonien.....	30 N	140 W	30 S	40 E	15 N

Les chiffres de la dernière colonne donnent les différentes latitudes occupées, au cours des temps, par un point pris en Allemagne sur le 50° de latitude. Leur allure est rendue plus sensible par le graphique de la figure 19.

Nous dirons quelques mots encore de la glaciation nordique mais en nous limitant aux critères qu'elle peut offrir à la théorie des translations. Comme le montre la figure 20, l'Europe et l'Amérique se touchaient encore au début du Quaternaire. Leur disjonction se serait effectuée environ à l'époque de la glaciation principale, peut-être même quelque temps auparavant. En tous les cas, la distance qui séparait alors ces socles continentaux n'était pas encore notable; elle dut s'être nettement accrue, en revanche, durant la dernière phase glaciaire. C'est ce que l'on a pu déduire notamment du fait que les lignes de rivages de la Norvège occidentale s'inclinent vers l'ouest. Nous avons montré déjà que, selon notre hypothèse, les moraines frontales des glaces européennes et américaines se prolongeaient exactement l'une dans l'autre ; mais, ce qui nous intéresse ici avant tout, c'est la notable diminution de surface que la théorie des translations fait subir à la calotte glaciaire. Quelles que soient

les idées que l'on émette sur la question épineuse des causes de la glaciation, il faudra reconnaître que là encore l'hypothèse de la dérive des continents ne rend pas la compréhension des phénomènes plus difficile, mais plus simple. Pour terminer, mentionnons encore un fait intéressant concernant les glaciations des temps quaternaires : en Tasmanie, la ligne des neiges passait à une altitude de 500 à 600 mètres plus basse qu'en Nouvelle-Zélande. Ce fait

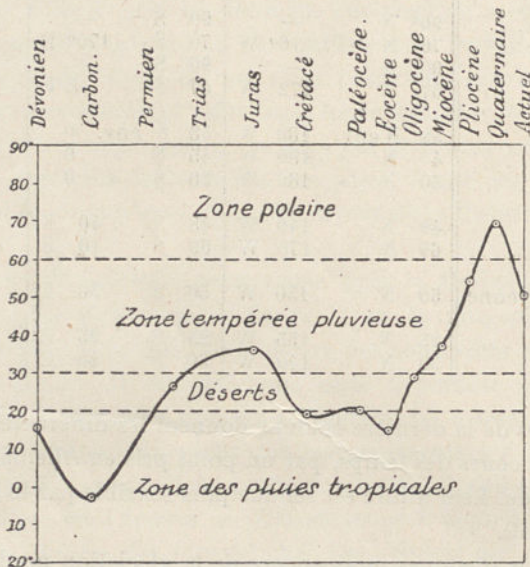


Fig. 19. — Latitudes occupées par l'Europe moyenne au cours de l'histoire du globe.

est difficile à comprendre si nous estimons que ces terres étaient situées, alors comme aujourd'hui, à peu près à la même latitude. La théorie des translations lève cette difficulté, puisqu'elle admet que la Tasmanie se trouvait à cette époque notablement plus au sud que la Nouvelle Zélande.

CHAPITRE VII

Arguments géodésiques.

La théorie des translations continentales a sur toutes celles qui ont une portée aussi vaste, l'avantage de pouvoir se prouver par des mesures astronomiques exactes. Du moment que les continents ont dérivé au cours des longues périodes géologiques, nous sommes bien en droit d'admettre que leurs déplacements continuent à l'heure actuelle. Il s'agit seulement de savoir si ces mouvements sont assez rapides pour que des mesures astronomiques, réitérées durant un laps de temps relativement court, suffisent à nous les rendre sensibles. Pour juger de cette question, il nous faut jeter un coup d'œil sur la durée absolue des temps géologiques. On sait que nous n'en possédons que des estimations imprécises. Mais cette imprécision ne va pas jusqu'à nous empêcher de donner une réponse de quelque valeur au problème posé. Le temps qui nous sépare de la dernière glaciation a été évalué à 50.000 ans par PENCCK qui étudia spécialement la glaciation alpine. Steinmann lui attribue un minimum de 20.000 ans et un maximum de 50.000 ; HEM, d'après ses dernières recherches faites en Suisse et avec lui, les géologues américains du glaciaire, le réduisent à 10.000 ans. MILANKOVITCH arrive, par le calcul, à placer le point le plus bas du climat de la dernière glaciation à 25.000 ans et son optimum à 10.000 ans de notre époque — chiffre confirmé par les mesures des géologues suédois. Après avoir dénombré les assises des limons morainiques, DE GEER estime que 12.000 ans nous séparent du temps où le front du glacier scandinave en retraite passait par Schonen et que ce même glacier occupait encore le Mecklembourg, il y a 14.000 ans. La concordance de ces chiffres nous est ici tout à fait suffisante. L'épaisseur des sédiments peut nous donner une idée du temps qu'ils ont mis à s'accumuler. On s'est servi de ce critère pour estimer la durée des périodes antérieures à celles dont nous venons de parler : on a obtenu de cette façon pour le Tertiaire un

nombre d'années compris entre 1 et 10 millions (1). Mais aujourd'hui on accorde certainement la plus grande faveur aux estimations fondées sur les propriétés physiques de certains minéraux radioactifs dont l'âge peut être évalué à la proportion d'hélium qu'ils renferment. Les valeurs obtenues par cette méthode sont d'ailleurs du même ordre de grandeur que les précédentes. Les

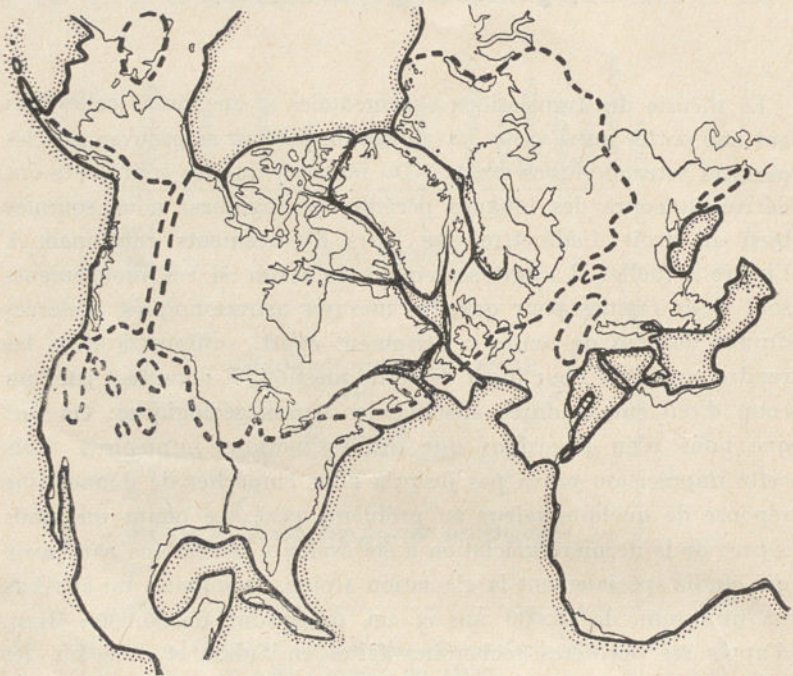


Fig. 20. — Les socles continentaux au temps de la grande glaciation.

mesures ont été faites sur des cristaux de zircon dans lesquels l'hélium provient de la dissociation de l'oxyde d'uranium. STRUTT, qui perfectionna cette méthode, obtint pour le temps qui nous sépare de l'Oligocène 8,4 millions d'années, pour l'Eocène 31, le Carbonifère 150 et l'Archéen 710. KÖNIGSBERGER (2) vérifia plus tard les mesures de STRUTT. Il fut amené pour certaines roches à des résultats un peu différents.

(1) Voir DACQUÉ *Grundlagen und Methoden der Paläogeographie*, p. 273 léna 1915 et RUDZKI, *L'âge de la terre*, Scientia 13, n° xxviii, 2, p. 161-173, 1913.

(2) KÖNIGSBERGER, *Berechnungen des Erdalters auf physikalischer Grundlage*. Geol Rundsch, 1, p. 241, 1910.

En tenant compte de ses données et de celles que l'on avait obtenues avant lui, voici les chiffres auxquels on arrive approximativement :

Depuis le début du Primaire il s'est écoulé	500 millions d'années.
» » Secondaire	» » 50 » »
» » Tertiaire	» » 15 » »
» » l'Eocène	» » 10 » »
» » l'Oligocène	» » 8 » »
» » Miocène	» » 6 » »
» » Pliocène	» » 2-4 » »
» » Quaternaire	» » 1/2-1 » »
Depuis la fin de la glaciation	» » 10-50 mille ans.

Connaissant les distances parcourues par les continents, nous pourrions calculer à l'aide de ces chiffres, la valeur annuelle de leurs déplacements. Mais cette opération ne nous fournira malheureusement qu'un résultat très peu sûr, d'autant moins sûr que dans la plupart des cas, le moment de la séparation des socles ne peut être encore précisé suffisamment ; il est même difficile de les situer dans la chronologie géologique relative. Il est à prévoir que ces chiffres devront être, en bonne partie, considérablement modifiés. En attendant, voici les valeurs que nous avons obtenues en nous fondant sur celles du précédent tableau :

	Parcours effectué Km	Temps écoulé depuis la rupture Millions d'années	Déplacement annuel m
		environ	
Ile Sabine — Ile des Ours	1070	0,05—0,1	21—11
Islande — Norvège	920	0,05—0,1	18— 9
Cap Farvel — Ecosse	1780	0,05—0,1	36—18
Cap Farvel — Labrador	790	0,05—0,1	15— 8
Terre-Neuve — Irlande	2410	2—4	1,2—0,6
Cap St. Roque — Cameroun	4880	20	0,2
Buenos-Airés — Ville du Cap	6520	25	0,2
Terre de Feu — Iles Sandwich du Sud	2' 90	2	1
Madagascar — Afrique	890	0,1	9
Inde péninsulaire — Afrique australe	5550	15	0,4
Tasmanie — Terre de Wilkes	2890	8	0,4

C'est donc dans la distance séparant le Groenland de l'Europe qu'il faut nous attendre à constater le plus vite un changement. Le Groenland dérivant vers l'ouest, les mesures devront accuser une différence de plus en plus grande de longitude. En fait cette

augmentation a déjà été signalée. Nous trouvons dans les Comptes Rendus des expéditions danoises au Groenland (1) (Tome VI, partie principale : *Survey of North east Greenland* p. 240) un chapitre de 16 pages intitulé : *The drift of North Greenland in a westerly direction* où J.-P. KOCH confronte les mesures de longitude effectuées par SABINE en 1823, BÖRGEN et COPELAND en 1870 et par lui-même en 1907 (2). Les différences qu'il constate répondent à une augmentation de la distance qui nous sépare du Nord-Est du Groenland. Cette augmentation qui attesterait une dérive de plus en plus rapide, peut s'exprimer par les chiffres suivants :

de 1823 à 1870	420 m. soit 9 m. par an
de 1870 à 1907	1190 m. soit 32 m. par an

Les mesures de longitude n'ont pas été prises exactement au même endroit : SABINE fit ses observations sur la côte sud de l'île qui porte son nom. Au sujet du point précis qu'il avait choisi pour les faire, il règne encore quelque incertitude malheureusement. Mais une nouvelle inspection des lieux suffira probablement à la dissiper. Les observations de Børgen et Copeland se firent sur la même côte, mais à quelques centaines de mètres plus à l'est ; celles de Koch, au contraire, beaucoup plus au nord : au port danois du Germanialand ; mais les points d'où elles ont été effectuées sont reliés à l'Île Sabine par un réseau trigonométrique. Koch rechercha avec soin l'imprécision qui pouvait résulter de ces transferts et il constata qu'elle était négligeable en comparaison de celle des mesures de longitude elles-mêmes. Comme dans les trois cas dont nous nous occupons, ces déterminations furent basées sur la position de la lune, leur précision n'atteint pas celle que l'on aurait obtenue au moyen de la T. S. F. par exemple. L'« erreur moyenne » calculée d'après la concordance des nombres de chaque série d'observations, donne une idée de ce degré de précision.

Voici à quelles valeurs elle s'élève :

Pour 1823 environ	124 m.
» 1870	» 124 »
» 1907	» 256 »

(1) *Danmark-Ekspeditionen til Grønlands Nordøstkyst 1906-1908 under Ledelsen af L. MYLIS-ERICHSEN* 6 (Meddelelser om Grønland 46). København 1917.

(2) Voir aussi l'article publié par l'Auteur dans les *Astronomische Nachrichten* 208, n° 4986, mai 1919.

Si nous comparons ces valeurs à celles qui expriment le changement de longitude, nous remarquerons que ces dernières sont de beaucoup les plus élevées. Koch en conclut « que les sources d'erreur, prises isolément ou dans leur ensemble, ne suffisent pas à expliquer l'écart d'environ 1190 mètres qui existe entre les déterminations de la « Danmark Ekspedition » et celles de la « Germania Expedition », portant sur la longitude de Haystack. La seule source d'erreur entrant ici en ligne de compte réside dans les mesures astronomiques de longitude. Mais, si nous voulons attribuer cette différence à une erreur sur la position du lieu d'observation, nous serions obligés de supposer à l'erreur effective des déterminations de longitude une valeur 4 à 5 fois plus élevée que celle de l'erreur moyenne, ce qui est parfaitement absurde ». A cela BURMEISTER (1) a objecté, il est vrai, que l'erreur moyenne ne peut jouer le rôle qu'on lui attribue ici que si elle se déduit d'un nombre considérable d'observations. Il estime que dans le cas présent, la valeur effective de l'erreur peut tout de même équivaloir à celle de l'écart constaté. Aussi la preuve de Koch lui paraît-elle insuffisante. Bien qu'au point de vue théorique, cette critique soit certainement juste et qu'elle nous interdise d'acquiescer aux résultats indiqués ci-dessus avant d'avoir entrepris, au moyen de la T. S. F., des déterminations plus précises, je persiste à croire qu'elle va trop loin. Si, pour être probant, l'écart attesté par les mesures de longitude demande à être confirmé par des observations plus exactes, il faut néanmoins laisser à Koch le mérite de l'avoir signalé le premier.

D'après le tableau de la page 91 il faut nous attendre à ce que des mesures faites au Cap Farvel manifestent une translation plus grande encore. La dérive de l'Islande, également, pourrait être démontrée et cela même dans l'espace de 5 à 10 ans.

L'accroissement de la différence de longitude entre l'Europe et l'Amérique sera plus difficile à percevoir : notre tableau indique pour l'Amérique une avance de 1 m. par année ; mais ce chiffre ne représente que la vitesse moyenne de la translation, vitesse calculée à partir du moment où Terre-Neuve se sépara de l'Irlande. Actuellement, l'Amérique du Nord semble se déplacer plutôt vers le sud. Son changement de direction daterait de l'époque où elle se détacha du Groenland, à en juger la position relative des côtes

(1) BURMEISTER, *Die Verschiebung Grönlands nach den astronomischen Längenbestimmungen*, Peterm. Mitt. 1921, p. 225-227.

labradoriennes et groenlandaises, jadis en contact. En outre, le sens du décollement de la faille produite par le tremblement de terre de San Francisco — dont nous parlerons en détail plus loin — de même que le commencement de refoulement qu'a subi la presqu'île californienne sont autant d'indices confirmant cette assertion. Dans ces circonstances, il est difficile de dire de combien peut augmenter actuellement la distance entre l'Europe et l'Amérique. Ce doit être en tous cas de moins d'un mètre par an. En confrontant les mesures effectuées en 1866, 1870 et 1872 sur les câbles transatlantiques, j'avais conclu à une augmentation annuelle de plusieurs mètres. Mais selon GALLE (1), ces mesures seraient sujettes à caution. Peu de temps avant la guerre, une nouvelle détermination de longitudes avait été entreprise, en considération de notre hypothèse; les résultats étaient contrôlés par T. S. F. Mais ces recherches durent cesser prématurément par suite de la rupture des communications, aussi ne purent-elles atteindre toute la précision désirable; le changement qu'elles paraissent attester toutefois, ne suffit pas encore à prouver la dérive avec certitude. Ainsi, pour la distance Cambridge-Greenwich (2), on trouva une différence de longitude de :

4 h.	44 m.	31,016 s.	en 1872
4	44	31,032	1892
4	44	31,030	1914

Nous n'avons pas ajouté à cette liste la valeur de 4 h. 44 m. 30,89 s. tirée des déterminations faites en 1866, parce que ces dernières ne présentent pas le degré de précision voulu. Il est donc à espérer que ce calcul sera repris et mené à bien un jour ou l'autre, mais il se peut bien que la dérive attestée soit encore de trop petite amplitude pour être reconnue comme telle d'ores et déjà.

En revanche, il nous sera peut-être donné d'établir par la détermination des latitudes, le déplacement de l'Amérique du Nord par rapport au Groenland. Peut-être aussi que des mesures répétées nous permettront de constater avant qu'il soit longtemps la dérive de Madagascar.

(1) GALLE. *Entfernen sich Europa und Nordamerika von einander?* Deutsche Revue, février 1916.

(2) Voir le Rapport annuel de l'institut géodésique prussien publié dans la *Vierteljahrsschrift d. Astronom. Ges.* 51, p. 139, ou aussi l'*Astronomical Journal*, n° 673-674.

Signalons enfin les variations de la latitude géographique constatées par les observatoires d'Europe et d'Amérique. A. HALL (1) considérait comme certaines les valeurs suivantes indiquant une diminution de latitude. Washington, $0,47''$ en 18 ans; Paris $1,3''$, en 28 ans; Milan, $1,51''$ en 60 ans; Rome $0,17''$ en 56 ans; Naples, $1,21''$ en 51 ans; Königsberg (Prusse), $0,15''$ en 23 ans; Greenwich, $0,51''$ en 18 ans. Une diminution séculaire de la latitude a été constatée aussi à Pulkowa, d'après KOSTINSKY et SOKOLOW. Mais comme l'on découvrit que des erreurs systématiques de cet ordre de grandeur peuvent être dues à un phénomène particulier de réfraction dans la coupole, tous les écarts de mesures furent dans la suite mis à son compte. Toutefois, les avis se font de plus en plus nombreux, suivant lesquels les mesures internationales aussi nous indiqueraient réellement un changement de latitude, il s'agirait maintenant, il est vrai, d'une augmentation (2).

(1) Voir GÜNTHER, *Lehrb. d. Geophysik* 1, 278 Stuttgart 1897.

(2) W. D. LAMBERT, *The Latitude of Ukiak and the Motion of the Pole*. Journal of the Washington Ac. of. Sc. 12, n° 2, 19 janvier 1922.

III. ÉCLAIRCISSEMENTS ET CONCLUSIONS

CHAPITRE VIII

La viscosité du globe

Dans les chapitres précédents, nous avons réuni les principaux arguments sur lesquels s'appuie la théorie des translations. Nous voulons en supposer d'emblée le bien fondé et, forts de ce postulat, aborder une série de questions qui tiennent de si près à l'idée de la dérive des continents qu'il nous paraît désirable de les exposer ici. D'anciens problèmes y apparaîtront sous un jour nouveau et l'on trouvera dans certains faits présentés la confirmation de notre hypothèse, bien qu'ils n'offrent pas des arguments aussi forts que ceux que nous venons d'avancer.

Les géophysiciens actuels discutent beaucoup la question de savoir si et dans quelle mesure la terre doit être envisagée comme un corps visqueux ou comme un corps rigide. Nous nous proposons de passer en revue les fondements de l'une et de l'autre de ces conceptions en prenant tout d'abord les phénomènes témoignant en faveur de la viscosité. Ce sont : l'isostasie, les translations continentales, le déplacement des pôles et l'aplatissement du globe.

Il est reconnu que l'isostasie ou équilibre hydrostatique de l'écorce terrestre est réalisée partout dans ses grands traits. Il est de même, indubitable que cet équilibre tend à être rétabli par des mouvements verticaux du sol, lorsqu'il a été rompu dans une région de quelque étendue. Nous avons déjà traité ce sujet au chapitre II ; nous avons vu, par exemple que la Scandinavie et la Laurentia ont été le siège de semblables mouvements. Ces terres ont ployé, au Quaternaire, de 250 à 800 m. sous la charge d'un inlandsis, pour remonter d'autant, une fois la glace disparue. RUDZKI (1) a fait voir qu'il ne s'agit pas là

(1) RUDZKI, *Physik der Erde*, p. 229, Leipzig 1911.

de simples déformations dues à l'élasticité de l'écorce. En effet, d'après ses calculs, basés sur la théorie hydrostatique d'Airy, la glace devait avoir en Scandinavie l'épaisseur très plausible de 933 m. pour provoquer la dénivellation de 280 m. admise (en Amérique 1667 m. pour 500 m.) Tandis que si l'on suppose un phénomène d'élasticité, il faut donner à la calotte glaciaire l'épaisseur tout à fait invraisemblable de 6 à 7.000 m. Le retard de la remontée du sol montre aussi qu'il s'agit de mouvements de fluides. La Scandinavie s'élève encore actuellement à raison de 1 m. par siècle, bien qu'elle ait été libérée de son inlandsis depuis 10.000 ans déjà. W. KÖPPEN a montré récemment que tout autour de la région s'affaissant sous le poids des glaces, le sol subit, dans une zone déterminée, de légers mouvements verticaux en sens inverse. Il explique ce phénomène en supposant que la masse en train d'enfoncer fait diffuser sous les régions qui l'entourent, une certaine quantité de sima (1). Ces considérations partent naturellement de l'idée que le globe est visqueux.

Mais les mouvements verticaux maintenant l'isostasie ne sont pas seuls à impliquer la viscosité du globe : les mouvements horizontaux ne se conçoivent aussi qu'à cette condition. Nous n'avons pas à nous étendre davantage sur ce point qui nous paraît avoir été suffisamment développé au cours des chapitres précédents..

