L'ÉVOLUTION DES CONCEPTIONS SUR LA GENÈSE ET LE MÉCANISME DES PLISSEMENTS DE L'ÉCORCE TERRESTRE

PAR

MICHEL LUCIUS.

Le problème de l'origine des forces qui produisent les zones de relief de la terre a depuis l'antiquité classique préoccupé l'homme de science. Ce n'est cependant que depuis le commencement du 19° siècle qu'on est arrivé à former des théories raisonnées sur la genèse de ce relief qui frappe surtout l'imagination