Le troisième phénomène entrant ici en ligne de compte est le déplacement des pôles de rotation. Nous avons essayé d'établir les positions que les pôles durent occuper au Carbonifère (chapitre 6), et nous avons constaté qu'elles durent être très éloignées de celles qu'ils occupent aujourd'hui. Nous ne savons pas, il est vrai, s'ils se déplacèrent aussi par rapport à l'intérieur de la terre ou si l'écorce seule a voyagé, comme le prétendent certains auteurs. Il est probable que ces phénomènes se produisirent tous deux. Quoi qu'il en soit, il nous faut admettre que le globe se comporte sinon tout entier du moins en partie comme un corps visqueux. S'il s'agit d'une rotation propre à son écorce, cela se comprend aisément. Dans le cas d'un déplacement de l'axe de rotation, une telle supposition nous est tout aussi nécessaire, bien que cela paraisse moins évident. LAPLACE, déjà, a prouvé que l'axe de rotation ne peut changer d'orientation dans un globe rigide. Si telle est

(1) W. KÖPPEN, *Das System in den Klimaverwechslungen und Bodenbewegungen des Quartärs im Ostseegebiet*. Zeitschr. f. Glaziologie 1922.

la nature de notre planète, il est évident qu'en raison de son renflement équatorial, son axe de plus grande inertie doit occuper une position tout particulièrement fixe, position que les plus grandes translations continentales ou que d'autres facteurs d'ordre géologique ne peuvent modifier d'une manière appréciable. Son axe de rotation doit également conserver sa position, du moins dans les limites des perturbations d'EULER. Si, au contraire, la terre est un corps visqueux, les choses changent. LORD KELVIN, partisan de cette hypothèse, dit entre autres : « Il nous est permis non seulement de supposer mais même d'affirmer comme des plus vraisemblables, que l'axe de plus grande inertie et l'axe de rotation, toujours très rapprochés l'un de l'autre, ont occupé, aux temps anciens, une position géographique fort différente de celle qu'ils ont de nos jours. Ils peuvent s'être déplacés ensemble de 10, 20, 30, 40° ou même davantage, sans que cette migration se soit jamais fait remarquer dans les mers ou les terres par un bouleversement subit (1). » RUDZKI s'exprime dans le même sens : « Le jour où les paléontologues en arriveraient à la conviction qu'à une époque géologique donnée, la répartition des zones climatiques assignent à l'axe des pôles une position toute différente de celle qu'il occupe actuellement, les géophysiciens n'auraient rien d'autre à faire qu'à reconnaître ce postulat » (2). La question des migrations polaires a été tout spécialement étudiée par SCHIAPARELLI (3). Il envisage les trois cas possibles d'un globe entièrement rigide, entièrement fluide, enfin d'un globe ne s'adaptant qu'avec retard à chaque déplacement du pôle (c'est-à-dire d'un globe visqueux). Dans le premier cas, il obtient le résultat de LAPLACE : immobilité de l'axe ; dans le second, les pôles sont au contraire très mobiles car la terre peut se déformer au gré des déplacements de son axe de rotation et rien ne stabilise son axe d'inertie. Si ce dernier cas était réalisé, nous assisterions à des migrations polaires extraordinairement rapides, telles que l'histoire du globe n'en révèle pas. Enfin selon la troisième hypothèse, la terre se comporterait comme un corps rigide, aussi longtemps que les forces présidant aux déplacements

(1) Citation tirée de l'ouvrage de GRABAU : *Principles of Stratigraphy*, p. 897 898, New-York, 1913.

(2) RUDZKI, o. c. p. 209.

(3) SCHIAPARELLI. *De la rotation de la terre sous l'influence des actions géologiques*. (Mémoire présenté à l'observatoire de Poulkova à l'occasion de sa fête semi-séculaire) 32 p. St. Pétersbourg 1889.

des pôles ne dépassent pas une certaine intensité. A cette condition, seules les perturbations d'EULER se manifestent, ainsi qu'on l'observe aujourd'hui. Mais sitôt cette limite franchie, (autrement dit dès que le rayon de la courbe de perturbation dépasse la limite critique) le pôle passe outre, en quelque sorte, et il peut effectuer, lentement il est vrai, des déplacements de longue portée. Or, comme des migrations de ce genre peuvent se démontrer d'une manière tout à fait évidente, il faut conclure que la terre se comporte comme un corps visqueux.

La dernière preuve à alléguer ici en faveur de la viscosité du globe

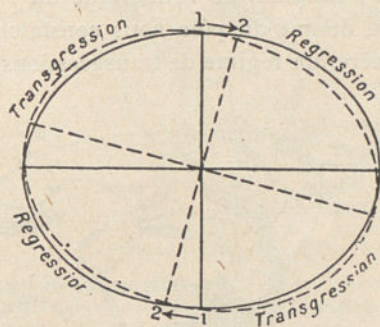


Fig. 21. — Rapport des transgressions et régressions avec le déplacement des pôles.

est son aplatissement. Pour autant que l'exactitude de nos observations nous permet d'en juger, la valeur et l'orientation de cet aplatissement est conforme à la rotation, ce qui ne peut résulter que d'une fluidité. Nous pouvons examiner cette question au point de vue géologique en mettant en parallèle les transgressions et régressions marines avec les déplacements des pôles. L'existence d'un rapport direct entre ces phénomènes a été supposée déjà par de nombreux auteurs ; REIBISCH, KREICHGAUER, SEMPER, HEIL, KÖPPEN et d'autres. Théoriquement, voici ce qui doit se passer : Puisque, lors d'un déplacement du pôle, la terre tarde à prendre la forme qui convient à son nouvel axe de rotation, alors que l'océan peut le faire à tout instant, il doit se produire une régression au devant du pôle en train d'émigrer et « derrière » lui, une transgression (voir fig. 21). Les planisphères figurant au début de cet ouvrage vont nous mettre à même de vérifier cette loi, énoncée depuis longtemps, mais à laquelle on n'avait jamais fourni de preuves jus-

qu'ici. Nous choisirons à cet effet les temps compris entre le Dévonien et le Permien parce que les voyages des pôles y étaient particulièrement rapides (1), comme nous l'avons montré au chapitre sixième. En reportant sur notre carte figurant les continents au Carbonifère, les rivages du Dévonien ancien et du Carbonifère ancien telles que les représentent en général les ouvrages de paléogéographie (voir KOSSMAT ou WAAGEN, par exemple), nous pourrions délimiter les aires soumises durant cette période à des transgressions ou à des régressions (fig. 22). Le Pôle Sud s'avancait alors du Cap vers Loanda, c'est-à-dire dans la direction de l'Amérique du Sud, tandis que le Pôle Nord s'éloignait de l'Amérique du Nord. La règle se confirme puisqu'au devant du pôle nous constatons un régime de régressions, en arrière, un régime de transgressions. Du Carbonifère

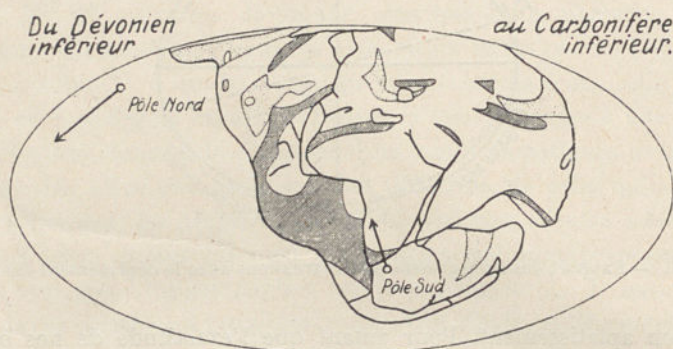


Fig. 22. — Transgressions (ponctué), régressions (hachuré) et déplacement des pôles du Dévonien ancien au Carbonifère ancien.

ancien au Permien supérieur, les pôles, nous l'avons vu, refirent à peu près en sens inverse le trajet qu'ils venaient d'effectuer. Le Pôle Sud gagnait l'Australie, le pôle Nord l'Alaska. La fig. 23 montre les transgressions et régressions qui se produisirent alors ; la règle se confirme une fois de plus et cela paraît d'autant plus frappant qu'il s'agit d'une interversion des conditions auxquelles étaient respectivement soumises les deux Amériques. C'est à ma connaissance la première preuve avancée en faveur de la justesse

(1) Les déplacements du pôle furent également très rapides au Tertiaire ; mais ils se prêtent moins à une semblable démonstration car la surface émergée des continents était déjà plus considérable. Les fluctuations des lignes de rivages s'opéraient donc dans un espace plus restreint qu'aux époques précédentes où il existait de vastes mers épicontinentales.

de cette règle depuis longtemps formulée, et l'évidence des constatations que nous venons de faire me paraît être l'indice non seulement de la justesse de la théorie des translations, mais aussi de l'exactitude des positions hypothétiques que nous avons assignées aux pôles pour les époques en question.

Nous pouvons également vérifier la règle des transgressions en cherchant à l'appliquer non plus du monde entier pour une période

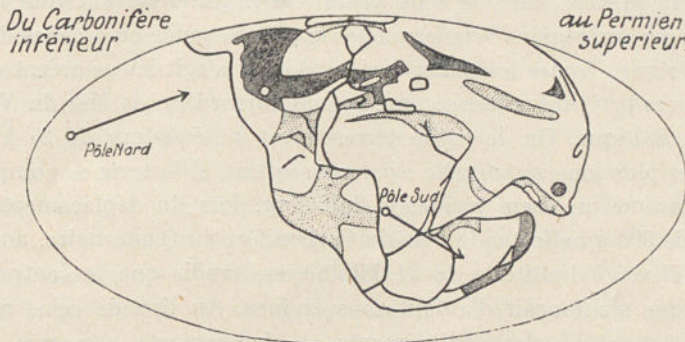


Fig 23. — Transgressions (ponctué), régressions (hachuré), et déplacement des pôles du Carbonifère inférieur au Permien supérieur.

limitée mais à un domaine restreint pour toute la durée des temps géologiques.

La courbe figurant à la page 88 nous indique que, du Carbonifère au début du Jurassique, l'Europe s'approchait du Pôle Nord et qu'ensuite, jusqu'à l'Eocène, elle s'en éloigna pour s'en rapprocher notablement jusqu'au Quaternaire (elle se trouva donc premièrement « au devant » du pôle en marche, puis « en arrière », enfin de nouveau « au devant »). Les transgressions et régressions européennes correspondent tout à fait à ces déplacements. Du Carbonifère au commencement du Jurassique, il règne d'une manière générale un régime de régressions, ensuite, de grandes transgressions se manifestent : ce sont la mer Jurassique puis la mer Crétacée, lesquelles, jusqu'à l'Eocène, recouvrent une bonne partie de l'Europe. Mais à partir de cette époque l'eau se retire : l'Europe entière est progressivement mise à sec par une régression très marquée. Ce ne peut être par pur hasard que la règle se confirme ici, une fois de plus, d'une manière si satisfaisante (1).

(1) Il est clair que tous les changements de niveau ne se prêteront pas à une semblable explication. Nous avons vu que l'inlandsis fait fléchir le terrain sous

Comme il s'agissait d'une démonstration nouvelle, nous nous sommes étendus sur des rapports existant entre les déplacements des pôles et les transgressions un peu plus longuement que ne l'exigeait le plan de cet ouvrage. Que pouvons-nous conclure de ces faits au point de vue de la viscosité du globe? Les changements de niveau occasionnés par ces oscillations du sol atteignent quelques centaines de mètres ; la croûte terrestre peut donc s'écarter d'autant de sa position d'équilibre dans le sens positif ou négatif, suivant que l'on s'adresse aux régions vers lesquelles le pôle s'avance ou à celles dont il s'éloigne. Toutes les transgressions dont il s'agit ici ne créent que des mers peu profondes, comme le sont aujourd'hui la Mer du Nord ou la Baltique. Or, le rayon terrestre est à l'équateur de 21 kilomètres plus long qu'au pôle : par conséquent, si la terre se comportait comme un corps rigide, le Spitzberg, lors du déplacement de près de 90° qu'effectua le pôle du Carbonifère au Quaternaire, aurait dû s'élever à l'altitude de 21 kilomètres, tandis que le centre de l'Afrique s'enfonçait d'autant sous la mer. Au lieu de cela, nous n'assistons qu'à des soulèvements et abaissements passagers, ne dépassant pas quelques centaines de mètres, comme nous l'avons dit. Il faut donc admettre que la terre s'est adaptée dans une grande mesure aux changements de position de son axe de rotation. Son rayon a subi peu à peu, dans la région du Spitzberg, un rétrécissement de 21 kilomètres tandis qu'il s'allongeait de la même valeur sous l'Afrique centrale. Pareil phénomène ne peut se produire que dans un corps jouissant d'une certaine fluidité.

Bien que ces faits parlent clairement en faveur de la viscosité du globe, plusieurs géophysiciens les ont mis en doute. En effet, on peut aussi démontrer que la terre se comporte comme un corps 2 à 3 fois plus résistant que l'acier à la température ordinaire (lequel possède un coefficient de résistance de 8×10^{11} unités C. G. S.). A ce propos, il nous est indispensable d'entrer dans quelques détails. L'on est arrivé à ce résultat par trois procédés différents. GEIGER et GUTEMBERG fondèrent leurs calculs sur la rapidité des ondes sismiques

son poids. D'autre part, la formation, aux pôles, de grandes calottes glaciaires doit provoquer une baisse générale du niveau des océans et inversement, sa fusion donne lieu à une hausse. Comme l'on peut démontrer qu'il y eut des époques où l'un des pôles, du moins, ne possédait pas d'inlandsis (parce qu'il se trouvait en plein Pacifique), ce phénomène ne peut être la cause de notables fluctuations. Aussi nous est-il permis d'attribuer les aspects principaux du phénomène des transgressions au déplacement des pôles.

à l'intérieur du globe; ils obtinrent pour le coefficient de résistance de la zone située à une profondeur atteignant les $\frac{2}{5}$ du rayon terrestre la valeur de 36×10^{11} C. G. S., alors que celle de l'enveloppe silicatée n'atteindrait que 7×10^{11} C. G. S. SCHWEYDAR (1), de son côté, a fait des mesures sur les marées élastiques de la croûte terrestre au moyen du pendule horizontal. Il trouve qu'elles correspondent à une résistance de 18×10^{11} qui s'élèverait à 31×10^{11} au centre de la terre. En troisième lieu, on peut calculer le coefficient de résistance d'après les oscillations du pôle. Elles se décomposent en deux vibrations de périodes différentes : 1° une oscillation contrainte dont la période est d'une année et qu'il faut attribuer, selon SPITALER et SCHWEYDAR, à l'influence exercée sur l'axe d'inertie par le déplacement des masses d'air ; 2° le phénomène principal : une oscillation propre dont la période est de 14 mois et qui correspond à une révolution du pôle de rotation autour du pôle d'inertie. D'après les calculs théoriques d'EULER qui supposent une terre rigide, la période de ces oscillations ne devrait comprendre que 10 mois. NEWCOMB pensait qu'elle pourrait être prolongée par la souplesse de la terre, souplesse qui lui permettrait l'adaptation partielle de sa forme ellipsoïdale au nouvel axe de rotation. En se fondant sur cette hypothèse, HOUGH et SCHWEYDAR obtinrent pour le coefficient de résistance du globe 18×10^{11} (résultat semblable à celui que fournit l'observation des marées terrestres). Pour l'enveloppe de silicates dont l'épaisseur était primitivement évaluée en chiffres ronds à 1.500 km. (2), SCHWEYDAR trouve un coefficient de 7×10^{11} , confirmé par les recherches sismologiques et pour le noyau de fer dont l'existence est rendue vraisemblable par les observations de WIECHERT sur les tremblements de terre 20 à 24×10^{11} . Les divergences existant entre ces données ont peu d'importance ici. Il nous suffit de savoir que, prise dans son ensemble, la terre se comporte comme un corps plus résistant que l'acier.

Ce sont aussi des observations sismologiques qui ont amené

(1) W. SCHWEYDAR. *Lotschwankung und Deformation der Erde durch Flutkräfte, gemessen mit zwei Horizontalpendeln im Bergwerk in 189 m Tiefe bei Freiberg i. Sa.*, Zentralbureau d. Internat. Erdmess. N. F., N° 38, Berlin 1921

(2) L'école de WIECHERT (B. GUTENBERG, *Über Erdbebenwellen* Nachr. d. Ges. Wiss. zu Göttingen 1914) est arrivée finalement à distinguer 4 surfaces de discontinuité. Elles occuperaient les profondeurs de 1200, 1700, 2450 et 2900 km. La première et la dernière paraîtraient les mieux délimitées; aussi est-il le plus vraisemblable d'attribuer à l'écorce de silicates 1200 km. à la zone intermédiaire environ 1700 km. et un noyau de 3500 km. au noyau.

SCHWEYDAR à rechercher s'il se trouve sous l'écorce terrestre une zone de magma fluide. Selon lui « on ne peut admettre la présence d'une semblable zone même si on lui attribuait une fluidité ne dépassant pas celle de la cire à cacheter prise à la température ordinaire et une épaisseur maximale de 100 kilomètres. L'hypothèse suivant laquelle il se trouverait sous l'écorce, soit à partir de 120 kilomètres de profondeur, une couche visqueuse épaisse d'environ 600 kilomètres et dont le coefficient de résistance serait de l'ordre de grandeur de 10^{13} à 10^{14} semble le mieux répondre aux observations ». Le coefficient de résistance de la cire à cacheter (à la température ordinaire) est de l'ordre de grandeur de 10^9 ; SCHWEYDAR attribue donc au sima une résistance 10.000 fois plus grande que celle de la cire à cacheter.

Il n'est pas étonnant que ces résultats que nous n'avons aucune raison de mettre en doute aient été envisagés comme incompatibles avec nos idées concernant la viscosité du globe.

Mais cette apparente contradiction s'efface si nous tenons compte des grandes dimensions du globe et des temps considérables que mettent à se produire les modifications d'ordre géologique. C'est là un point que les auteurs n'ont pas pris suffisamment en considération jusqu'ici. Et pourtant, en géophysique, son importance est énorme. Une bille d'acier se comporte, au laboratoire, comme un corps tout à fait rigide, mais une sphère du même métal est plastique à la dimension de notre globe en raison de sa propre force d'attraction. Toutefois, il faut accorder à cette plasticité un nombre suffisant de siècles pour que ses effets nous deviennent sensibles. Nous passons ici du domaine des forces moléculaires (degré de rigidité) à celui des forces molaires (1). L'isostasie témoigne d'une prédominance des forces molaires. Si elle fait défaut : c'est que les forces moléculaires l'emportent. C'est pour cette raison que les petits corps célestes tels que certains satellites planétaires, quelques-unes des petites planètes et *a fortiori* les météorites n'ont plus la forme sphérique, laquelle implique l'isostasie. L'isostasie se manifeste déjà dans la Lune prise dans son ensemble. Les grandes inégalités de sa surface montrent cependant que les forces molaires y sont déjà notablement moins intenses qu'au sein de notre globe. En effet, la hauteur des

(1) « Les forces molaires l'emportent sur les forces moléculaires » (LOVKASCHEWITSCH, *Sur le mécanisme de l'écorce terrestre et l'origine des continents*, p. 7. St Pétersbourg, 1910).

montagnes n'est pas une dimension quelconque, — PENCK (1) l'a relevé déjà en montrant l'attitude semblable des hauts sommets alpins — mais elle est déterminée en bonne partie par le rapport des deux forces en question. Les montagnes font voir jusqu'à quel point les forces moléculaires peuvent s'affirmer en dépit de la pesanteur.

De même, nous pouvons répondre dès maintenant à la question de savoir quelle influence peut exercer l'immensité de notre globe sur les matières dont il se compose. Nous savons que l'acier, soumis à des pressions qu'il nous est possible de réaliser pratiquement, perd sa rigidité, devient plastique. Nous ne pouvons, à notre gré, augmenter indéfiniment la hauteur d'une colonne d'acier sans atteindre la limite à partir de laquelle sa base se met à « couler ». Imaginons un continent dont le bord serait en acier sur toute sa hauteur ; les parties supérieures de cette muraille conserveraient leur rigidité ; mais ses assises commenceraient à faire saillie au dehors sous la pression des masses supérieures. Ainsi, à l'égard des grandes dimensions de la terre, l'acier n'est plus un corps solide ; on peut même affirmer qu'à cette échelle aucun corps n'est solide. Toutes les substances, au contraire, participent de la viscosité mais le temps qu'elles emploient à se déformer variera suivant leur coefficient de résistance. Sous ce rapport, il est fort intéressant de constater que SCHWEYDAR attribue à la sphère de sima une résistance 10.000 fois plus grande que celle de la cire à cacheter (à la température ordinaire). Si nous jetons à terre un bâton de cire à cacheter, il se brise et ses fragments présentent des arêtes vives ; si au contraire nous le plaçons horizontalement sur 2 points d'appui, nous remarquerons, au bout de quelques semaines, qu'il s'incurve vers le bas et au bout de quelques mois, ses parties non soutenues auront pris une direction voisine de la verticale. En langage géologique, le degré de fluidité de la cire à cacheter, prise à la température ordinaire, est si élevé qu'il ne peut servir à expliquer les phénomènes. Si le sima possède un coefficient de résistance 10.000 fois plus élevé que celui de la cire à cacheter, cela signifie qu'un mois pour elle représente 1.000 ans pour lui. Ainsi, nous avons affaire à des durées qui conviennent mieux au déroulement des phénomènes géologiques. En nous fondant sur les chiffres de SCHWEYDAR, nous ne devons pas dire : *La*

(1) A. PENCK, *Die Gipfelflur der Alpen*. Sitz. Ber. d. Pr. Ak. d. Wiss., p. 256-263, Berlin 1919.

terre a la résistance de l'acier, donc elle se comporte comme un corps rigide. Car ce n'est vrai que lorsqu'elle est soumise à des forces de courte durée telles que l'attraction luni-solaire dont le point d'application change constamment, ou les ondes sismiques, ou peut-être aussi les petites oscillations des pôles. Dès qu'il s'agit, au contraire, non plus de secondes, de jours ni de mois, mais de milliers ou de millions d'années, il nous faut dire : La terre n'a que la résistance de l'acier, elle se comporte donc comme un corps visqueux.

Il faut bien reconnaître que ces conceptions ont quelque chose de paradoxal. Mais n'oublions pas que même nos expériences faites au laboratoire sur des substances visqueuses nous donnent cette impression parce qu'elles vont à l'encontre de l'observation courante. La poix réagit au choc comme un corps tout à fait solide ; mais, si on lui en laisse le temps, elle se met à couler sous l'influence de la pesanteur. Un morceau de liège ne se laisse pas enfoncer violemment au travers d'une couche de poix, mais si nous le plaçons au fond d'un récipient rempli de cette matière visqueuse, la force ascensionnelle minime que lui confère sa densité plus faible suffira, avec le temps, à lui faire gagner la surface. C'est parce que ces faits semblent subversifs que l'avance des glaciers fut difficile à comprendre et que l'on crut devoir l'attribuer à des phénomènes particuliers, tels que le regel, jusqu'au moment où des observations faites sur les glaciers polaires qui se déplacent malgré leur très basse température interne, nous amenèrent à une idée plus juste de leur viscosité.

Il faut encore ajouter ici qu'il existe un grand nombre de coefficients, définis d'une manière différente, caractérisant la résistance, la solidité ou la rigidité. Sans vouloir nous étendre sur ce point, il nous faut tout de même montrer par un exemple de quelles propriétés des corps il s'agit.

MAXWELL appelle un corps « mou » lorsqu'à une pression donnée il cède rapidement, mais seulement dès l'instant où celle-ci dépasse une certaine limite. Il appelle au contraire « visqueux » un corps qui cède infiniment lentement à une pression infiniment petite. « Si la modification croissante ne s'effectue qu'à partir du moment où la force s'élève au-dessus d'une valeur donnée, on dit que le corps en question est un solide, si mou qu'il puisse être. Si, au contraire, une force minime, à condition qu'elle dure, provoque une modification de plus en plus marquée nous aurons affaire à un liquide visqueux, si résistant qu'il puisse être. Ainsi, une bougie de suif est bien plus molle qu'un bâton de cire à cacheter, et pourtant, si l'on place ces objets horizontalement, en ne les soutenant que par leurs extrémités,

la cire à cacheter au bout de quelques semaines d'été aura fléchi sous son propre poids, tandis que la bougie sera demeurée rectiligne. De ce fait, la bougie est un corps solide mou, la cire à cacheter, un liquide extrêmement visqueux » (1).

La cire ordinaire se comporterait comme le suif. Un moulage en cire peut se conserver des siècles durant, sans se déformer, à condition, bien entendu, que la température du lieu ne dépasse pas son point de fusion ; en cire à cacheter, le même moulage n'aurait pas manqué de se modifier peu à peu.

Tous les états compris entre les deux extrêmes de MAXWELL sont représentés dans la nature. En réalité, les exemples que nous avons cités ne représentent pas ces extrêmes. Il ne suffit pas d'une pression infiniment petite pour provoquer la déformation de la cire à cacheter ; seulement, le minimum nécessaire est placé si bas que cette substance se met à couler sous l'effet de son propre poids, autrement dit d'elle-même. Il est certain que des corps composés tels que les silicates de l'écorce du globe participent à la fois des propriétés de ces deux extrêmes.

Nous ne pouvons donc identifier ni le sima ni le sial à l'un des prototypes de MAXWELL, mais il est possible de les y comparer et, à mon sens, cette comparaison pourra jeter beaucoup de lumière sur les processus de dérive, si difficilement accessibles à notre entendement. La différence de ces deux complexes nous apparaîtra dès lors très nettement. Nous ne saurions mieux la faire voir qu'en comparant précisément le sima à la cire à cacheter et le sial à du suif ou à de la cire. Le sima est, des deux, la matière la plus dure (le basalte fournit les meilleurs pavés !) ce qui ne l'empêche pas d'être en même temps la plus fluide. Le sial conserve sa forme (socles continentaux) aussi longtemps que les forces auxquelles il est soumis ne dépassent pas une certaine intensité, sinon il se plisse ou se déchire.

Jusqu'à présent, nous ne nous sommes pas encore occupé des conditions de température régnant à l'intérieur du globe. Elles jouent aussi un rôle dans la question de la possibilité des translations continentales. Comme l'ont montré les expériences de DOELTER et DAY, la masse des roches silicatées n'a pas un point de fusion très nettement défini, mais au contraire, des limites de fusion, parfois très distantes l'une de l'autre. On peut attribuer comme point

(1) Citation tirée de H. HESS. *Die Gletscher*, p. 46. Braunschweig.

de fusion aux diabases 1100° ; aux laves du Vésuve 1400 à 1500°. Ces chiffres ne sont valables qu'à la pression atmosphérique ; pour les roches situées à 100 kilomètres de profondeur il faudrait les augmenter de quelques centaines (1). D'autre part, les forages de Czuchow II et Paruschowitz V (Haute-Silésie) les plus profonds à l'heure actuelle, ont donné pour les deux premiers kilomètres une augmentation de température de 3,1° par 100 mètres (2). Il est vrai que ces forages ne traversent que des sédiments lesquels possèdent une conductibilité thermique relativement faible ; ce qui fait que les surfaces d'égale température s'y concentrent. Dans les roches archéennes que traversent les tunnels du Gotthard, du Mönch et du Simplon la température croît seulement de 2,2, 2,2 et 2,4° par 100 mètres. Comme nous pouvons supposer que ces valeurs sont anormalement faibles, en raison de la convexité des montagnes, nous choisirons pour les socles continentaux la valeur moyenne de 2,5° qui nous paraît bien convenir. Il n'est pas possible d'effectuer de semblables mesures à l'intérieur du sima. Si nous pouvons tabler sur les données de FRIEDLÄNDER (3), suivant lesquelles les roches volcaniques profondes posséderaient une faible conductibilité répondant à une augmentation de 6° par 100 mètres, nous arriverions, par extrapolation linéaire, à placer à — 9000 mètres le niveau de l'écorce où la température (environ 230°) est la même dans les masses continentales que dans le sous-sol océanique. Mais, au dessous de ce niveau, la chaleur augmenterait plus vite dans le sima que dans le sial. A vrai dire, les chiffres de FRIEDLANDER sont encore peu sûrs ; en leur faveur, notons cependant qu'une légère différence de conductibilité thermique suffirait certainement à compenser le fait, que sous 8.000 mètres d'eau, le sol a une tempé-

(1) Le point de fusion de toutes les substances qui augmentent un peu de densité en se solidifiant, et par conséquent, vont au fond dans leur propre liquide — s'élève légèrement lors d'une forte augmentation de la pression. Il est probable que la plupart des roches appartiennent à cette catégorie. Selon Barus, le point de fusion de la diabase croît à raison de 0,025° par atmosphère ; pour Vogt ce ne serait que de 0,005°. Inversement, le p. de fus. de tous les corps qui diminuent de densité en passant à l'état solide et flottent donc dans leur liquide s'abaisse légèrement lors d'une forte augmentation de la pression. Ce groupe comprend notamment la glace mais l'on doit y mettre le fer et d'autres métaux, peut-être même tous les métaux.

(2) MICHAEL et QUITZOW, *Die Temperaturverhältnisse im Tiefbohrloch Czuchow in Oberschlesien*. Jahrb. d. Kgl. Preuss. Geol. Reichsanstalt 1910.

(3) J. FRIEDLANDER, *Beitr. z. Geophys.* 11, Kl. Mitt. p. 85-94, 1912.

rature de 0° alors qu'à cette profondeur il atteint déjà 135° environ dans les socles continentaux (1).

Par extrapolation linéaire, nous obtiendrions pour une profondeur de 100 kilomètres sous les aires continentales la température de 2.800° C. laquelle dépasse de beaucoup le point de fusion des roches. Aussi s'accorde-t-on à juger l'extrapolation linéaire inadmissible en pareil cas. Nous ne savons malheureusement pas suivant quelle loi la température augmente avec la profondeur. Il est probable que la distribution quantitative du radium dans l'écorce terrestre entre ici en première ligne de compte. Quant à la température régnant au centre du globe nous n'avons de ce fait, pour la calculer que des bases bien insuffisantes ; on lui attribue aujourd'hui un nombre de degrés beaucoup moins élevé qu'autrefois, soit le plus souvent 3 à 5.000 environ. Toujours est-il que nous pouvons nous attendre à trouver à 100 kilomètres sous terre une chaleur de 1000 à 2000 degrés. Ainsi l'idée que les roches atteindraient leur point de fusion à peu près au niveau de la base des socles continentaux ne serait pas en contradiction avec les données expérimentales obtenues jusqu'ici.

Il ne faut pas croire cependant, que la température de fusion occupe partout la même profondeur et que cette profondeur soit constante dans le temps. Le phénomène de l'intrusion granitique nous fournit à ce sujet d'utiles renseignements. Les observations que Cloos fit en Afrique Australe dissipèrent les derniers doutes relatifs à son interprétation. Il en ressort que parfois le géoïsotherme de fusion peut s'élever jusqu'à la surface du sol. Il est vraisemblable d'admettre qu'en d'autres régions il se trouve au contraire à une profondeur anormale. Nous ignorons à quelle cause attribuer les variations qu'il subit au cours des temps dans le sens vertical. Il se pourrait qu'ici la radioactivité joue aussi son rôle.

Une haute température doit en tous cas augmenter le degré de fluidité du sima. Nous ne savons pas encore dans quelle mesure ces conditions se modifient avec la profondeur, ni s'il existe en particulier au niveau de la base des socles continentaux une zone où la fluidité atteint son maximum.

(1) Ce fait enlève tout fondement aux hypothèses attribuant les dépressions océaniques au fait que les eaux de profondeur refroidissent le sol, de même qu'à l'idée suivant laquelle le sous-sol océanique, parce que plus froid, devrait être plus rigide que les masses continentales.

Les masses de sial doivent se séparer d'autant plus nettement du sima que, d'après DOELTER, le point de fusion des roches dont elles se composent est, d'une façon générale, de 2 à 300° plus élevé que celui des constituants du sima. C'est pourquoi à températures égales, du sima magmatique et du sial solide peuvent se trouver côte à côte. C'est possible en outre, grâce au fait que même à l'état de fusion le sial conserve une résistance plus grande que le sima.

En attendant, il me semble que l'on ne doit pas ajouter à la question thermique une importance décisive car, ainsi que le montrent les travaux de SCHWEYDAR, le sima possède encore sous les masses continentales une résistance 10.000 fois plus grande que celle de la cire à cacheter à la température ordinaire. Il est probable que tous les processus que nous décrivons se dérouleraient sans grand changement, même si le point de fusion des silicates n'était atteint nulle part.

CHAPITRE IX

Le fond des océans.

Nous avons vu que lors des translations les plus rapides, l'augmentation annuelle d'une distance d'environ 100 kilomètres ne dut pas dépasser 10 mètres. Si cette valeur se répartit sur le parcours entier, chaque mètre n'est augmenté que de 0.001 mm ; c'est là une quantité tout à fait minime. Comme la roche du fond de l'océan est naturellement parcourue par toutes sortes de fissures, un très léger élargissement de ces dernières suffirait à provoquer l'écartement voulu des points extrêmes du parcours considéré. Le sima des couches profondes pourrait sans peine se distendre en proportion. Il n'est donc pas obligé que ces disjonctions aient toujours fait monter à la surface du sima en fusion. D'autre part, il est vraisemblable que ces phénomènes suivent un cours plus irrégulier : à tel endroit, le fond océanique ne subira aucun étirement à tel autre, au contraire, il faudra que son élargissement soit d'autant plus grand par compensation. De cette façon, du sima à haute température sera mis à nu, ici ou là.

Mais on n'a pas besoin de supposer que l'apparition au fond des mers, de ces masses surchauffées s'accompagne de quelque événement catastrophique. La pression critique de l'eau n'est que de 200 atmosphères seulement ; elle est donc atteinte à 2000 mètres. A partir de ces profondeurs, un échauffement si grand soit-il, ne provoque plus l'ébullition ; l'eau surchauffée cherche à monter en vertu de sa diminution de densité, mais elle ne tarde pas à se mélanger à celle dont la température est presque à 0 et elle se perd. C'est pourquoi la lave s'y épanche d'habitude très tranquillement. Selon BERGEAT, de semblables éruptions sous-marines se sont produites par exemple en 1888, 1889 et 1892 non loin de Vulcano à une profondeur de 700 à 1000 mètres. Si elles n'avaient pas provoqué la rupture du câble joignant les Lipari à Milazzo, elles auraient passé inaperçues. C'est une particularité bien connue de ces éruptions, d'être à peu près silencieuses (1).

(1) E. KAYSER, *Lehrb. d. Geologie 1, Allgem. Geologie*, 5^e édit., p. 784. Stuttgart, 1918.

Les profondeurs des trois grands océans ne sont pas tout à fait les mêmes. KOSSINNA (1) attribue, d'après les cartes de GROLL, au Pacifique une moyenne de — 4028 mètres, à l'Océan Indien — 3897, à l'Atlantique — 3332. La répartition des sédiments abyssaux (voir fig. 24) rend fidèlement ces différences, ainsi que nous le fit remarquer KRUMMEL. L'argile rouge et les vases à radiolaires, sédiments typique-

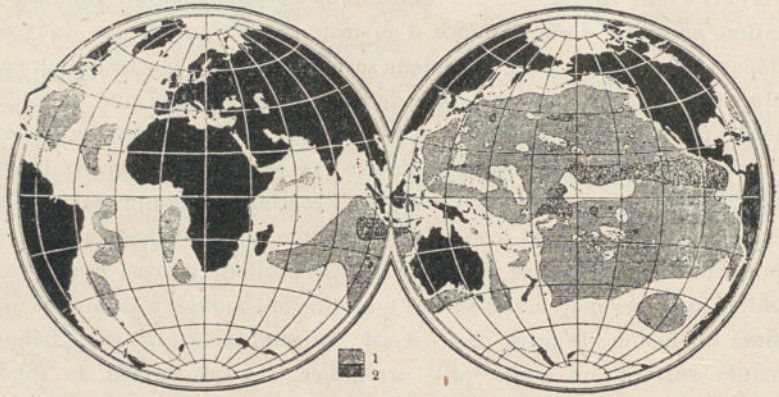


Fig. 24. — Carte des sédiments abyssaux. 1 Argile rouge. 2. Vase à radiolaires.

ment abyssaux, occupent essentiellement le Pacifique et les régions orientales de l'Océan Indien, tandis que l'Atlantique et les parties occidentales de l'Indien ont leur fond recouvert, avant tout, de sédiments « épilophiques » dont la teneur plus forte en calcaire provient du fait qu'ils se déposent à une moins grande profondeur. Ces différences de profondeur, ne sont pas l'effet du hasard. Elles correspondent à la différence qui existe entre les types de côtes atlantique et pacifique. C'est l'Océan Indien, qui nous en fournit le meilleur exemple : sa moitié occidentale a le caractère atlantique sa moitié orientale, de beaucoup la plus profonde, a le caractère pacifique. Au point de vue des translations continentales, ces constatations ont un intérêt tout particulier. En effet, nous voyons au premier coup d'œil, que les plus profonds sont les fonds les plus anciens, tandis que ceux qui ont été mis à nu à des époques relativement récentes offrent la moyenne de profondeur la plus faible. Ainsi sur la figure 24, l'on peut voir à merveille pour ainsi dire la trace des dérives.

(1) F. KOSSINNA. *Die Tiefen des Weltmeeres*. Veröff. d. Inst. f. Meereskunde a. d. Univ. Berlin. N. F. A. Geogr. naturw. Reihe H. 9.

Ces différences de profondeur pourraient naturellement résulter d'une différence de densité entre les fonds de mer anciens et récents. Il serait concevable que la composition du sima se fût modifiée au cours des temps par la cristallisation de certains de ses éléments ou par quelque autre cause. Et nous pensons ici à la différence minéralogique existant entre les roches éruptives anciennes et récentes, ou entre les laves atlantiques et pacifiques. Mais, dans ce cas, il faudrait attribuer les grandes profondeurs non pas aux fonds anciens, mais aux fonds récents. C'est pourquoi, à mon avis, il faut faire intervenir ici les conditions thermiques. Les vieux sols sous-océaniques ont subi un refroidissement de plus longue durée et sont, de ce fait, plus lourds que les sols récemment mis à nu. Si, par exemple, la densité du sima est 2,9, une élévation de température de 100° doit la réduire à 2,892, si l'on prend pour base le coefficient de dilatation cubique du granite. Deux fonds dont la température différerait de 100° et qui

seraient en équilibre isostatique l'un par rapport à l'autre, devraient accuser un écart de profondeur de 300 mètres. le plus chaud occupant le niveau le plus élevé. A vrai dire, il est difficile de se représenter que le fond de l'Atlantique ait pu conserver durant les millions d'années d'existence qu'on lui prête, une température plus élevée que celle du fond du Pacifique, et cela même si nous sommes en droit de supposer un écart très considérable au début (1000 à 1800). Au reste, nous ignorons en somme d'où provient la chaleur interne de la terre. Si c'est la radioactivité qui la produit ou qui concourt seulement à l'entretenir, nous n'aurions pas à écarter complètement l'idée que les

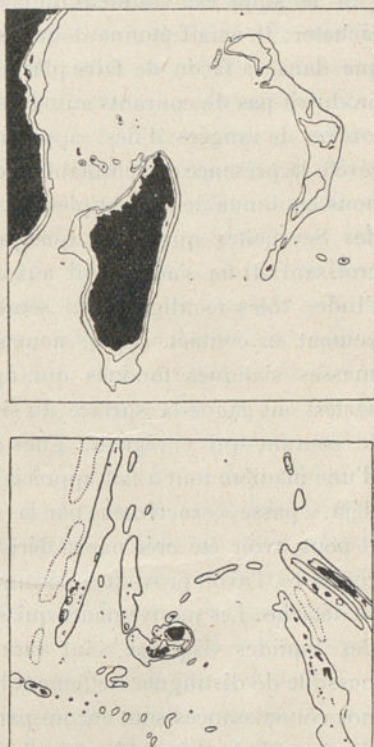


Fig. 25. — En haut : Madagascar et le banc des Seychelles ; en bas : les Iles Fidji.

(Courbes bathymétriques de 200 et de 2000 m ; sillons abyssaux en pointillé.)

couches profondes, nouvellement mises au jour, peuvent garder une température élevée même au cours de longues périodes géologiques puisque leur teneur en radium est plus forte.

Si le sima est vraiment un corps visqueux comparable à la cire à cacheter, il serait étonnant que sa faculté de couler ne se manifestât que dans sa façon de faire place aux socles en dérive, et qu'il ne s'y produisît pas de courants autonomes. En certains points de la carte, la torsion de rangées d'îles, apparemment rectilignes au début, nous révèle la présence de semblables courants, plutôt locaux. La figure 25 nous en donne deux exemples : les Seychelles et les Iles Fidji. Le banc des Seychelles qui porte quelques îles granitiques, a une forme de croissant. Il ne s'adapte ni aux côtes de Madagascar, ni à celles de l'Inde, côtes rectilignes qui semblent bien plutôt avoir été primitivement en contact. Ainsi, nous serions portés à croire qu'il s'agit de masses sialiques fondues qui, après s'être détachées de la base des socles, ont gagné la surface du sima et ont été ensuite entraînées par le courant qui y régnait. Elles ont pu ainsi se déplacer vers l'Inde d'une manière tout à fait appréciable. Ce courant que Madagascar suit déjà, « passe » exactement par la zone balayée par l'Inde péninsulaire. Il peut avoir été créé par la dérive de cette masse continentale ou au contraire, l'avoir provoquée comme le ferait croire la façon dont Ceylan se détache. Les mouvements qui s'opèrent au sein des liquides, même des liquides visqueux, sont rarement assez simples pour qu'il soit possible de distinguer nettement la cause de l'effet, et dans ce domaine nos connaissances sont encore par trop lacunaires; aussi est-il insensé d'exiger de la théorie des translations qu'elle incorpore dans son système tous les mouvements relatifs qui peuvent se présenter et qu'elle en donne l'explication. Nous ne considérons ces objets qu'en vue d'expliquer les phénomènes de fluidité, lesquels, dans le cas particulier, sont attestés surtout par l'inflexion des extrémités du socle vers l'arrière. Cette forme arquée nous indique que le courant diminue d'intensité à mesure que l'on s'éloigne de la ligne joignant Madagascar à l'Inde péninsulaire. Nous pouvons dire également que le courant est le plus fort dans le sima fraîchement mis à découvert, tandis que les fonds où il affleure depuis plus longtemps (c'est-à-dire les régions situées au nord-ouest et au sud-est de la ligne dont nous venons de parler), se meuvent aussi plus lentement. Le groupe des Iles Fidji représenté sur la deuxième carte de la figure 25 affecte, en un point, la forme d'une nébuleuse spirale à deux branches d'où l'on peut conclure à

l'existence d'un remous. Ce tourbillon semble s'être produit au moment où l'Australie, quittant les dernières attaches qui la reliaient à l'Antarctique, se mit à dériver vers le nord-ouest en lâchant la guirlande Néo-Zélandaise. Il est probable qu'avant de s'enrouler ainsi sur lui-même, l'Archipel des Fidji s'étendait le long de la crête des Tonga et formait avec elle une guirlande du socle australo-néoguinéen. Cette guirlande, comme toutes celles de l'Asie orientale, adhérerait par son bord externe au vieux fond pacifique et put ainsi être séparée du socle continental dont elle faisait partie. Cette disjonction provoqua l'enroulement spiralé de son train d'îles interne. Les Nouvelles Hébrides et les Iles Salomon pourraient avoir été jadis d'autres guirlandes en échelon abandonnées par le même socle (1). Nous avons vu que la Nouvelle Poméranie (Archipel Bismarck) a été prise en écharpe par la Nouvelle Guinée qui lui fit décrire une certaine rotation sur elle-même, tandis qu'au nord-ouest du grand socle en dérive, dans l'Archipel de la Sonde, les deux rangées d'îles les plus au sud se recourbaient en une spirale témoignant comme les Iles Fidji, d'un remous du sima.

Les observations faites jusqu'ici sur la nature des sillons abyssaux (2) ne nous en donnent pas encore une idée complète. Ces sillons accompagnent toujours le bord externe (convexe) des guirlandes, c'est-à-dire la zone où celles-ci entrent en contact avec les vieux fonds océaniques ; à leur bord interne au contraire on n'en trouve jamais. Le fond abyssal récent y apparaît dans une sorte de fenêtre. Il semble donc que les sillons abyssaux ne peuvent se former que dans les vieux fonds océaniques, parce qu'ils sont plus profondément refroidis et solidifiés. Il est peut-être permis de les envisager comme des fentes dont l'un des bords serait occupé par le sial de la guirlande, l'autre par le sima du fond océanique. A ce sujet, il ne faut pas nous laisser tromper par le profil indiqué à la figure 29 ; si ses lignes sont en réalité très adoucies, cela tient à l'action nivellatrice de la pesanteur.

Le profond sillon, coudé à angle droit, qui s'étend au sud et au sud-est de la Nouvelle Poméranie doit son origine évidemment à la torsion que cette île subit sous la poussée de la Nouvelle Guinée. Le socle de la Nouvelle Poméranie, pénétrant jusqu'à 100 kilomètres de

(1) HEDLEZ a été amené en particulier par des raisons biologiques à réunir en un tout la Nouvelle Guinée, la Nouvelle Calédonie, les Nouvelles Hébrides et les Iles Salomon.

(2) Le terme de « fossés abyssaux » est moins heureux parce qu'il peut faire croire qu'il s'agit de fossés d'affaissements analogues à ceux que l'on rencontre sur les continents.

profondeur, a labouré le sima, et le sillon qu'il y forme n'a pas encore été entièrement comblé par l'onde de suite. Ce dernier cas est peut-être celui qui nous donne la meilleure idée de la formation d'un sillon abyssal.

Le sillon d'Atakama, à l'ouest du Chili, semble offrir la possibilité d'une autre explication. En effet, du moment que dans la zone affectée par un plissement — le plissement andin dans le cas particulier —

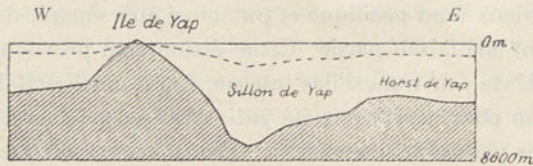


Fig. 26. — Coupe passant par le sillon de Yap, d'après SCHOTT et P. PERLEWITZ.
Echelle des hauteurs quintuplée. Profil réel en pointillé.

toutes les couches se trouvant au-dessous du niveau des fonds océaniques sont refoulées vers le bas (voir chapitre suivant), le fond de mer le plus proche doit être attiré dans le même sens. De plus, le bord continental lui-même s'abaisse par suite de la fusion des masses de sial du plissement profond et de leur cheminement vers l'est par rapport à la marche du continent, masses qui, comme nous l'avons supposé plus haut, auraient en partie constitué pour finir le banc des Abrolhos. De cette façon, le bord continental doit aussi entraîner dans sa descente le sima avec lequel il est en contact.

Ces idées concernant la nature des sillons abyssaux demandent toutes à être confirmées par des observations précises, notamment par des mesures de l'intensité de la pesanteur. Sur ce point nous n'avons encore, à ma connaissance, que les observations de HECKER (1) relatives au sillon des Tonga. Elles attestent une forte anomalie ($\Delta g = - 0,25$ pour le sillon, contre $+ 0,13$ à $0,22$ pour le plateau). Ce résultat confirmerait notre idée qu'en cet endroit l'équilibre isostatique n'a pas encore été rétabli par l'afflux du sima. Il serait très important d'apprendre à mieux connaître la nature de ces intéressantes anomalies et cela grâce à de nouvelles observations portant aussi sur d'autres sillons abyssaux.

(1) O. HECKER, *Bestimmung der Schwerkraft auf dem Indischen und Grossen Ozean und an den Küsten*. Zentralbureau d. Internat. Erdmess. N.F. n° 16, Berlin 1908.

CHAPITRE X

La sphère de sial.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de considérer avant tout

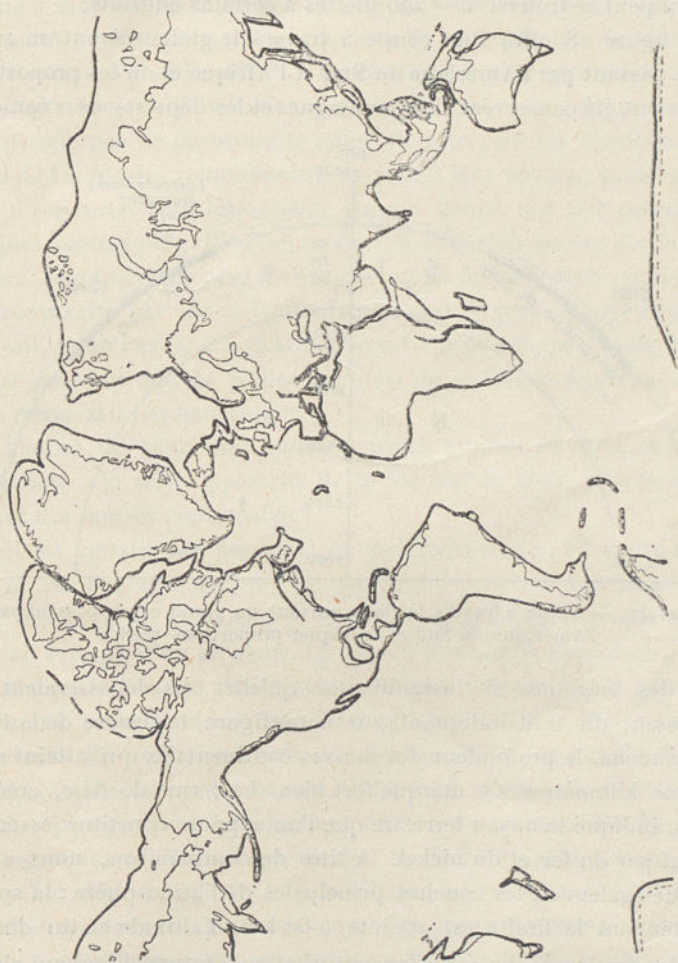


Fig. 27. — Les socles continentaux en projection Mercator.

dans son ensemble, la sphère de sial, actuellement morcelée et réduite aux masses continentales.

La figure 27, tout d'abord, nous donne une carte générale des socles continentaux. Comme leurs plateformes bordières en font partie intégrante, leurs contours, en bien des endroits, s'écarteront notablement de ceux que nous leur connaissons, autrement dit de la ligne de rivage. Il importe, ici de nous libérer de l'image habituelle des continents, pour nous familiariser avec leurs limites réelles. Dans la règle, le bord des plateformes continentales y correspond le mieux ; mais il peut se trouver à — 500 mètres à certains endroits.

La figure 28 offre une coupe à travers le globe suivant un grand cercle passant par l'Amérique du Sud et l'Afrique et où les proportions réelles ont été conservées. Les montagnes et les dépressions océaniques

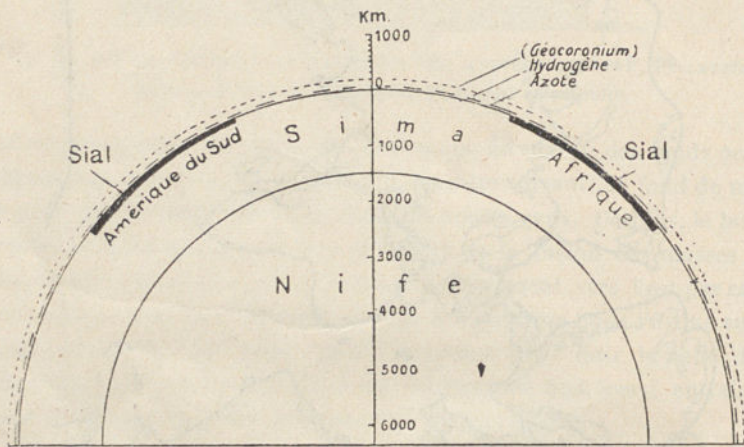


Fig. 28. — Coupe à travers le globe, suivant un grand cercle passant par l'Amérique du Sud et l'Afrique; proportions réelles.

sont des inégalités si insignifiantes qu'elles ne dépasseraient pas l'épaisseur du trait indiquant, sur notre figure, la surface de la terre. En revanche, la profondeur des masses continentales qui atteint environ 100 kilomètres s'y marque fort bien. Le terme de *Nife*, créé par SUESS, indique le noyau terrestre que l'on suppose constitué essentiellement par du fer et du nickel. A titre de comparaison, nous avons indiqué également les couches principales de l'atmosphère : la sphère d'azote dont la limite est atteinte à 60 km. d'altitude et, au dessus, celle des gaz légers. La zone des perturbations (troposphère) qui s'élève à 11 kilomètres, n'a pas pu être figurée ici.

Nous avons déjà fait remarquer que les socles continentaux sont constitués en majeure partie par du gneiss. Mais on sait que très

souvent leur surface n'est pas occupée par cette roche mais par des sédiments. Il importe donc de nous faire une idée du rôle que jouent ces derniers dans la construction des masses continentales. On peut attribuer aux sédiments une épaisseur maxima de 10 kilomètres environ. C'est en particulier le chiffre obtenu par les géologues américains pour le Paléozoïque des Appalaches; l'épaisseur minima se réduit à 0, puisqu'en bien des endroits la roche primitive est à nu. CLARKE estime à 2400 mètres la puissance moyenne des sédiments recouvrant les socles continentaux. Mais, comme la hauteur totale de ces socles peut être taxée à 100 kilomètres, il est clair que cette couverture ne représente qu'une zone d'altération superficielle et que sa suppression ne modifierait pas de beaucoup le relief terrestre, car les continents, en vertu de l'isostasie, remonteraient presque à leur hauteur primitive.

Il n'est certes pas improbable qu'aux temps qui ont précédé les époques géologiques, l'enveloppe de sial s'étendait encore sur la terre entière. Son épaisseur peut n'avoir été que de 30 kilomètres et elle dut être recouverte par une « Panthalassa » dont la profondeur moyenne s'élevait, selon ПЕНСК, à 2,64 kilomètres. Cette enveloppe liquide ne dut laisser émerger que de petites portions de la surface terrestre, si elle ne la recouvrait pas tout entière.

A l'appui de cette idée, nous pouvons avancer en tous cas deux arguments : le développement de la vie sur le globe et la structure plissée des masses continentales.

« Il est certain que personne ne met sérieusement en doute le fait que la vie en eaux douces, sur terre ferme et dans l'air procède de celle des mers » (1). Avant le Silurien, nous ne connaissons aucun animal à respiration aérienne. Le végétal terrestre le plus ancien a été trouvé dans le Silurien de Gothland. D'après GOTHAN (2), le Dévonien ancien ne nous révélerait que des plantes voisines des mousses, et privées de frondaisons proprement dites. « Des traces de feuilles bien caractérisées possédant un limbe sont rares dans le Dévonien ancien; presque tous les végétaux étaient de petite taille, herbacés et d'aspect assez frêle ». En revanche, la flore du Dévonien supérieur ressemble déjà à celle du Carbonifère : « des limbes foliaires de grandes dimensions, parcourus par des nervures, apparaissent; la plante nous montre dans son organisme une division du travail poussée

(1) STEINMANN. *Die kambrische Fauna im Rahmen des organischen Gesamtentwicklung*, Geol. Rundschau 1, 69, 1910.

(2) GOTHAN. *Neues von den ältesten Landpflanzen*. Die Naturwissenschaften 9, p. 553, 1921.

très loin, elle possède des organes de soutien et des organes d'assimilation. .. Les caractères des plantes éodévoniennes : organisation primitive, petite taille etc. nous donnent à entendre que les végétaux terrestres sont d'origine aquatique; PORONIE, LIGNIER, ARBER et d'autres se sont déjà exprimés dans ce sens. Les progrès constatés au cours du Dévonien supérieur consistent en une adaptation à la vie sur terre ferme ».

Il semble, d'autre part, que si nous arrivions à dérouler tous les plissements des socles continentaux, l'écorce sialique serait en fait suffisamment agrandie pour pouvoir s'étendre sur toute la terre. Il est vrai qu'aujourd'hui, les masses continentales avec leurs plateformes bordières, n'occupent plus que le tiers de sa surface. Mais au Carbonifère déjà, elles devaient être notablement plus étendues, semble-t-il. (Elles pouvaient occuper la moitié de cette surface). Plus nous remontons le cours des temps géologiques, plus les phénomènes orogéniques nous apparaissent considérables. F. KAYSER (1) dit à ce propos : « Il est très important de noter que les roches archéennes les plus anciennes sont partout fortement bouleversées et plissées. Ce n'est qu'à partir de l'Algonkien que nous trouvons ici ou là, à côté de couches plissées, des dépôts horizontaux ou faiblement plissés. Si nous passons aux temps post-algonkiens nous constaterons que les masses rigides et inflexibles de l'écorce terrestre augmentent en nombre et en étendue, ne laissant aux zones susceptibles de plissement qu'un espace de plus en plus restreint. C'est surtout le cas pour les bouleversements carbonifères et permien. Après les temps paléozoïques, les forces orogéniques diminuèrent peu à peu d'intensité, pour reprendre durant le Jurassique et le Crétacé et atteindre un nouveau paroxysme au Tertiaire inférieur. Il est cependant très significatif que l'extension de ce dernier plissement soit demeuré notablement plus réduite que celle même du plissement carbonifère ».

Notre hypothèse que l'enveloppe de sial aurait jadis recouvert la terre entière n'est donc pas en contradiction avec les idées en cours. Cette enveloppe, susceptible de se déplacer horizontalement et elle-même plastique, fut déchirée sous l'action de certaines forces (dont nous reparlerons plus loin) et elle se concentra sur l'une des moitiés de la terre en découvrant l'autre de plus en plus. La genèse de l'océan et son élargissement ne représentent donc que l'une des faces de ce

(1) E. KAYSER, *Lehrbuch der allg. Geologie*, 5^e édit., p. 904, Stuttgart 1918.

processus, l'autre est le plissement. Des raisons biologiques semblent aussi appuyer l'idée que la mer profonde n'est pas un caractère primordial de la face de la terre mais qu'elle s'est créée peu à peu. Nous lisons dans WALTHER (1) : « des faits biologiques d'ordre général, la position stratigraphique de la faune abyssale actuelle, de même que des recherches tectoniques, nous amènent à la conviction que la mer profonde, comme milieu, ne caractérisait pas la terre des époques les plus reculées. Ses premières ébauches se placent aux temps où des mouvements orogéniques commencent à se manifester au sein des continents et à produire à la surface du globe de si notables déformations » Les fractures de l'enveloppe de sial qui mirent au jour pour la première fois la sphère de sima peuvent avoir été semblables aux fossés d'affaissement de l'Afrique orientale actuelle. Elles s'ouvrirent à mesure que le sial se plissait. Ce fut un processus que nous pourrions comparer à la manière dont s'ouvrirent les lanternes vénitienes sphériques. D'un côté : l'ouverture, de l'autre le plissement. Selon toute probabilité, c'est la surface occupée par l'Océan Pacifique considéré d'une façon générale comme très ancien qui fut dépouillée la première de son revêtement de sial. Un émiettement des bords de cette grande fracture dut se produire déjà au moment de sa formation pour continuer lors de son élargissement. Peut-être que lors du déplacement vers l'ouest de l'ensemble des masses continentales, de petits fragments de sial se détachèrent encore. Tous ces débris restèrent plantés dans le sima et ils forment actuellement des îles ou des élévations sous-marines. Les rangées d'îles du Pacifique affectent un parallélisme remarquable : ARLDT en compte dix-neuf qui toutes s'orientent à peu de chose près vers le nord 62° ouest (2). Peut-être est-il permis d'admettre que cette striation du Pacifique nous indique l'ancienne direction des translations qui provoquèrent l'ouverture de ce bassin ou du moins son élargissement. Il ne serait pas inconcevable que les vieux plissements des massifs gneissiques du Brésil, de l'Afrique, de l'Inde et de l'Australie représentassent l'équivalent de l'ouverture du Pacifique. En Afrique, la plus récente de ces directions de plissement qui est à peu près nord-sud correspondrait bien à l'alignement des îles du Pacifique (puisqu'elle forme avec lui un angle de 90°).

(1) WALTHER, *Über Entstehung und Besiedelung der Tiefseebecken*. Naturwiss Wochenschrift. N. F. 3. Bd., Heft. 46. (référence de ECRARDT).

(2) ARLDT, *Handbuch der Paläogeographie*, 1, 231-232. Leipzig, 1917.

Les contractions que subit l'écorce sialique durent avoir pour effet de l'épaissir et par là de la faire surgir davantage tandis que les bassins abyssaux devenaient plus spacieux. Aussi les transgressions de la mer sur les continents durent-elles, dans leur ensemble, diminuer de plus en plus d'amplitude au cours de l'histoire du globe indépendamment de leurs changements de place. Cette loi est universellement reconnue ; nos trois cartes reconstructives (fig. 1 et 2), la mettent très nettement en évidence.

Il importe de noter que les modifications de la croûte de sial n'ont

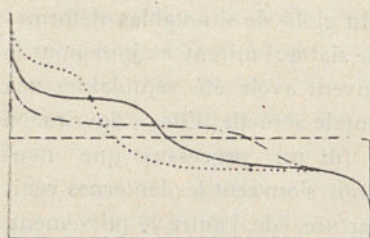


Fig. 29. — Courbes hypsographiques de l'écorce terrestre.

— future, — présente — ancienne
— primitive (en même temps niveau moyen de l'écorce).

pu s'opérer que dans un sens, alors même que les forces agissaient tantôt dans une direction, tantôt dans l'autre. En effet, les tractions ne peuvent pas dérouler les plissements d'une masse continentale : elles n'y produisent tout au plus que des déchirures. Elle ne sont pas à même de neutraliser le résultat des compressions ; le va et vient des forces

a donc des effets progressant unilatéralement et qui sont la compression et le morcellement. Ainsi, au cours des temps, la couverture sialique diminue sans cesse de surface et augmente d'épaisseur ; mais elle se fragmente aussi de plus en plus. Ces phénomènes se complètent et sont les effets d'une même cause. La figure 27 porte les courbes hypsographiques que notre hypothèse nous permet de construire. Elles se rapportent au passé, au présent et à l'avenir. Le niveau moyen actuel représente en même temps celui de la surface primitive de la sphère de sial, encore intacte.

Nous ne savons pas encore grand'chose de la structure interne des masses de sial. Pour expliquer le fait qu'elles possèdent en maint endroit des volcans, servant d'exutoire au magma simatique, STÜBEL se sert de l'hypothèse généralement admise, que dans les socles de sial rigide ou du moins très résistant, des masses de sima liquide ou relativement liquide (réservoirs magmatiques périphériques) se trouveraient incluses et alimenteraient les éruptions. D'autre part, on ne saisit pas la raison pour laquelle les composants du sial et du sima qui ne diffèrent pas de beaucoup, devraient se répartir ou s'être répartis en zones entièrement distinctes. Il est bien plus vraisemblable d'admettre

dès l'abord un passage graduel de l'un à l'autre. Je me représente donc, pour le moment, l'écorce de sial de la façon suivante (schéma fig. 30). Tout en haut : une zone de sial continu avec çà et là des inclusions de sima; au milieu : une zone d'indentation, c'est-à-dire où les deux masses se pénètrent mutuellement sans perdre leur cohésion et en bas : une zone de sima continu emprisonnant des masses détachées de sial. La structure primitive de l'écorce sialique dut tout au moins se rapprocher quelque peu de celle qu'indique ce schéma. Par compression, cette écorce peut se débarrasser de ses enclaves de sima; dans ce cas, la plus grande partie de ce sima intrusif sera refoulée vers le bas, le reste pourra l'être vers le haut (volcans) et s'épancher en nappes à la surface du sol. Lors des grandes translations continentales, il se forme à la base des masses sialiques une sorte

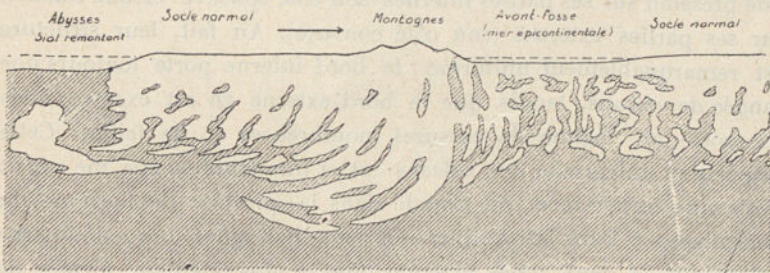


Fig. 30. — Coupe à travers un socle continental.

de surface de glissement caractérisée par un changement particulièrement rapide de la composition minéralogique des roches

Une pareille structure pourrait expliquer maint phénomène : par exemple, elle ferait comprendre pourquoi sur la trace de certains socles en dérive (comme l'Australie) le fond abyssal présente de nombreuses élévations que l'on hésite à faire appartenir soit au fond lui-même, soit aux socles. De même, le fait que le bord supérieur de la masse continentale conserve son contour alors que ses parties profondes s'étirent (parages de l'Islande) nous devient aisément compréhensible. Enfin, l'on pourrait peut-être expliquer la mobilité (*Labilité*) des géosynclinaux, en supposant que la croûte de sial y comprend jusque dans ses parties supérieures des inclusions particulièrement fréquentes et volumineuses de sima. Et ces inclusions, en vertu de leur densité plus forte, maintiendraient dans ces zones la surface du sol à un niveau plus bas qu'ailleurs et par leur plus grande

fluidité, elles augmenteraient la mobilité de l'ensemble dans le sens vertical en facilitant de ce fait le fléchissement dû à l'apport des sédiments. Pour les mêmes raisons, une semblable zone doit être prédestinée au plissement ; il suffit pour cela qu'elle soit soumise à des poussées tangentielles. Les grands épanchements de laves qui sont toujours en relation avec l'orogénèse confirmeraient cette manière de voir. En effet, le plissement ferait jaillir au dehors le sima des inclusions.

La surface terrestre nous offre d'ailleurs bien d'autres raisons de croire que le volcanisme consiste essentiellement en une expulsion passive des masses de sima noyées dans le sial. Les guirlandes arquées nous en fournissent le meilleur exemple. En effet, les forces tendant à donner à la guirlande sa forme de croissant, doivent exercer une pression sur ses parties internes (son côté concave) et une traction sur ses parties externes (son côté convexe). Au fait, leur structure est remarquablement uniforme : le bord interne porte toujours une rangée de volcans, tandis que le bord externe en est exempt, mais comporte un régime de cassures nombreuses et de failles. Cette disposition universelle des volcans est si frappante qu'elle me paraît avoir une importance très grande dans la question de l'origine du volcanisme. « Dans les Antilles, on peut distinguer une zone interne volcanique et deux zones externes dont la plus orientale, formée de dépôts récents, a les plus faibles altitudes (Suess). Ce contraste apparaît également dans les Moluques (Brouwer) et en Océanie (Arldt) ; le volcanisme est très actif dans la zone interne tandis qu'il est en régression dans la zone externe. L'analogie de cette disposition avec celle que l'on observe dans les zones soumises aux poussées orogéniques telles que l'arrière-pays carpathique ou varisque saute aux yeux » (1). Le Vésuve, l'Etna et le Stromboli ont une position qui correspond à ce schéma. Aux Antilles du Sud, c'est précisément l'arc le plus voisin du centre, celui des Sandwich du Sud qui est basaltique et l'un de ses volcans est encore en action. Les Iles de la Sonde nous offrent, selon Brouwer (2), une particularité tout à fait intéressante : des deux rangées d'îles par quoi cet archipel se termine

(1) W.-V. LOZINSKI, *Vulkanismus und Zusammenschub*. Geol. Rundschau, 9, p. 65-98, 1918.

(2) H. A. BROUWER, *On the Non-existence of Active Volcanoes between Pantar and Dammer* (East Indian archipelago), in *Connection with the Tectonic Movements in this Region*. Kon. Akad. van Wetensch. te Amsterdam Proceed. Vol. XXI, Nos 6 et 7, 1917. — *Über Gebirgsbildung und Vulkanismus in den Molukken*. Geol. Rundsch. 8, fascic. 5/8, p. 197-209, 1917.

au sud, celle du nord, dont l'arc est régulier, porte des volcans, alors que celle du sud (arc de Timor) qui a déjà cédé sous la poussée du socle Australien, en est dépourvue. Mais la rangée nord commence aussi à subir le contre-coup de cette poussée et cela près de Wetter; or précisément à cet endroit le volcanisme a cessé, chez elle aussi, parce que la force tendant à accuser sa courbure décroît. BROUWER fait aussi remarquer que les récifs de corail surélevés ne se trouvent que là où le volcanisme fait défaut ou s'est éteint, ce qui signifie également que ce sont des zones soumises à un effort de compression. Le fait paradoxal à première vue, que le volcanisme cesse où la compression commence, trouve dans le cadre de nos idées une explication toute naturelle.

CHAPITRE XI

Plissement et disjonction.

En 1878 déjà, ALBERT HEIM, dans son ouvrage classique sur le mécanisme de la formation des montagnes ⁽¹⁾ développait l'idée que les grandes chaînes plissées résultent d'une notable compression de l'écorce terrestre. Cette idée fut amplement confirmée, dans la suite, par la découverte des nappes de charriage. Nous avons vu que ces nouvelles conceptions amenèrent HEIM à porter au quart et même au huitième la valeur de la compression alpine qu'il estimait précédemment n'atteindre que la moitié. Plus tard, AMPFERER admit que par un mouvement de flux, les couches profondes viennent se rencontrer sous la chaîne et se portent ensuite vers le bas (courants profonds). Ce flux entraîne avec lui les assises supérieures. KOSSMAT a fait voir, tout récemment, que la torsion des chaînes et leur fréquente disposition en éventail ne sont possibles que sous l'effet de grands déplacements horizontaux ; « bien des traits du relief et de la structure de la terre nous montrent que, pour expliquer la formation des montagnes, il faut compter sur l'existence de mouvements tangentiels de grande envergure » ⁽²⁾. Cette conception est presque identique à la nôtre ; car ce n'est pas aller beaucoup plus loin que d'attribuer les chaînes de l'Himalaya à la compression d'un vaste compartiment de l'écorce terrestre, compartiment dont l'extrémité sud, représentée par l'Inde péninsulaire, se trouvait jadis aux côtés de Madagascar.

La théorie des poussées horizontales se développe peu à peu mais il en existe une série d'autres suivant lesquelles la surrection des montagnes est due à des agents dynamiques internes, tels que les forces volcaniques, la pression exercée par des cristaux en voie d'accroissement, des transformations chimiques ou encore les intrusions mag-

⁽¹⁾ [A. HEIM, *Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung*. Bâle 1878].

⁽²⁾ F. KOSSMAT, *Erörterungen zu A Wegeners Theorie der Kontinentalverschiebungen*, *Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde z. Berlin* 1921, p. 103.

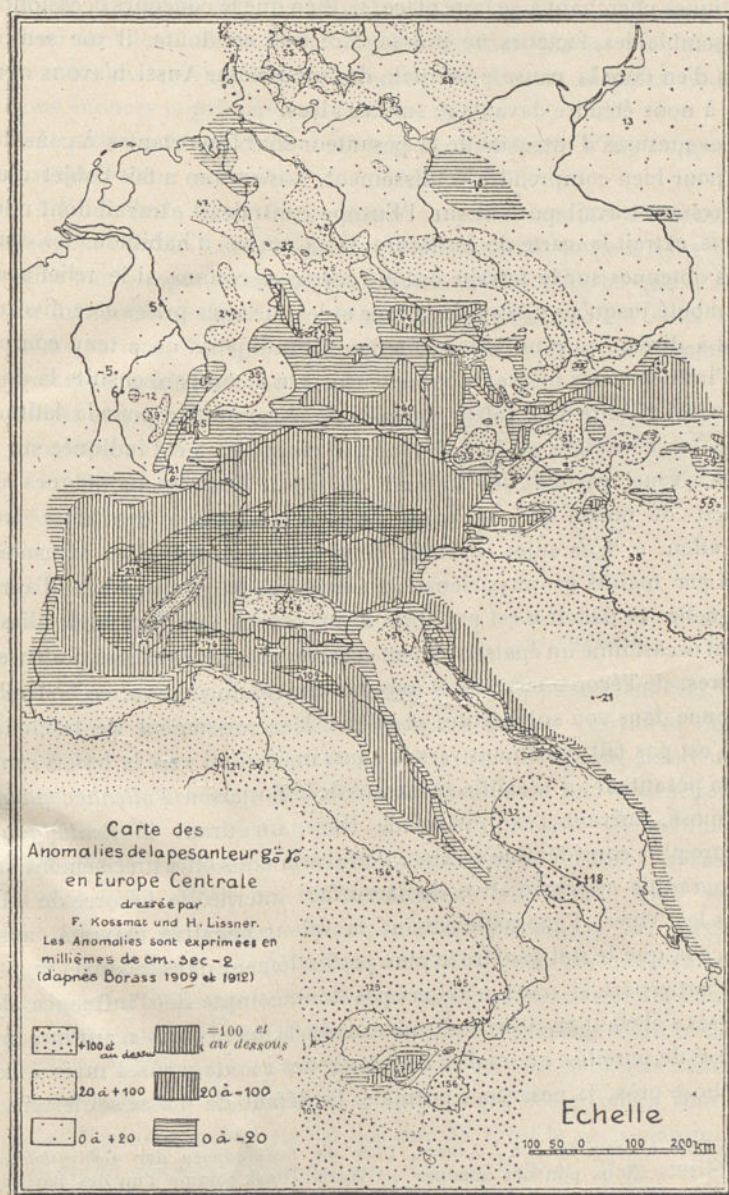


Fig. 31. — Variations de la pesanteur dans les régions montagneuses (d'après KOSSMAT.)

matiques cherchant à se faire place (1). Bien que le concours occasionnel de semblables facteurs ne puisse être mis en doute, il me semble vain d'en faire la cause principale de l'orogénèse. Aussi n'avons-nous pas à nous étendre davantage sur ces idées.

Les mesures d'intensité de la pesanteur sont importantes à considérer pour bien comprendre le plissement. KOSSMAT en a fait l'objet d'un intéressant travail portant sur l'Europe centrale (2), travail dont nous avons extrait la carte de la figure 31. Comme d'habitude, les données obtenues sur le terrain ont été corrigées comme si le relief avait été raboté jusqu'au niveau de la mer et les mesures prises à ce niveau; c'est-à-dire qu'en plus de la réduction altitudinaire, on a tenu compte de l'influence des masses montagneuses. On a comparé ensuite la donnée ainsi réduite à la valeur normale de la pesanteur pour la latitude du point considéré et la différence, l'anomalie, a été indiquée sur la carte. Nous voyons dès l'abord qu'il y a sous les montagnes un déficit de masse qui, au point de vue isostatique compense leur élévation. « A ce sujet, il suffit de s'en référer aux idées exprimées déjà par maints géophysiciens, de même que par HEIM, idées d'après lesquelles ce déficit n'est pas dû à des vides mais au fait que le plissement occasionne un épaissement considérable des parties supérieures, légères, de l'écorce terrestre et que, pendant sa formation, ce bourrelet enfonce dans son substratum plastique. L'accroissement de la chaîne ne s'est pas fait seulement vers le haut, mais aussi vers le bas, à cause de la pesanteur; à la saillie au-dessus de la flottaison (*Fallenhochgang*), s'oppose, suivant l'expression de HEIM, un tirant (*Fallentiefgang*) encore plus considérable ». Ainsi, cette carte nous offre précisément une topographie approximative de la surface interne de l'écorce de sial; sous les Alpes, l'anomalie atteint sa valeur négative maxima, aussi est-ce là que le sial pénètre le plus profondément dans le sima.

D'autre part, si nous n'avions pas tenu compte de l'influence des masses s'élevant au-dessus du niveau de la mer, nous n'aurions pas trouvé de pareilles anomalies dans les zones montagneuses mais, à peu de chose près, la pesanteur normale. Le défaut de masse souterrain et

(1) Voir à ce propos K. ANDRÉE, *Über die Bedingungen der Gebirgsbildung* Berlin 1914. Nous pouvons nommer ici WATHER PENK comme l'un des partisans les plus convaincus de la théorie des intrusions. (*Die Entstehung der Gebirge der Erde*, Deutsche Revue, sept.-oct. 1921).

(2) F. KOSSMAT, *Die Mediterraneen Kettengebirge in ihrer Beziehung zum Gleichgewichtszustande der Erdrinde*. Abh. d. Math.-Naturw. Kl. d. Sächs. Akad. d. Wiss. 38, n° 2, Leipzig 1921. — *Die Beziehungen zwischen Schwereanomalien und Bau der Erdrinde*, Geol. Rundsch. 12 Heft 3/5, p. 165-189, 1921.

l'excès de masse dû aux altitudes se compensent. L'isostasie règne aussi dans les chaînes de montagnes. Comme cela est vrai aussi bien pour les chaînes anciennes que pour les chaînes récentes, nous pouvons énoncer le principe suivant :

Le plissement des chaînes de montagnes résulte d'une compression, l'isostasie étant maintenue.

A l'aide de la figure 32, le lecteur se rendra compte aisément, de ce que cela signifie. Lorsqu'une masse continentale, flottant dans le sima, subit une compression, son épaissement doit être tel que le rapport des hauteurs calculées de part et d'autre du niveau du sima reste le même partout. Puisque nous attribuons aux socles continentaux une épaisseur totale de 100 kilomètres et qu'ils émergent de 5 kilomètres, ce rapport est de 1/20. Par conséquent, la masse refoulée vers le bas, lors de la compression, doit atteindre une épaisseur 19 fois plus grande que celle qui fait saillie au dehors. Les montagnes ne re-

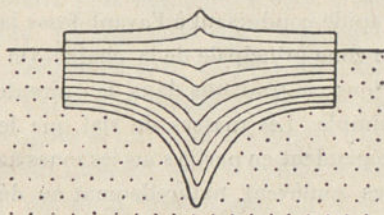


Fig. 32. — Compression avec maintien de l'isostasie.

présentent de ce fait qu'une très petite partie du plissement réel. Seules participent à leur formation, les couches qui se trouvaient déjà au-dessus du niveau abyssal. Toutes celles qui lui étaient inférieures se maintiennent durant le plissement au-dessous de lui, abstraction faite des accidents locaux. Au cas où une couverture sédimentaire de 5 kilomètres d'épaisseur occupait l'emplacement du futur plissement, la chaîne, au début, en est entièrement constituée. Mais pendant l'érosion des sédiments, la compensation isostatique fait surgir une chaîne centrale formée de terrains anciens. Quand la couverture sédimentaire est totalement décapée, une large zone ancienne, de hauteur à peu près égale, se dresse. Comme exemple du premier stade, nous pouvons citer l'Himalaya et ses chaînes voisines. Ce sont des sédiments plissés, soumis à une érosion si intense que les glaciers sont presque entièrement recouverts par des éboulis. C'est le cas, notamment du plus grand glacier du Kara-Korum, celui de Baltoro ; il ne possède pas moins de 16 moraines médianes, bien que sa largeur n'atteigne que 1 1/2 à 4 kilomètres (sa longueur est de 56 kilomètres). Les Alpes en sont au deuxième stade : leur zone centrale est occupée déjà par des roches anciennes, alors que leurs zones marginales sont encore recou-

vertes de sédiments. Comme l'érosion est bien moins active dans la roche ancienne, les glaciers alpins sont pauvres en moraines et c'est une des principales raisons de leur beauté. Les montagnes de la Norvège, enfin, représentent le troisième stade : la couverture sédimentaire a disparu et l'ascension de la chaîne primitive est terminée. Ainsi l'isostasie se maintient également pendant l'élimination de la couverture sédimentaire.

Il nous faut encore traiter en quelques mots la question de la dissymétrie qu'offre presque toujours le profil transversal des chaînes plissées. En règle générale, une zone montagneuse possède un versant faiblement incliné qui comprend souvent des préalpes et un versant rapide conduisant à l'avant-fosse laquelle, de ce fait, borde étroitement la zone principale de la chaîne. On a déjà beaucoup écrit sur ce sujet. Nous en trouvons dans le cadre de nos théories une explication très simple. Les masses de sial que le plissement refoule vers le bas se répandent en partie sous les zones non plissées bordant la chaîne et elles les soulèvent, naturellement au dépens de la hauteur des montagnes. Ces masses sialiques ne se répartissent également des deux côtés du plissement que dans le cas où l'écorce ne se déplace pas sur le sima. Si elle est animée d'une translation — autre que celle qu'exige sa compression orogénique — c'est-à-dire d'une translation d'ensemble (ce qui sera presque toujours le cas), le sial fondu ne se répandra que d'un seul côté. Les socles européens et asiatiques tendent depuis longtemps sans doute à se rapprocher de l'équateur; ils dérivent vers le sud par rapport au sima. De plus, ils prennent part, selon toute probabilité, au déplacement des continents vers l'ouest. Leur mouvement réel est donc dirigé vers le sud-ouest. Par conséquent, la diffusion du sial profond devra s'opérer du côté nord-est des chaînes.]

Et c'est le cas effectivement; la figure 31 nous le prouve. Le transfert présumé des zones d'anomalie ou, ce qui revient au même, du sial refoulé en profondeur est particulièrement marqué dans la région des Apennins. Le déficit de masse causé par la présence des Alpes se fait sentir à bonne distance vers le nord-est et cela jusqu'à la limite nord de la Bohême. On peut le constater encore en Allemagne moyenne. Inversement, une zone d'anomalies positives empiète sur le versant sud des Alpes. Sous les régions plissées qu'elle embrasse, le sial de la base ne fait donc pas encore saillie dans le sima. D'ailleurs, l'isostasie est loin d'y être réalisée, ce qui est aisé à comprendre. Car, pour qu'elle le soit, il faudrait que le niveau anormalement élevé de

la base du socle correspondît à une diminution de l'épaisseur totale de celui-ci ; autrement dit, ces régions devraient être déprimées et se trouver en tous cas au-dessous du niveau de la mer. Les hautes altitudes qu'elles présentent au contraire impliquent donc un écart isostatique. En effet : la bande d'écorce dont il s'agit peut être maintenue notablement au-dessus de son niveau d'équilibre parce qu'elle fait corps avec son entourage. Il est vrai que la carte de Kossmat ne nous renseigne pas immédiatement sur ces écarts isostatiques.

JAMES HALL fit observer le premier que, dans les montagnes, l'épaisseur des sédiments est toujours plus grande que dans les régions non plissées qui les entourent. Cela signifie que dans la zone d'où surgira la chaîne, les dépôts s'accumulent plus rapidement qu'ailleurs. Cette règle se trouve vérifiée partout. Elle a donné beaucoup à réfléchir aux géologues. Comme il s'agissait de couches souvent épaisses de plusieurs kilomètres et qui pourtant durent s'être amassées en eau peu profonde, il fallut admettre que la sédimentation s'accompagne d'un fléchissement du socle, maintenant au même niveau la surface des matériaux accumulés. Selon HALL, c'est un mouvement isostatique dû au poids des dépôts eux-mêmes et comparable à celui des socles qui subissent la charge d'un inlandsis. Mais, voyons pour quelles raisons le plissement se manifeste précisément dans les zones de forte accumulation sédimentaire. Ces zones ont reçu le nom de géosynclinaux. HAUG énonce comme suit la loi qui les concerne : « Les chaînes de montagnes se forment sur l'emplacement des géosynclinaux » (1). Peut-être conviendrait-il plutôt de dire : sur l'emplacement des mers épicontinentales (*Schelfe*), car une plateforme bordière, comme par exemple celle d'où surgissent les Andes sud-américaines, ne peut guère être qualifiée de dépression. Le fait que le plissement affecte de préférence les régions épicontinentales peut avoir plusieurs causes. Nous avons dit déjà que ces régions renferment peut-être des enclaves de sima particulièrement nombreuses (et de grandes dimensions), enclaves qui auraient pour effet d'augmenter leur plasticité. Il se peut aussi que la croûte terrestre y ait une épaisseur moindre et par là une plus faible résistance. READE fait observer que les roches primitives refoulées vers la profondeur par l'entassement énorme des sédiments atteignent une température élevée qui les rend plus plastiques. Toutes ces causes, enfin, peuvent agir simultanément.

(1) HAUG, *Traité de géologie I. Les phénomènes géologiques*, p. 160, Paris 1907.

Si nous considérons la répartition générale des plissements sur le globe, nous verrons qu'il existe deux zones principales d'orogénèse : l'une comprend le bord antérieur des socles en dérive, l'autre suit l'équateur. L'ère tertiaire qui comporte les derniers grands mouvements orogéniques nous le prouve tout spécialement ; en effet, nous y voyons les plissements les plus importants de former d'une part, sur le front des socles américains et australo-néoguinéens, de l'autre dans la zone équatoriale d'alors (Atlas, Alpes, Caucase, Himalaya). Le plissement sur le bord d'attaque des radeaux continentaux semble à première vue difficilement concevable, car enfin le sima doit être la plus plastique des deux matières en présence. Mais il nous faut nous rappeler ici que nous les avons comparées, l'une à de la cire ordinaire, l'autre à de la cire à cacheter. Bien que le socle de sial puisse être

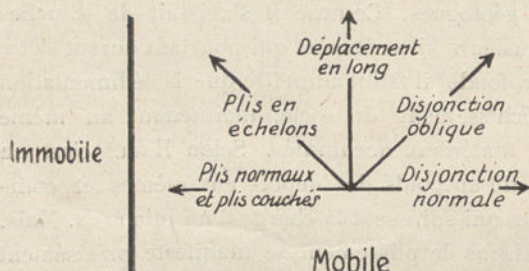


Fig. 33. — Plissements et disjonctions résultant du déplacement relatif des socles.

considéré comme « solide », au même titre que la cire ordinaire, il est cependant plissé, lorsque les forces translatrices dépassent une certaine limite. Le sima, par contre,

cède en coulant, comme la cire à cacheter, mais il lui faut pour cela un temps extraordinairement long.

Dans leur ensemble, les deux genres de plissements précités : plissements sur le bord avancant et plissements à l'équateur, correspondent aux deux mouvements des socles continentaux : la dérive vers l'ouest et la dérive vers l'équateur (*Polflucht*). Cette règle s'applique également aux temps plus anciens tels que le Carbonifère ; le plissement principal des Andes, de même que les chaînes, qui, de l'Amérique du Nord, se poursuivent à travers l'Europe et l'Asie dans la zone équatoriale de cette époque, sont là pour nous le prouver.

On remarque très fréquemment que les chaînes parallèles d'un ensemble montagneux s'échelonnent obliquement ; chacune vient à son tour poindre au bord du massif pour s'effacer aussitôt. Ce phénomène se produit lorsque les deux socles en présence ne s'abordent pas de front, mais obliquement. La figure 33 offre un schéma des divers effets produits par le déplacement relatif des socles : le socle de

gauche est supposé immobile, celui de droite mobile. Si ce dernier se dirige normalement au front de son obstacle, il en résultera des plis de grandes dimensions (nappes de recouvrement) ; s'il s'en approche obliquement, nous aurons les plis en échelons décrits plus haut, lesquels seront d'autant plus serrés et plus bas que la dérive tendra à être parallèle au plan de contact des masses. Lorsque ce parallélisme sera atteint, il se produira à la jointure des socles une surface de glissement par déplacement en long. Enfin, si la composante s'écarte de la ligne de partage des socles, nous serons en présence d'une disjonction oblique ou normale qui apparaîtra au début sous la forme d'un fossé d'affaissement. On peut aisément rendre sensible le rapport des plis normaux aux plis en échelons au moyen d'une pièce d'étoffe : il suffit d'en immobiliser une partie en la surchargeant et de mouvoir le reste.

Il ressort de ces considérations générales que le plissement et la disjonction sont les effets d'une seule et même cause : la translation relative des compartiments de sial et que les plis en échelons et les déplacements en long sont les termes intermédiaires du passage graduel de la compression à l'écartement. Aussi convient-il de nous occuper également du phénomène de la disjonction.

Le plus bel exemple de disjonction nous est offert par les fossés de l'Afrique orientale (fig. 34). Ils appartiennent à un système de fractures qui se prolongent par la Mer Rouge, le golfe d'Akaba et la vallée du Jourdain jusqu'aux chaînes tauriques. D'après des recherches récentes, on peut en suivre la trace jusque dans la Colonie du Cap, mais c'est bien en Afrique orientale qu'ils présentent le plus d'ampleur (1).



Fig. 34. — Les fossés de l'Afrique orientale d'après SUPAN.

... fossés, ■ parties des fossés envahies par l'eau.

(1) OSKAR ERICH MEYER *Die Brüche von Deutsch-Ostafrika*. Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Paläont. Beil.-Bd. 38, p. 803-884, 1915.

NEUMAYR-UHLIG (1) en fait à peu près la description suivante. Un fossé, large de 50 à 80 kilomètres s'étend à partir de l'embouchure du Zambèze vers le nord, en embrassant le Chiré et le lac Nyassa ; il s'infléchit ensuite vers le nord-ouest et se perd. Le fossé du Tanganyka qui s'amorce à peu de distance de sa portion terminale le remplace en adoptant sa direction. Ce fossé représente un affaissement considérable, à en juger par les profondeurs de 1.700 à 2.700 mètres qu'atteint le lac de ce nom et les altitudes de 2.000, 2.400 et même 3.000 mètres auxquelles s'élève l'escarpement en forme de muraille qui le borde. Le fleuve Roussisi et les lacs Kivou, Albert Edouard et Albert l'occupent plus au nord. « Les bords de l'affaissement paraissent surélevés : comme si les parties subitement disjointes par l'éclatement s'étaient animées d'un mouvement ascendant. Le fait que le Nil prend sa source immédiatement à l'est du versant du Tanganyka en laissant ce lac s'écouler dans le Congo, est dû certainement à cette saillie particulière du bord des plateaux ». Un troisième fossé, bien marqué, débute à l'est du lac Victoria. Il renferme plus au nord le lac Rodolphe, puis se tourne vers le nord-est, borde le massif abyssin et se prolonge, d'un côté dans la Mer Rouge, de l'autre dans le Golfe d'Aden. Sur le littoral et à l'intérieur de l'Est-Africain, ces ruptures se présentent le plus souvent sous forme de gradins, s'abaissant vers l'est (2).

Le grand domaine triangulaire compris entre l'Abyssinie et la presqu'île des Somali (entre Ankober, Berbera et Massua) offre un intérêt spécial. La carte (fig 34) l'indique en ponctué, comme le fond des fossés. C'est un pays relativement plat, de faible altitude et qui est entièrement constitué par des laves volcaniques récentes. La plupart des auteurs estiment qu'il se trouve entre les deux bords d'une fente considérablement élargie. Cela ressort avant tout du fait qu'il s'avance dans la Mer Rouge en rompant manifestement le parallélisme de ses côtes. On pourrait loger exactement dans l'entaille qu'il occupe le promontoire angulaire que forme l'Arabie, vis-à-vis. Nous avons dit ailleurs qu'il s'agit ici de masses de sial, détachées des profondeurs du massif abyssin, qui se sont répandues vers le nord-est pour se porter vers la surface, en arrivant au bord du socle. Peut-être qu'à ce moment la faille s'était déjà remplie de sima et que les masses sialiques s'en coiffèrent au cours de leur ascension. Mais il se

(1) NEUMAYR-UHLIG, *Erdgeschichte* 4, Allgem. geol., 2^e édit. p. 367, Leipzig et Vienne 1897.

(2) Voir à ce propos les cartes de E. OBST figurant le pays arrasé, faillé et sans écoulement de la partie nord-orientale de l'Est Africain.

peut également que ces masses aient possédé de grandes enclaves de sima qui furent, dans la suite, chassées au dehors, comme cela se produisit en Islande. L'élévation du domaine entier au-dessus du niveau des abysses nous indique en tous cas la présence de masses sialiques sous la couverture de laves.

Les fractures africaines disposées en une sorte de réseau, doivent s'être formées à une époque rapprochée de la nôtre. A plus d'un endroit, elles traversent des laves basaltiques récentes. En un point, elles affectent des formations pliocènes d'eau douce. En tous les cas, elles ne peuvent pas s'être constituées avant la fin des temps tertiaires; elles auraient existé déjà au Quaternaire ancien, si l'on s'en rapporte aux terrasses littorales des lacs sans écoulement qui occupent le fond des fossés. Le Tanganyka est relativement ancien ainsi que l'atteste sa faune reléguée qui, selon toute apparence, était marine au début et dut s'adapter à l'eau douce. Les fréquents tremblements de terre, de même que le volcanisme intense affectant la zone de dislocation, nous prouvent que la disjonction se poursuit certainement encore aujourd'hui.

Nos théories n'interprètent d'une manière nouvelle le mécanisme de

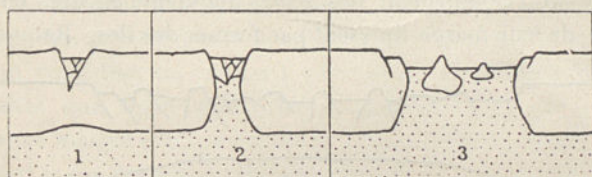


Fig. 35. — Disjonction (schéma).

la formation de semblables fossés que dans la mesure où ces derniers représentent l'amorce d'une séparation complète de masses continentales. Ils peuvent être l'exemple de disjonctions récentes non encore terminées aussi bien que des premiers stades d'un écartement qui s'est arrêté par suite de la rémission des forces tractives. Une séparation complète s'effectuerait, selon nous, à peu près de la manière indiquée schématiquement à la figure 35. La déchirure ne s'ouvre tout d'abord que dans les couches superficielles qui sont les plus cassantes tandis que les couches profondes s'étirent. Comme des parois verticales ne peuvent s'élever à une grande hauteur, vu l'insuffisante résistance des roches à la compression, ils se forment en même temps que la crevasse ou au lieu de celle-ci, des surfaces de glissement obliques

donnant naissance à de nombreux séismes locaux. Ainsi le fossé d'affaissement n'a jamais qu'une profondeur modérée; son fond consiste en paquets effondrés, de même roche que ses bords. A ce moment de sa formation, le fossé n'est pas encore compensé au point de vue isostatique. C'est, d'après E. KOHLSCHÜTTER, (1) le cas d'une grande partie des fossés récents de l'Est-africain. Il existe ainsi un déficit de masse; l'anomalie de la gravité qui lui correspond peut être mesuré. En outre, les lèvres de la fracture s'élèvent pour rétablir l'équilibre isostatique de telle sorte que le fossé paraît occuper tout au long le faite d'un anticlinal. La Forêt Noire et les Vosges que sépare l'affaissement rhénan offrent un exemple bien connu de cette saillie marginale. Enfin, quand la fente a gagné la base du socle, le sima la remplit; le déficit de masse qui régnait jusqu'alors est comblé et le fossé obéit désormais aux exigences de l'isostasie. Son fond, dans la plupart des cas, sera recouvert encore de paquets effondrés mais si la disjonction suit son cours, il est clair que le sima y affleurera tôt ou tard. D'après TRIULZI et HECKER, le grand fossé de la Mer Rouge est déjà compensé isostatiquement; son élargissement aurait donc atteint le point où, aux endroits les plus profonds, le sima est à découvert. Si l'éloignement des socles augmente encore, les parties détachées de leur marge finissent par former des îles. Remarquons à

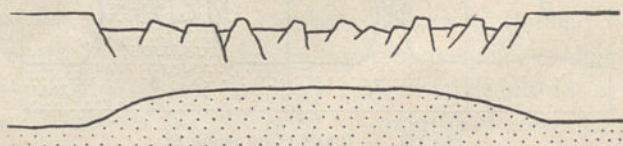


Fig. 6. — Grand affaissement provoqué par l'étirement de la base (schéma).

ce propos que ces fragments, même s'ils atteignent ou dépassent le niveau des surfaces continentales, n'ont aucunement besoin d'avoir l'épaisseur des grands socles. Il suffit que leur partie baignée par le sima soit notablement plus large que celle qui en émerge. Ici aussi, une seule condition doit être remplie; à savoir que le rapport des masses situées au-dessus et au-dessous du niveau des abysses soit le même que dans les grands radeaux continentaux. Toutes ces façons d'envisager la nature des fossés d'affaissement ne sont pas en contradiction avec les idées courantes, mais elles les complètent.

(1) E. KOHLSCHÜTTER, *Über den Bau der Erdkruste in Deutsch-Ostafrika*. Nachr. d. Kgl. Ges. der Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl., 1911.

Une déchirure peut se ramifier parfois (par exemple celle de la Mer Rouge qui se poursuit dans le réseau des fossés de l'Est africain) ; mais il peut arriver également que l'effondrement, au lieu d'être linéaire, affecte une vaste région. La Mer Egée en fournit le meilleur exemple. C'est un grand domaine morcelé très récemment et dont les compartiments disjoints s'affaissèrent à des profondeurs inégales. Nous sommes obligés d'admettre que les couches profondes de la lithosphère s'étirent et qu'ainsi les failles s'y perdent peu à peu. La valeur de l'extension peut être calculée à l'obliquité des plans d'affaissement, pour autant qu'ils sont indépendants (voir schéma fig. 36). C'est évidemment d'une manière analogue que s'est effondré, en bien des points, le pont qui unissait deux socles ; le détroit de Bass, qui sépare la Tasmanie de l'Australie, résulte d'un semblable phénomène. Toutefois, l'on voit aisément que la hauteur de ces affaissements est limitée et que la séparation complète des socles doit se faire longtemps avant que la surface des masses en plongée ait atteint le niveau des abysses. Nous nous représentons que la Manche, la Mer du Nord et autres régions, autrefois émergées de la plateforme de l'Angleterre commencèrent à se créer peu de temps avant que Terre-Neuve se sépare de l'Irlande. Mais elles n'étaient qu'à peine recouvertes d'eau aux temps qui précédèrent la complète disjonction de ces socles.

Si l'on considère les cassures principales de l'écorce de sial, on reconnaîtra que leur orientation géographique est de préférence méridienne malgré leurs nombreuses irrégularités de détail. C'est non seulement le cas des fossés africains et de la dépression rhénane, d'âge oligocène, mais aussi de la grande fente atlantique. En effet, si l'on tient compte de la position des pôles au Tertiaire, le tracé de cette fente dut être, au début, principalement sud-nord. Il en est de même de la fracture qui a découpé le bord oriental du socle africain. Enfin, le rétrécissement des continents vers le sud peut être attribué à de semblables déchirures aboutissant au pôle même.

CHAPITRE XII

Le bord des continents.

Au-dessous du niveau des abysses, le bord d'un socle continental offre une surface à peu près verticale. Le sial et le sima n'y sont pas superposés comme l'exigerait leur différence de densité. Cette disposition ne peut se maintenir que grâce à la solidité de la masse sialique, mais il en résulte un conflit entre les forces moléculaires du socle et celles qui tendent à rétablir l'ordre normal. Nous allons examiner les divers phénomènes qui découlent de cet état de choses.

SCHIÖTZ le premier, en examinant les mesures de la gravité effectuées sur le « Fram » en dérive au-dessus du bord du plateau continental de la mer polaire, reconnut que les observations faites au moyen du pendule révèlent à la limite des socles une anomalie caractéristique. Plus tard, HELMERT (1) en fit une étude détaillée dont nous avons extrait le graphique ci-joint (fig. 37). Lorsque, venant de l'intérieur, on s'approche de la côte, la pesanteur augmente graduellement pour atteindre son maximum à la côte même ; elle diminue ensuite rapidement et atteint son minimum au point au-dessous duquel commence le fond abyssal ; enfin, à une plus grande distance de la côte, elle redevient normale. On peut se représenter ainsi les causes de cette variation : l'observateur placé sur le continent, où il a relevé une pesanteur normale, voit cette dernière s'accroître et atteindre un maximum à la côte même parce qu'il se rapproche du sima abyssal, situé obliquement au-dessous de lui. Cet excès de pesanteur devrait être compensé, il est vrai, par le fait que l'eau de mer, légère, remplace le sima sur les quatre premiers kilomètres ; mais la cuvette océanique se trouve à côté et non au-dessous de l'observateur, par conséquent, au lieu de ramener la pesanteur à sa valeur normale, elle provoque une déviation du pendule répondant à une attraction exercée par le conti-

(1) HELMERT, *Die Tiefe der Ausgleichsfläche bei der Prattischen Hypothese für das Gleichgewicht der Erdkruste und der Verlauf der Schwerestörung vom Innern der Kontinente und Ozeane nach den Küsten*. Sitzber. d. Kgl. Preuss. Akad. d. Wiss. 18, p. 1192-1198, 1909.

ment. L'observateur placé sur mer fait, en approchant de la côte, l'expérience inverse : la valeur de la pesanteur est en rapport avec le défaut de masse existant au-dessous de lui, l'augmentation de masse, à côté de lui, ne peut avoir d'effet sur l'intensité, mais uniquement sur la direction de la pesanteur. De ce fait, nous aurons ici un minimum de gravité.

Cette variation doit se produire évidemment tout autour d'une île ou

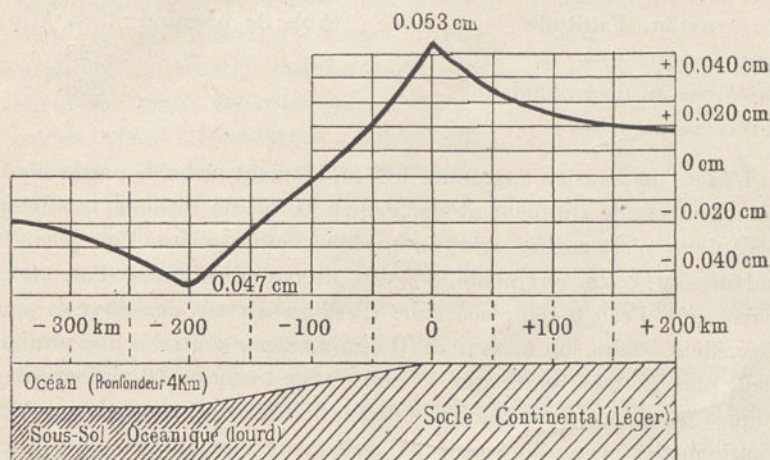


Fig. 37. — Anomalies de la pesanteur au bord du continent, d'après HELMERT.

d'un groupe d'îles formant le sommet d'un fragment de sial plongé dans le sima. Aussi la pesanteur présentera-t-elle un excès sur l'île même et tout spécialement sur ses côtes, tandis qu'elle sera en défaut dans une zone donnée, tout autour de l'île. Ainsi s'explique la constatation déjà faite naguère que les mesures obtenues au moyen du pendule accusent sur les îles océaniques une pesanteur anormale. L'opinion de quelques savants qui considèrent les îles du Pacifique comme de simples cônes volcaniques établis sur le fond abyssal et portés par celui-ci, n'est pas corroborée par les observations faites sur la gravité. Celles-ci parlent plutôt en faveur de l'idée soutenue notamment par GAGEL pour les Canaries et par HAUG pour nombre d'îles du Pacifique, qu'il s'agit de fragments de l'enveloppe sialique, parfois entièrement cachés sous les laves.

On peut examiner ces rapports d'une autre manière, plus propre encore à élucider leurs effets. Dans un socle continental, l'augmentation de la pression avec la profondeur doit suivre une autre loi que

dans la région océanique. Si nous comparons les pressions (τ) qui se manifestent de part et d'autre à une profondeur donnée, nous constatons que dans tout le bloc continental, sauf à sa surface et à sa base, la pression est plus forte que dans le tréfond des abysses. En prenant pour base le tableau comparatif de la figure 5 (p. 24), nous obtenons pour cet excès de pression de l'intérieur des socles continentaux les valeurs suivantes :

à 100 m. d'altitude	excès de pression :	0 Atm.
à 0 m. —	— — :	28 —
à 4.700 m. de profondeur	— à :	860 —
à 100 000 m. —	— — :	0 —

L'excès de pression augmente très rapidement dans la partie supérieure du socle simplement parce qu'à la même altitude la région océanique n'est encore occupée que par l'atmosphère. Plus bas, la valeur de cette augmentation se trouve diminuée d'un tiers parce que l'eau a remplacé l'air. C'est au niveau des abysses que l'excédent atteint son maximum. Il diminue, par contre, à une profondeur plus grande, parce que le sima pesant occupe la région océanique (où la pression s'élève rapidement). Enfin, à la base des masses continentales, l'équilibre doit naturellement être atteint. Ces différences de pressions déterminent aux parois verticales des socles un champ de tension qui tend à repousser la matière des continents dans les bassins océaniques et surtout dans la couche du fond abyssal (2). Si le sial était fluide, il se répandrait dans cette couche. Mais ce n'est pas le cas. Il est cependant assez plastique pour céder de façon appréciable à cette forte pression. On le voit aux ruptures en gradins qui, en règle générale, affectent le bord des socles (fig 38). C'est aussi à cause de cette intumescence latérale des assises profondes, plastiques, que les bords des socles disjoints tels que ceux de l'Amérique du Sud et de l'Afrique ont gardé un parallélisme plus rigoureux dans leurs parties supérieures (lignes de rivages) qu'au pied de leur talus bathyal.

(1) A proprement parler : les pressions verticales. D'après RUDZKI un élément de forme cubique d'un corps solide est soumis en tout à six pressions distinctes : à savoir : trois pressions normales comprimantes et trois pressions tangentielles cisailantes. La dilatation pouvant être regardée comme une pression négative, l'on divisera les pressions en positives et négatives. Dans le cas présent, les forces cisailantes sont considérées comme inexistantes.

(2) D'après WILLIS, c'est exactement l'inverse, la roche lourde du fond de l'océan pénétrerait, peu à peu, dans le soubassement des masses continentales (*Research in China* 1, 115 ff., Washington 1907).

Il n'est pas étonnant que les phénomènes volcaniques se produisent si souvent près des côtes. Car, sous l'effet du champ de tension précité, les enclaves de sima peuvent être finalement chassées au dehors. Ceci s'applique surtout aux îles océaniques, entourées naturellement d'un semblable champ.

A la marge des socles continentaux, plastiques, supportant un inlandsis, des forces particulières doivent se manifester. Lorsqu'une masse plastique est surchargée, son pourtour se fendille parce qu'elle s'étale en diminuant d'épaisseur. Ainsi s'explique la formation des fjords que l'on trouve sur toutes les côtes jadis envahies par les glaces (Scandinavie, Groënland, Labrador, côtes américaines pacifiques au nord du 48° degré et au sud du 42° degré, île sud de la Nouvelle Zélande) et que GREGORY, dans une étude approfondie, trop peu appréciée jusqu'ici, attribue à des ruptures (1). Des observations personnelles au Groënland et en Norvège m'amènèrent à considérer comme erronée l'opinion encore très répandue que les fjords ne sont que des vallées d'érosion.

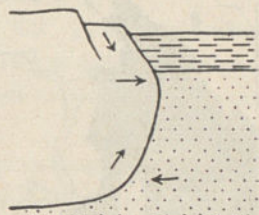


Fig. 38. — Effet des pressions sur le bord du continent (schéma).

Des sondages répétés le long des côtes de l'Atlantique ont permis d'établir le fait curieux que certaines vallées fluviales se prolongent sous la mer : celle du Saint-Laurent, traverse la plate-forme bordière et atteint les abysses, celle de l'Hudson peut être suivie jusqu'aux profondeurs de 1.450 mètres ; du côté européen, ce phénomène se remarque à l'embouchure du Tage et notamment près de la Fosse de Cap Breton : à 17 kilomètres au nord de l'embouchure de l'Adour. La plus belle de ces vallées sous-marines est bien celle du Congo (2) : on peut la suivre jusqu'à une profondeur de 2.000 mètres. Il est généralement admis que ces sillons représentent des vallées noyées. Cela me paraît fort peu vraisemblable pour les raisons que voici : d'abord, ces vallées ont une pente très forte, ensuite elles existent un peu partout (en multipliant les sondages, on en trouverait probablement sur toutes les côtes), enfin elles ne se présentent pas à n'importe quelle embouchure : certaines en ont ; d'autres situées cependant entre les premières,

(1) J. W. GREGORY, *The Nature and origin of Fjords*, 542 p, Londres 1913.

(2) Pour la carte bathymétrique, voir p. ex. SCHOTT, *Geographie des Atlantischen Ozeans* p. 102, Hambourg 1912.

n'en ont pas. Il est bien plus probable que ce sont là des fentes qui ont pris naissance sur le bord du continent et qui ont été utilisées par les fleuves. Il est d'ailleurs prouvé géologiquement que la vallée du Saint-Laurent est une fissure; et d'après sa situation générale, la Fosse de Cap Breton qui forme le fond du Golfe de Gascogne, ouvert comme un livre, pourrait bien en être une aussi.



Fig. 3^e. — Guirlandes du Nord-Est asiatique.

Isobathes de 200 et 2.000 mètres, sillons abyssaux ponctués.

Le plus intéressant des phénomènes concernant le bord des continents est certainement la formation des guirlandes insulaires comme celles qui accompagnent la côte orientale de l'Asie. Le Pacifique en possède une série imposante: si l'on considère la Nouvelle Zélande comme une ancienne guirlande australienne, on voit que tout le rivage occidental de cet océan en est jalonné tandis que son rivage oriental n'en a point. Tout au plus pourrait-on envisager comme ébauches de guirlandes, les îles qui se détachent des côtes nord-américaines entre le 50° degré et le 55° degré de Lat. N., le renflement des côtes de la région de San-Francisco et la chaîne côtière californienne en voie de séparation. Dans l'hémisphère sud, l'Antarctique de l'ouest peut être une

guirlande (voire une double guirlande). Dans son ensemble, la formation des guirlandes permet de supposer une dérive des masses continentales qui limitent à l'ouest le Pacifique. Cette dérive, dirigée vers l'ouest nord-ouest, ou plutôt vers l'ouest, si l'on tient compte de la position des pôles au Quaternaire ancien, concorde avec l'axe longitudinal de cet océan (Am.-Sud-Japon) et avec l'alignement des archipels anciens (Iles Hawaii, Marshall, de la Société, etc). Les sillons

abyssaux, y compris celui des Tonga, sont des fentes perpendiculaires à la direction de cette translation, donc parallèles aux guirlandes. On ne saurait douter que ces formations procèdent d'une même cause. Si l'on étire un disque de caoutchouc, on obtient une image semblable : l'un des diamètres augmente, l'autre diminue. La traction exercée sur le caoutchouc dispose en chaînes tous les groupes de points (groupes d'îles) et des fentes s'ouvrent perpendiculairement à l'axe d'allongement. Ainsi la formation des guirlandes de l'Extrême-Orient est en étroite relation avec celle du Pacifique entier.

Il existe aux Antilles des guirlandes tout à fait analogues; même l'arc des Antilles australes (entre la Terre de Feu et celle de Graham) peut être envisagé, dans un sens un peu différent toutefois, comme une guirlande libre

L'échelonnement toujours semblable des guirlandes est très frappant. Les Aléoutes forment une chaîne partant, non des côtes, mais de l'intérieur de l'Alaska. Elles aboutissent au Kamtchatka, d'où une nouvelle chaîne, jusqu'ici intérieure se détache, se poursuit dans les Couriles et finit au Japon pour faire place à la chaîne qui vient de Sakhaline. Ce dispositif se répète jusqu'aux îles de la Sonde, où il se complique. Les Antilles s'échelonnent exactement de la même manière. Ce phénomène est sans doute étroitement lié à la disposition des chaînes côtières, il est présidé en dernier ressort par la loi du plissement en échelons, exposée plus haut. Chose curieuse, ces guirlandes sont sensiblement de la même longueur [Aléoutes 2.900, Kamtchatka-Couriles 2.600, Sakhaline-Japon 3.000, Corée-Riou-Kiou 2.500, Formose-Borneo 2.500, Nouvelle-Guinée-Nouvelle-Zélande (autrefois) 2.700 kilomètres] (1) et il se pourrait bien que les chaînes côtières des anciens continents aient présenté déjà une régularité semblable.

Nous avons relevé la remarquable uniformité structurale des guirlandes : leur bord concave porte toujours une rangée de volcans, sans doute parce qu'il subit, lorsque l'arc accentue sa courbure, une pression expulsant le contenu des enclaves de sima. Leur bord convexe, au contraire, présente des sédiments tertiaires, manquant le plus souvent au littoral du continent d'où provient la guirlande. La séparation ne s'est produite qu'à une époque géologique fort récente, puisque, lors du dépôt de ces sédiments, la guirlande formait encore

(1) Les guirlandes des Indes Occidentales présentent par contre une gradation : Cuba 1.100, Haïti-Cuba sud-Banc de Misteriosa 1.900, Petites Antilles-Haïti sud-Jamaïque-Banc des Mosquitoes 2.600 kilomètres.

la marge du continent. Ces couches tertiaires se montrent partout fortement disloquées, conséquence de la traction qui s'exerce sur cette côte pendant l'incurvation de l'ensemble. Au Japon, la Fossa Magna de l'île de Hondo résulte d'un excès de courbure. Le fait que le bord externe de la guirlande paraît surélevé, alors que l'étiement s'accompagne en général d'un abaissement du sol, montre que la guirlande a effectué un mouvement de bascule. On peut l'expliquer ainsi : la guirlande est entraînée par ses deux bouts vers l'ouest (dérive générale des continents), tandis que le sima la retient par sa base. Le sillon abyssal qui suit très souvent le bord externe des guirlandes semble aussi dépendre de ce phénomène. Nous avons déjà fait voir que ce sillon ne se forme jamais entre le continent et la guirlande dans le sima fraîchement découvert, mais toujours au large de celle-ci, autrement dit là où elle est en contact avec le fond océanique ancien. Ce sillon offre l'aspect d'une crevasse dont l'une des parois est formée par le sima refroidi et durci jusqu'à de grandes profondeurs, l'autre par le sial de la guirlande. La naissance d'une semblable fente au contact du sial et du sima se comprend d'autant mieux si on la met en rapport avec le mouvement de bascule dont nous venons de parler.

Ce qui frappe aussi à la figure 39, c'est la forme pansue qu'affecte le bord des continents derrière les guirlandes. Non seulement le littoral, mais l'isobathe de 200 mètres, décrit une S, tandis que la guirlande ne forme qu'un simple arc. Nous avons représenté schématiquement ces rapports à la figure 40 B. Ce phénomène se répète exactement dans les trois guirlandes figurées sur la carte ci-jointe (fig. 39), de même que dans celle qui accompagnait jadis l'Australie tout en prolongeant au sud-est la Nouvelle-Guinée pour se terminer par la Nouvelle-Zélande. Ces évasements des côtes dénotent une compression dirigée parallèlement au bord du continent en même temps qu'à la direction structurale des chaînes qui l'occupent. Il faut envisager ces évasements comme des plis en grand s'opérant dans le sens horizontal. Il s'agit ici d'un phénomène secondaire qui accompagna la grande compression nord-est → sud-ouest à laquelle l'Asie orientale toute entière fut soumise. Si l'on essaie de redresser la ligne ondulée des côtes de l'Est asiatique, la distance de 9.100 kilomètres séparant actuellement l'Indo-Chine du détroit de Bering se porte à 11.000 kilomètres.

Selon nous, il faut donc voir dans les guirlandes — notamment dans celles de l'Asie orientale — des chaînes côtières qui se séparent

du continent en dérive vers l'ouest parce qu'elles adhèrent au vieux fond abyssal, profondément solidifié. Entre le continent et la guirlande, un nouveau fond abyssal, plus fluide est mis à découvert.

Cette manière de voir diffère de celle de RICHTHOFEN lequel s'appuie, il est vrai, sur de toutes autres hypothèses (1). Il pensait que les guirlandes étaient produites par une traction venant du Pacifique. Elles devaient être comprises dans un grand système de ruptures, s'étendant

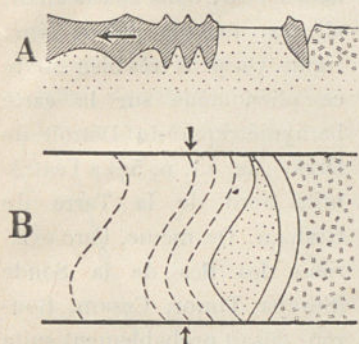


Fig. 40. — Schéma de la formation des guirlandes.

A coupe; B plan. (Le sima fortement refroidi est figuré par des hachures interrompues).

sur une large zone du continent qui les avoisine, caractérisé aussi par le tracé en arcs de ses côtes et de ses chaînes. RICHTHOFEN considérait la région comprise entre l'archipel et le continent comme un premier palier dont un mouvement de bascule fit plonger la partie occidentale tandis que l'autre s'érigeait en guirlande. Il crut remarquer, sur le continent, deux autres paliers, moins inclinés faisant suite au premier. Il est vrai que la forme régulièrement arquée de ces dislocations était malaisée à expliquer mais l'on s'imagina vaincre

cette difficulté, en comparant ces arcs à ceux que décrivent les cassures de l'asphalte et d'autres matières.

Il faut se garder de méconnaître que cette théorie a le mérite historique d'avoir rompu sciemment avec le dogme d'une pression de voûte partout à l'œuvre et d'avoir fait appel à des tractions horizontales pour expliquer certains phénomènes; mais nous n'avons pas besoin de longs développements pour faire voir qu'elle ne cadre plus avec nos expériences actuelles. La carte bathymétrique, en particulier, si l'insuffisance des sondages la rend encore bien imparfaite, n'indique pas moins qu'il y a discontinuité entre la guirlande et le socle.

Lorsque le mouvement, au lieu d'être perpendiculaire au bord du socle, lui est parallèle, les chaînes côtières peuvent se détacher par « déplacement en long » sans que le sima soit mis au jour dans l'interstice. Au fond, il s'agit ici de phénomènes analogues à ceux que

(1) F. v. RICHTHOFEN, *Über Gebirgskeltungen in Ostasien. Geomorphologische Studien aus Ostasien* 4; Sitzber. d. Kgl. Preuss. Akad. d. Wiss., Berlin. Phys.-math. Kl., 40, p. 867-891, 1903.

nous avons expliqués plus haut, à l'aide de la figure 33 (p. 132), mais simplement rapportés, *mutatis mutandis*, au bord des continents : si le socle affronte le sima, son bord se plisse il s'y produira des nappes ou des plis en échelons. suivant le sens du mouvement; s'il s'en écarte, il y aura disjonction des chaînes côtières. Enfin si le mouvement est cisailant, il y a déplacement en long, la chaîne côtière glisse

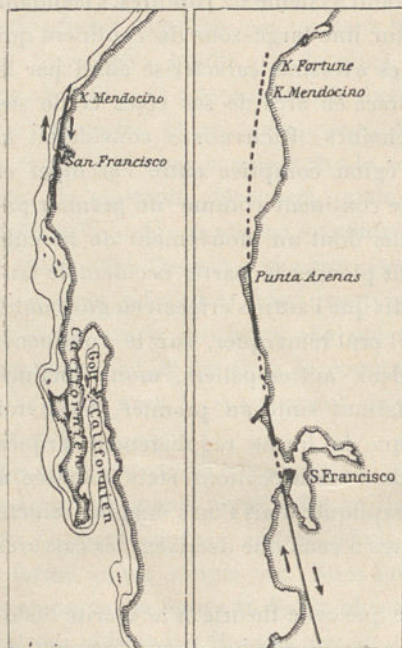


Fig. 41. — La Californie et la faille produite lors du tremblement de terre de San-Francisco.

le long du continent qui s'en détache car, dans ce cas aussi, elle est retenue par le sima rigide. On peut très bien suivre ce phénomène sur la carte bathymétrique du Déroit de Drake (fig. 14, p. 57) à l'extrémité nord de la Terre de Graham. De même, l'arc extérieur des Iles de la Sonde (Sumba, Timor, Cesam, Bourou) faisait probablement suite à la rangée d'îles situées devant Sumatra mais il a été lâché par le continent en marche; Java a défilé devant lui. Cet arc a été rejoint par le socle australo-néoguinéen.

Autre exemple : la Californie. Les promontoires latéraux de cette presqu'île offrent des phénomènes de glissement qui semblent indiquer une dérive

(1) Communication épistolaire de E. Böse. Son travail a paru dans les *Parerones del Instituto Geologico de Mexico*. T. IV., p. 307, 1912-1913.

comme la péninsule offrent des roches intrusives post-cambriennes, mais il reste à prouver qu'elles sont identiques.

Si la Californie se raccourcit, il semble d'autre part qu'elle glisse vers le nord (1), comme les chaînes côtières qui lui font suite. La forme pansue du littoral de San-Francisco s'explique alors par un resserrement. Cette idée est confirmée d'une manière frappante par la faille qui se produit lors du célèbre tremblement de terre du 18 avril 1906. La figure 41 en donne le schéma, d'après RUDZKI (2). En effet, les masses situées à l'est de la faille furent précipitées vers le sud, celles situées à l'ouest vers le nord. Comme il fallait s'y attendre, les mesures faites sur le terrain indiquèrent que la valeur de ce décrochement horizontal diminue à mesure que l'on

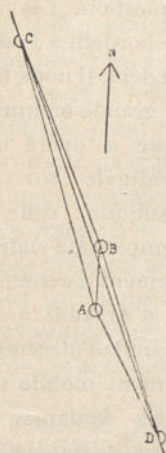


Fig. 42. — Mouvement opéré par un élément de surface divisé par la faille d'après LAWSON.

s'éloigne de la faille, si bien qu'à une certaine distance de celle-ci aucune translation n'est perceptible. Avant que l'accident se produise, la croûte terrestre était naturellement soumise à un mouvement lent et continu. ANDREW C. LAWSON (3) a comparé ce mouvement, tel qu'il dut s'effectuer entre les années 1871 à 1906, avec la direction de la faille et il a obtenu pour le groupe de Punta Arenas le résultat indiqué à la figure 42. On voit qu'un élément de surface situé sur l'emplacement de la future faille a subi, durant les quinze années dont il s'agit, un transfert de A en B de 0,7 mètres ; la formation de la faille eut pour effet de porter brusquement sa moitié ouest de 2,23 mètres vers le point C et sa moitié est de 2,23 mètres vers le point D. Dans le mouve-

ment continu de A en B — mouvement que l'on doit se représenter comme relatif à la masse principale du continent nord américain — on voit que le bord occidental de ce grand socle est retenu sans cesse vers le nord par le sima du Pacifique. La faille n'est que l'effet du

(1) Par rapport au sima, c'est le continent qui dérive vers le sud et la presqu'île qui s'attarde.

(2) RUDZKI, *Physik der Erde*, p. 176. Leipzig 1911. Voir également : TAMS, *Die Entstehung des Kalifornischen Erdbebens vom 18 avril 1906*. Peterm. Mitt. 64, p. 77, 1918.

(3) ANDREW C. LAWSON, *The Mobility of the Coast Ranges of California*: Univ. of California Publ. Geology, Vol. 12 n° 7, p. 431-473, 1921.

rétablissement par saccades de la tension normale, elle n'implique pas le déplacement brusque du socle entier.

Il convient de nous occuper à ce propos de la zone bordière du socle indochinois (fig 43), région également des plus intéressantes mais peu



Fig. 43. — Carte bathymétrique des parages de l'Indochine.

Isobathes de 200 et 2.000 mètres.
Sillons abyssaux ponctués.

explorée, il est vrai, et en particulier du bassin profond situé au nord de Sumatra. Le coude de la presqu'île de Malacca correspond à la rupture de l'extrémité nord de Sumatra; mais il ne suffit pas de redresser cette péninsule pour recouvrir de sial le sima du fond du bassin en question. Les îles Andaman qui le bordent à l'ouest nous l'indiquent déjà. Il nous faut admettre que la grande compression himalayenne a opéré une traction longitudinale sur les chaînes de l'Insulinde: celle de Sumatra s'est rompue à l'endroit formant actuellement l'extrémité

nord de cette île et sa moitié proximale (chaîne d'Arakan) a été entraînée vers le nord comme le bout d'un câble. Un pareil déplacement en long a dû faire naître des deux côtés du compartiment mobile des surfaces de glissement. Chose intéressante, les îles Andaman et Nicobar, en adhérant au sima, échappèrent à cette curieuse translation à laquelle seule la deuxième chaîne côtière fut soumise.

Un mot, pour terminer, sur les côtes du type atlantique et celle du type pacifique dont la différence est bien connue. Les premières sont des cassures de pays tabulaires, les deuxièmes comportent des chaînes bordières et des sillons abyssaux. Les côtes de l'Afrique orientale de Madagascar, de l'Inde, de l'Australie Ouest et Sud et de l'Est antarctique appartiennent encore au type atlantique; celles de l'Indochine occidentale, des îles de la Sonde, de l'Est australien de la Nouvelle-Guinée, de la Nouvelle Zélande et de l'Ouest Antarctique, au type pacifique auquel il faut rattacher enfin celles des Antilles. La gravité offre sur ces deux genres de côtes des différences répondant à leur tectonique⁽¹⁾. Les côtes atlantiques sont compensées isostatiquement, c'est-

(1) OTTO MEISSNER, *Isostasie und Küstentypus*, Peterm. Mit. 64, p. 221, 1918.

à-dire que l'équilibre hydrostatique des socles y est réalisé. Abstraction faite des perturbations accompagnant, comme nous l'avons vu, le bord des continents, les côtes pacifiques présentent au contraire des écarts d'isostasie. En outre, on sait que les côtes atlantiques sont relativement exemptes de phénomènes volcaniques et que des tremblements de terre y sont rares tandis que les côtes pacifiques en sont fortement affectées. Les rares volcans des côtes atlantiques ont des laves qui selon BECKE présentent des différences minéralogiques importantes : elles sont plus lourdes, plus riches en fer et semblent de ce fait, venir de profondeurs plus considérables (1).

Selon nous, le type atlantique concerne les côtes qui ne se sont formées qu'après l'ère secondaire (en partie même beaucoup plus tard) par la disjonction des socles. Le fond de mer qui les touche est du sima mis à nu à une date relativement récente. Il doit donc être envisagé comme relativement fluide. Aussi n'est-il pas étonnant que l'isostasie y soit réalisée. De plus, lorsque les continents dérivent, elles éprouvent de la part du sima une moins grande résistance ; ces côtes ne se plissent ni ne se contractent, il ne s'y formera donc ni chaînes ni volcans. Il ne faut pas s'attendre à y voir des tremblements de terre car le sima est assez fluide pour permettre à tous les mouvements que nous attribuons aux masses de s'opérer sans discontinuité : il coule, tout simplement. Les continents s'y comportent comme des glaçons dans l'eau, ceci dit en exagérant.

(1) WALTHER PENCK distingué une troisième sorte de magma, qu'il nomme le magma arctique et qu'il fait venir de profondeurs plus grandes encore (*Die Entstehung der Gebirge der Erde*. Deutsche Revue, septembre et octobre 1921).

CHAPITRE XIII

Les forces translatrices.

Bien que les translations des continents semblent à première vue dirigées en tous sens, il est possible, cependant de les ordonner en un grand système. Les socles dérivent vers l'équateur et vers l'ouest. Il convient d'envisager séparément les deux composantes de ce mouvement.

La translation dirigée vers l'équateur ou « la tendance des masses à fuir le pôle » (*Polflucht*) a déjà été admise par divers auteurs, notamment par KREICHGAUER (1) et par TAYLOR (2). On peut, sans doute, la reconnaître partout : elle affecte bien plus les grands que les petits compartiments de l'écorce et c'est aux latitudes moyennes qu'elle a son intensité maxima. Son existence est attestée, en particulier en Eurasie, par la disposition de la grande ceinture de plissements tertiaires, alors équatoriaux, de l'Himalaya et des Alpes, comme dans la saillie des côtes de l'Est asiatique saillie qui résulte du choc des masses. L'Australie aussi obéit très nettement à la poussée vers l'équateur ; la déformation des Arcs de la Sonde, la surrection récente des chaînes de la Nouvelle-Guinée et le retard de la guirlande néozélandaise sont autant de témoignages concordants de sa dérive vers le nord-ouest. En Amérique du Nord, la Terre de Grinnel et le Labrador se déplacent vers le sud-ouest par rapport au Groënland ; la translation vers l'équateur se manifeste de plus dans l'incurvation naissante de la chaîne bordière californienne en train de se détacher du continent et dans la faille sismique de San Francisco. Même le petit socle de Madagascar tend à se rapprocher de l'équateur, puisqu'il dérive vers le nord-est par rapport à l'Afrique ; à vrai dire, il est possible qu'il soit entraîné passivement par un courant du sima. L'Afrique et l'Amérique du Sud sont situées actuellement sur l'équateur et c'est sans doute pour cela que

(1) KREICHGAUER, *Die Äquatorfrage in der Geologie*, Steyl. 1902.

(2) TAYLOR, *Bearing of the tertiary mountain belt on the origin of the earth's plan*. B. Geol. S. Am. 21, 2 juin 1910, p. 179-226.

leurs translations dans le sens du méridien se sont réduites à peu de chose. Les grands déplacements horizontaux de l'Amérique du Sud au Tertiaire, déplacements qui provoquèrent la surrection des Andes, étaient dirigés vers le nord-ouest, si l'on tient compte de la position qu'occupaient alors les pôles ; elle obéissait donc à la poussée dont nous parlons. Ce dut être aussi le cas de l'Antarctique.

La compression lémurienne qui se manifeste depuis le Tertiaire peut se concevoir, dans ses premières phases, comme une dérive de l'Inde vers l'équateur. Mais actuellement, l'Inde est située entre 10 et 20 degrés de latitude Nord, si elle avait la tendance à s'éloigner du pôle, ce ne pourrait être qu'au détriment des chaînes qui la bordent. Il est difficile de rendre compte de ce mouvement parce que nous ne pouvons constater que la translation relative ; il se peut qu'un flux du sima dirigé vers le nord-est presse l'Inde contre l'Asie centrale ; peut-être est-il plus juste d'attribuer une grande partie du plissement au fait que l'Asie s'éloignait du pôle.

L'autre composante, celle qui tend à déplacer les continents vers l'ouest, a des effets encore plus apparents ; ils se remarquent au premier coup d'œil jeté sur la carte. Les grands socles naviguent vers l'ouest, dans le sima. Déjà la *pangée* des temps carbonifères avait un bord antérieur (l'Amérique) lequel se plissait au contact du sima (précordillères) et un bord postérieur (l'Asie) qui s'émiettait dans le Pacifique. Le contraste entre les côtes est et les côtes ouest du Grand Océan est encore très frappant aujourd'hui ; cela tient surtout au fait que la compression méridienne de l'Asie orientale favorise le détachement de ses nombreuses chaînes bordières. Le lobe continental comprenant l'Indochine et les îles de la Sonde s'incurvait vers l'est en s'attardant ; il atteste la dérive vers l'ouest de la même manière que la rupture de Ceylan. Plus au sud, nous trouvons des phénomènes semblables : détachement de la Nouvelle Zélande, poussée nord-ouest du socle australien. La côte orientale de l'Amérique nous offre une répétition de ce qui se passe en Extrême-Orient. Les Antilles sont un bel exemple de guirlandes restées en arrière, on peut y remarquer que les petites îles s'attardent davantage que les grandes. Le banc de la Floride traîne à l'est comme la pointe sud du Groënland. En Amérique australe, le banc des Abrolhos est formé de masses profondes détachées de la base et qui sont venues poindre à l'arrière du continent en dérive ; la région du Détroit de Drake où traînent les extrémités de deux socles continentaux, abandonnant au sima le pont qui les unissait,

nous a déjà servi d'exemple typique de la dérive vers l'ouest. Du côté de l'Afrique, citons Madagascar. Par rapport au continent qui s'en écarte, elle se meut vers le nord-est parce qu'elle tend vers l'équateur. Peut-être sommes-nous en droit de mettre en relation avec la dérive vers l'ouest le système de fractures récentes de l'Est Africain qui comprend certainement Madagascar ; quoiqu'il ne s'agisse plus ici de guirlandes en voie de séparation, mais de grands fragments de socles. Les Canaries et les îles du Cap Vert semblent s'être séparées récemment de l'Afrique en se dirigeant par conséquent vers l'ouest ; mais cette avance peut être attribuée aux courants qui se produisirent dans le sima lors de l'ouverture de l'Atlantique ; elle indiquerait seulement que la surface du sima de ce bassin océanique s'étend comme du caoutchouc ou que l'afflux du sima dans la fente est en excès dans la région occupée par ces îles.

La question de savoir si les translations de détail peuvent être attribuées aux deux forces dont nous parlons, doit être encore laissée indécidée. Par contre, selon toute apparence, les mouvements principaux des socles en dépendent uniquement.

Il est à supposer que les fentes de la croûte de sial se disposent en un système défini puisque les translations et les disjonctions vont de pair. Les fentes méridiennes correspondraient à la dérive vers l'ouest. Mais elles pourraient aussi résulter de la dérive vers l'équateur, notamment lorsqu'elles se prolongent jusqu'aux pôles. Nous avons dit plus haut que les fossés d'affaissement et les disjonctions ont, en effet, une tendance à adopter la direction nord-sud ; les fractures de l'Est africain, l'affaissement rhénan et avant tout la grande fente atlantique nous en ont fourni l'exemple. L'on peut aussi prouver que des disjonctions se sont prolongées jusqu'au pôle et cela notamment par le rétrécissement sud de l'Amérique, de l'Afrique et de l'Inde, du moins pour ce qui concerne les anciennes positions occupées par le Pôle Sud. Mais ce ne sont là que les ébauches d'un système, dans le détail, les exceptions abondent.

On ne peut encore donner de réponse définitive à la question de savoir quelles sont les forces qui ont produit ces translations, plissements et disjonctions. Nous indiquerons simplement où en sont les recherches qui s'y rapportent.

C'est Eörvös (1) qui le premier admit l'existence d'une force tendant

(1) *Verh. d. 17. Al. Konf. d. Internat. Erdmessung*. I. Teil, 1913, p. 414.

à écarter des pôles les masses continentales. Il attirera l'attention sur le fait « que dans le plan méridien la verticale décrit une courbe à concavité tournée vers le pôle et que le centre de gravité d'un corps flottant est placé plus haut que celui de la masse liquide dont il prend la place. Il s'en suit que le corps immergé est soumis à deux forces de direction différente et dont la résultante tend vers l'équateur. Les continents doivent donc avoir la tendance à se mouvoir avant tout dans cette direction et ce mouvement provoquerait au cours des siècles un changement de la latitude dans le genre de celui que l'on suppose pour l'observatoire de Pulkovo ».

Sans avoir eu connaissance de cette brève indication, W. KÖPPEN⁽¹⁾ a reconnu la nature de cette force et l'importance qu'elle peut avoir dans la question des translations continentales. Il en a parlé comme suit, sans faire appel au calcul, il est vrai :

..... « L'aplatissement des surfaces de même niveau diminue avec

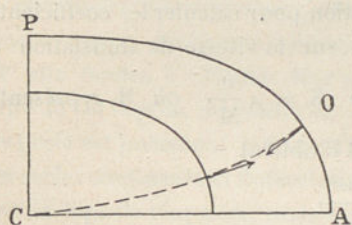


Fig. 44. — Deux surfaces de niveau et une de leurs trajectoires orthogonales

La ligne en pointillé est la ligne de force de la pesanteur, ou, si l'on veut, le tracé de la verticale au point O.

Or, le centre de poussée archimédienne d'un corps flottant correspond au centre de gravité de la masse dont il prend la place tandis que le point d'application de la pesanteur est son centre de gravité ; ces deux forces sont dirigées normalement au niveau de leur point d'application. elles ne s'opposent pas exactement mais donnent une petite résultante qui, lorsque le centre de poussée est plus bas que le centre de gravité, est orientée vers l'équateur. Comme le centre de gravité du socle se trouve aussi bien au-dessous de la surface, ces forces ne s'exercent pas normalement aux surfaces inférieures et supérieures du

la profondeur; ces surfaces ne sont pas parallèles, mais elles convergent légèrement sauf à l'équateur et aux pôles où le rayon terrestre leur est perpendiculaire. On peut le voir sur la figure 44, qui représente une coupe méridienne ; le pôle est désigné par P, l'équateur par A, le centre de la terre par C.

⁽¹⁾ H. KÖPPEN, *Ursachen und Wirkungen der Kontinentenverschiebungen und Polwanderungen*. Peterm. Mitt. 1921, p. 145-149 et 191-194. Voir notamment p. 149. *Über Änderungen der geographischen Breiten und des Klimas in geologischen Zeit*, Geographiska Annaler 1921, p. 285-299. *Zur Paläoklimatologie*. Meteorologische Zeitschr. 1921, p. 97-101.

socle, mais accusent une légère déviation dans le sens de l'équateur, plus marquée dans la poussée que dans la gravité. Ces principes doivent être valables pour tous les corps flottants dont le centre de gravité se trouve plus haut que le centre de poussée. Le principe d'Archimède n'est rigoureusement exact sur la terre en rotation que lorsque ces deux points se confondent ».

Nous devons à P. S. EPSTEIN (1) les premiers calculs concernant la composante de la dérive vers l'équateur. Pour une force K_{φ} agissant à la latitude géographique φ il obtient l'expression

$$K_{\varphi} = -\frac{3}{2} m d \omega^2 \sin 2\varphi$$

où m représente la masse du continent, d la demi différence d'altitude entre les aires abyssales et les aires continentales, (ou si l'on veut la différence de niveau entre le centre de gravité du socle et celui du volume de sima dont ce dernier prend la place) et ω la vitesse angulaire de la terre. Il emploie cette équation pour calculer les coefficients de résistance μ de la sphère de sima sur la vitesse de translation v du socle (d'après la formule générale $K = \mu \frac{v}{M}$, où M représente l'épaisseur de la couche visqueuse) et il obtient

$$\mu = \rho \frac{s d M \omega^2}{v}$$

ρ représente la densité du socle et s son épaisseur. Il part, à la vérité, de données numériques extrêmes soit :

$$\rho = 2,9$$

$$s = 50 \text{ km.}$$

$$d = 2,5 \text{ km.}$$

$$M = 1.600 \text{ km.}$$

$$\text{d'où} \quad \omega = \frac{2\pi}{86\ 164}$$

$$v = 33 \text{ m. par an ;}$$

et trouve pour le coefficient de résistance du sima

$$\mu = 2,9 \times 10^{16} \text{ g cm}^{-1} \text{ sec}^{-1},$$

c'est donc une résistance trois fois plus forte que celle de l'acier à la température ordinaire. Il en conclut :

« En résumé, nos résultats nous permettent d'affirmer que les forces

(1) P. S. EPSTEIN, *Über die Polflucht der Kontinente*. Die Naturwissenschaften 9, Heft 25 (24 juin 1921), p. 499-502.

axifuges engendrées par la rotation de la terre peuvent et même doivent déterminer une dérive vers l'équateur s'élevant au degré indiqué par WEGENER. » Par contre, EPSTEIN croit devoir répondre négativement à la question de savoir si les plissements équatoriaux peuvent être attribués à cette force qui ne correspond, en effet, qu'à une différence de niveau de 10 à 20 mètres entre le pôle et l'équateur. La surrection de chaînes hautes de plusieurs kilomètres ainsi que le refoulement interne du sima représentent au contraire un travail considérable opposé à la pesanteur, travail que la dérive vers l'équateur ne suffit pas à produire. Cette force ne pourrait donner naissance qu'à des montagnes de 10 à 20 mètres.

W. D. LAMBERT (1) a cherché presque en même temps qu'EPSTEIN, à calculer la valeur de la composante de dérive vers l'équateur, il obtint en gros, le même résultat. A 45° de latitude, cette force équivaut selon lui à un trois millièmes de la pesanteur. Comme c'est là qu'elle atteint son maximum, elle doit aussi imprimer un mouvement tournant aux continents allongés obliquement. Entre l'équateur et 48° elle tendra à orienter leur axe longitudinal selon les parallèles, entre 45° et le pôle, au contraire, selon les méridiens. « Il est clair que tout cela est purement spéculatif : l'hypothèse fondamentale est celle des socles continentaux flottants dans un magma qui, naturellement, doit être un liquide visqueux, mais visqueux au sens de la théorie classique de la viscosité. D'après cette théorie, un liquide, quelle que soit sa viscosité, cédera à une force si petite soit-elle, dans la mesure où on accorde à cette dernière un temps d'action suffisamment long. Le champ de la gravitation terrestre nous offre dans le détail, comme nous l'avons vu, des forces de très faible intensité et les géologues nous permettront sans doute de les faire agir durant une infinité de siècles. Mais la viscosité du liquide n'est pas nécessairement celle qu'implique la théorie classique, il se peut que les forces agissantes doivent dépasser une certaine limite pour la vaincre, indépendamment de leur durée d'action. La question de la viscosité est très complexe parce que la théorie classique ne donne pas l'explication adéquate de certains faits observés et nos connaissances actuelles ne nous permettent pas d'être très dogmatiques. La composante de dérive vers l'équateur existe, mais a-t-elle eu, au cours des temps géologiques,

(1) WALTER D. LAMBERT. *Some Mechanical Curiosities connected with the Earth's Field of Force*. The American Journ. of. Science. Vol. II, septembre 1921, p. 129-158.

une influence appréciable sur la position et la configuration de nos continents ? C'est aux géologues à nous le dire ».

Enfin, SCHWEYDAR (1) aussi a calculé la valeur de cette force. Il obtient pour la latitude de 45 degrés environ $1/2000$ m. sec, valeur qui équivaut aux deux millièmes du poids des socles. « Il n'est pas facile de décider si cette force suffit pour provoquer une translation. En tous cas, elle n'expliquerait pas la dérive vers l'ouest, car la vitesse qu'elle pourrait imprimer aux masses serait trop faible pour qu'une déviation dans le sens opposé à celui de la rotation terrestre puisse se manifester ».

SCHWEYDAR estime trop grande la vitesse de 33 mètres (par an) obtenue par EPSTEIN et beaucoup trop faible, le degré de viscosité du sima. En réduisant cette vitesse, on augmente la viscosité « Si l'on admet un coefficient de résistance de l'ordre de 10^{19} (au lieu de 10^{16} EPSTEIN), et si l'on suppose applicable la formule utilisée par EPSTEIN, on obtient pour la vitesse d'un socle, à la latitude de 45 degrés, environ 20 centimètres par an. *Quoiqu'il en soit, il faut admettre la possibilité que les continents subissent une dérive vers l'équateur sous l'influence de la force qui tend à les éloigner du pôle* » (2).

D'après ce qui précède, l'existence de la composante de dérive vers l'équateur ne peut plus être mise en doute. Elle s'élève au maximum (à 45 degrés de latitude) à un, deux ou trois millièmes de la pesanteur, c'est cependant une intensité 4 fois plus grande que celle des marées horizontales. Mais comme elle ne varie pas comme celles-ci mais agit au cours de milliers d'années invariablement dans la même direction, elle est capable de vaincre la résistance d'acier de la masse du globe dans l'espace des périodes géologiques, si toutefois, ce que nous ignorons, la limite efficace ne dépasse pas cette résistance. Nous avons vu précédemment que les continents se comportent comme de la cire et le sima comme de la cire à cacheter. Le sima offre en tous cas une limite d'action placée beaucoup plus bas que celle du sial. Aussi me paraît-il parfaitement vraisemblable que la composante de dérive vers l'équateur ait pu donner lieu, au cours des temps, à de notables translations continentales. En revanche, il semble encore douteux que cette force suffise à expliquer les plisse-

(1) W. SCHWEYDAR, *Bemerkungen zu WEGENERS Hypothese der Verschiebung der Kontinente*. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin 1921, p. 120-125.

(2) Souligné dans l'original.

ments équatoriaux bien que le calcul d'EPSTEIN ne soit peut-être pas le dernier mot dans cette affaire.

Nous pouvons être beaucoup plus brefs en parlant des forces occasionnant la dérive vers l'ouest.

Divers auteurs : E. H. L. SCHWARZ, WETTSTEIN et d'autres ont attribué à l'action retardatrice des marées une rotation vers l'ouest de l'ensemble de la croûte terrestre autour du noyau. On suppose également que la vitesse de rotation de la lune était jadis plus grande et que c'est le frottement dû aux marées de la terre qui l'a enrayée peu à peu. On conçoit aisément que l'action retardatrice exercée sur un corps céleste s'adresse avant tout à ses couches superficielles et qu'elle doive provoquer tôt ou tard leur glissement général ou un glissement des divers socles continentaux. La question est de savoir s'il existe vraiment des marées semblables. La déformation de la terre ferme démontrée à l'aide du pendule horizontal, est, d'après SCHWEYDAR, de nature élastique : elle ne peut nous être ici d'une utilité immédiate. J'estime cependant possible que précisément ces marées élastiques aient donné l'impulsion à un déplacement continu quoique faible de la croûte terrestre et cela grâce à la viscosité du sima. Il est vrai que le montant journalier de ce déplacement est minime, si minime que des mesures quotidiennes ne sauraient le révéler et pourtant il peut mener à des translations considérables au bout de millions d'années. Car il est hors de doute que nous ne pouvons regarder la terre comme absolument élastique vis-à-vis des forces de marées. A mon avis, le fait que la nature élastique des marées quotidiennes de la terre ferme est prouvée, ne nous permet pas encore d'estimer la question résolue.

Par une autre voie, mais qui aboutit aussi à l'action lunisolaire, soit en se fondant sur la théorie de la précession, SCHWEYDAR est amené à reconnaître l'existence d'une force capable de déterminer la dérive des continents vers l'ouest (1). « La théorie de la précession de l'axe de rotation de la terre sous l'influence lunisolaire repose sur l'hypothèse que les parties dont se compose la terre ne peuvent pas opérer de grands déplacements les unes par rapport aux autres. Si l'on admet la dérive des continents, il devient plus difficile de calculer les déplacements de l'axe terrestre. Dans ce cas, l'on doit faire la distinction entre l'axe de rotation du continent et celui de la terre entière. J'ai calculé que la précession de l'axe de révolution d'un continent situé, entre les

(1) SCHWEYDAR, *loc. cit.*

latitudes de -30° et $+40^\circ$ et les méridiens de 0 et 40° ouest est environ 220 fois plus grande que celle de l'axe de rotation de l'ensemble du globe. Le continent tend à tourner autour d'un axe propre. Il en résulte des forces dirigées non seulement dans le sens du méridien mais aussi vers l'ouest et qui tendent à déplacer le continent ; la force agissant selon le méridien change au cours d'une journée et n'entre pas ici en ligne de compte. Ces forces sont beaucoup plus intenses que celles de la dérive vers l'équateur (*Polfluchtkraft*). C'est à l'équateur que la force a son maximum, elle est nulle aux latitudes de $\pm 36^\circ$. J'espère qu'il me sera possible de préciser davantage le problème. Ces forces permettraient de concevoir une dérive vers l'ouest ». Il ne s'agit là que d'une communication provisoire : pour juger définitivement, il faut attendre encore la publication détaillée que cet auteur annonce. Pourtant il semble que l'on peut attribuer la translation des continents vers l'ouest à l'influence du soleil et de la lune sur le globe visqueux.

SCHWEYDAR est aussi d'avis que les anomalies de l'ellipsoïde (de révolution) terrestre, anomalies que nous révèlent les mesures de la gravité, peuvent donner lieu à un flux du sima en même temps qu'à des translations continentales : « Mais on peut aussi supposer l'existence d'un courant du sima, aux époques anciennes du moins, HELMERT, dans son dernier ouvrage, a conclu des variations locales de la pesanteur au fait que le globe est un ellipsoïde à trois axes ; l'équateur est une ellipse. Les axes de cette ellipse ne diffèrent que de 230 mètres ; le grand axe coupe la surface terrestre à 17° nord-ouest. (Atlantique), le petit axe à 73° est (Océan Indien). D'après les théories de LAPLACE et de CLAIRAUT, théories qui font encore loi en géodésie, la terre est envisagée comme ayant la constitution d'un corps fluide, c'est-à-dire que la pression régnant dans sa masse solide (la croûte mise à part) est assimilable à une pression de nature hydrostatique. Le résultat des recherches de HELMERT en devient incompréhensible. Une terre fluide ne peut être un ellipsoïde à trois axes, eu égard à son aplatissement et à sa vitesse de rotation. On pourrait admettre que les continents occasionnent une déformation de l'ellipsoïde. Ce n'est pas le cas. J'ai effectué le calcul en supposant que les continents flottent et qu'ils ont l'épaisseur indiquée plus haut [200 kilomètres ; différence de densité entre le sial et le sima 0,034 (eau = 1)] et j'ai trouvé que l'écart résultant de la distribution des continents et des mers est notablement plus faible que celui d'HELMERT. En outre, les axes de l'ellipse

équatoriale se placent autrement que chez lui ; le grand axe passe par l'Océan Indien. Il faut ainsi que des parties considérables de la terre ne soient pas justiciables de la constitution hydrostatique.

D'après mon calcul, le résultat obtenu par HELMERT peut s'expliquer en admettant que sous l'Atlantique une couche de sima épaisse de 200 kilomètres est plus dense de 0,01 que sous l'Océan Indien. Un pareil état de chose ne peut subsister à la longue : le sima aura la tendance à couler pour rétablir l'équilibre de l'ellipsoïde de rotation. Etant donnée la faible différence de densité, c'est à peine si un courant peut se produire ; mais il est possible que le tracé elliptique de l'équateur et les variations locales de la densité du sima, de même que le courant qui en résulte aient été jadis plus marqués ».

Il est clair que les forces qui expliquent le résultat d'HELMERT peuvent nous faire comprendre l'ouverture du bassin atlantique : la courbure de l'équateur y étant accentuée, les masses continentales tendront à s'écarter du faite.

Nous pouvons ajouter aux développements de SCHWEYDAR la remarque suivante. Il n'est pas nécessaire que ces renflements par lesquels la surface du globe dépasse son niveau d'équilibre se limitent à l'équateur ; ils peuvent apparaître à n'importe quel endroit. Nous avons montré plus haut à propos des relations entre les transgressions marines et les déplacements du pôle (chap. VIII) qu'il faut nous attendre à voir la surface terrestre occuper au-devant du pôle en marche un niveau trop élevé et derrière lui un niveau trop bas, ces écarts semblent confirmés par les faits géologiques. Ils s'élèvent à des valeurs semblables à celles que HELMERT obtint pour la différence des axes de l'ellipse équatoriale ou peut-être doubles. Lors des migrations polaires rapides, la surface terrestre paraît en tous cas avoir dépassé son niveau d'équilibre de quelques centaines de mètres dans le sens positif ou négatif suivant que la région considérée est devant ou derrière le pôle. Le plus grand écart de niveau (ordre de grandeur : 1 km. par quadrant terrestre) s'observerait à l'équateur sur le méridien sur lequel le pôle se déplace. Aux deux pôles il atteindrait une valeur presque aussi élevée. De ce fait, des forces sont mises en jeu qui entraînent les masses des régions trop hautes vers les régions trop basses. Ces forces sont un multiple de la composante de la dérive vers l'équateur laquelle ne correspond comme nous l'avons vu, qu'à un écart de niveau de 10 à 20 mètres par quadrant, pour des socles continentaux ; elles n'affectent pas seulemen

ces derniers, mais aussi le sima qui est plus fluide et qui opère peut-être sous la croûte rigide le rétablissement de l'équilibre. Mais aussi longtemps que les variations du niveau existent — les transgressions et régressions témoignent de leur existence — cette force doit aussi agir sur les socles continentaux et provoquer leur dérive et leurs plissements quoique ces mouvements soient peut-être plus faibles que ceux de la matière plus fluide qui les porte. Au cas où il se confirmerait que la composante normale de dérive vers l'équateur, si elle est capable de provoquer la translation des continents dans le sima ne peut suffire à y faire naître des chaînes. Je crois que les changements occasionnés par la migration des pôles dans la configuration du globe offrent une source d'énergie certainement à même de fournir le travail qu'exige le plissement.

Cette explication offre une certaine vraisemblance du fait que les plus grands systèmes de plis dont il s'agit (chaînes équatoriales carbonifères et tertiaires) correspondent à des époques où, pour d'autres raisons, nous devons supposer des déplacements polaires particulièrement rapides et riches en possibilités (du Carbonifère ancien au Permien : migration du Pôle Sud de l'Afrique centrale à l'Australie, alors différemment située ; du Tertiaire ancien au Quaternaire : migration du Pôle Nord des Aléoutes au Groenland).

Comme nous l'avons dit plus haut, la question des forces qui ont provoqué et provoquent encore la dérive des continents est encore trop discutable pour admettre une réponse parfaitement satisfaisante à tous égards. Une chose, cependant, peut être reconnue certaine : les translations continentales, le plissement et la disjonction, le volcanisme, le jeu des transgressions et les migrations polaires s'enchaînent d'une manière grandiose. Nous le voyons au fait qu'ils ont les mêmes époques de paroxysme. Dans un seul cas, celui des translations, aux causes internes s'ajoutent des causes externes, cosmiques. Aussi est-il vraisemblable de regarder celles-ci comme le premier moteur, la cause dernière de tous ces changements ; mais ensuite les rapports paraissent se compliquer. Je suis enclin à voir dans le déplacement des pôles la conséquence immédiate des translations continentales, malgré l'objection de SCHWEYDAR que de pareilles translations ne sont qu'un déplacement de masses égales. Car le socle continental ayant son centre de gravité plus élevé et aussi plus éloigné de l'axe terrestre possède, par conséquent, un moment par rapport à l'axe, plus grand que celui du sima déplacé. Aussi, à mon sens, la position de l'axe

d'inertie du globe doit-elle être modifiée par la dérive des continents. Mais nous avons vu que les déplacements du pôle peuvent à leur tour déterminer des translations continentales d'un autre genre. Les translations, elles aussi, auront une influence sur la position du pôle. Il y a là des interactions complexes dont nous ne pouvons pas encore nous faire une idée d'ensemble.

Librairie Scientifique Albert Blanchard

3 et 3^{bis}, Place de la Sorbonne, PARIS (V^e)

Conférences - Rapports de Documentation

sur la

PHYSIQUE

Organisées sous le patronage du Collège de France, du Museum d'Histoire naturelle, de la Faculté des Sciences de Paris, de la Direction des Recherches et Inventions, de l'Institut d'Optique, de la Société française de Physique, de la Société française des Électriciens, de la Société de Chimie-Physique, de la Société de navigation aérienne.

L'organisation des Conférences-Rapports et leur publication est faite sous la direction d'un Comité scientifique ainsi constitué : Président : *M. Marcel Brillouin*, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France.

Membres : *Madame P. Curie*, Professeur à la Sorbonne, *MM. Abraham*, Professeur à la Sorbonne, *J. Becquerel*, Professeur au Museum d'Histoire naturelle, *M. de Broglie*, *Copeaux*, Professeur à l'École de Physique et de Chimie, *Cotton*, Professeur à la Sorbonne, *Darzens*, Professeur à l'École Polytechnique, *Debière*, Chargé de Conférences à la Sorbonne, *Dunoyer*, Secrétaire général de la Société française de Physique, *Fabry*, Professeur à la Sorbonne, *de Gramont duc de Guiche*, *P. Langevin*, Professeur au Collège de France, *Maurice Leblanc fils*, Secrétaire général de la Société française des électriciens, *Ch. Marie*, Secrétaire général de la Société de Chimie-Physique, *J. Perrin*, Professeur à la Sorbonne, *Rateau*, Membre de l'Institut.

Les Conférences-Rapports ont pour but de donner des exposés critiques détaillés des travaux modernes sur les questions les plus importantes de la Physique et des Sciences connexes : Chimie-Physique, Radioactivité, Astro-physique, Electrotechnique et leurs applications

Chaque question fera l'objet d'un fascicule complet, qui contiendra les exposés développés des conférences et une documentation théorique et expérimentale aussi étendue que possible.

Laboratoires, Techniciens, Physiciens et Chimistes tiendront à posséder depuis l'origine cette collection des « Conférences-Rapports de Documentation sur la Physique », véritable Encyclopédie, rédigée par les personnalités les plus éminentes de la Science française.

Les Conférences-Rapports sont édités par les soins de la Société « Le Journal de Physique » ; le service de vente au numéro et par abonnement sera effectué par la Librairie scientifique Albert BLANCHARD, 3 et 3 bis, Place de la Sorbonne. Paris 5^e.

La première série comprendra les ouvrages suivants :

Fascicule 1. — 3 conférences.

M. Maurice DE BROGLIE

DOCTEUR ÈS SCIENCES

LES RAYONS X

Introduction à l'étude des rayons de haute fréquence, rayons X et rayons β . — Réaction de la matière vis-à-vis de ces rayons et coup d'œil d'ensemble sur leurs propriétés. — Suite naturelle des éléments, loi de Moseley.

Diffraction des Rayons X par les cristaux. — Mesure de la longueur d'onde des rayons X. — Spectrographes et spectromètres.

Spectres d'émission et d'absorption de la matière pour les rayons X. — Spectres corpusculaires. — Relation entre les spectres corpusculaires et les spectres de Rayons X, 1 volume de 164 pages et 5 planches hors texte, gr. in-8° cartonné 15 fr. »

Fascicule 2. — 3 conférences.

M. Léon BRILLOUIN

DOCTEUR ÈS SCIENCES

THÉORIE DES QUANTA

Historique. — Les quanta et le rayonnement isotherme. — Formules de Planck. — Les formules de probabilité et les quanta.

Nouvelles théories de Bohr et de Sommerfeld, exposé d'ensemble.

Problèmes de mécanique rationnelle que posent les théories de quanta, 1 volume de 181 pages, gr. in-8°, cartonné..... 15 fr. »

Fascicule 3. — 2 conférences.

M. Maurice LEBLANC fils

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

L'ARC ÉLECTRIQUE

Analyse physique de l'arc, forme de la décharge lumineuse dans le gaz. — Ses différents aspects extérieurs. — Arcs entre électrodes en charbon ou en métal. — Arc au mercure. — Arc alternatif.

L'Arc et ses applications : projecteurs, soudure électrique, redresseurs, etc. — Confirmation de la théorie physique du phénomène. — Influence de celle-ci sur les progrès techniques. 1 volume de 131 pages, cartonné..... 10 fr. »

Fascicule 4. — 2 conférences.

M. Eugène BLOCH

MAÎTRE DE CONFÉRENCES A LA SORBONNE

LES PHÉNOMÈNES THERMIONIQUES

Historique. — Méthodes générales. — Emission électronique des métaux chauffés dans le vide. — Loi de Richardson. Relation avec les différences de potentiel de contact. — Emission des corps composés. — Rôle des gaz.

Emissions d'ions positifs par les métaux dans le vide et dans les gaz. — Emission thermionique des sols chauffés. — Applications à la mesure des vides élevés, au redressement des courants alternatifs, etc. — Prix..... 10 fr. »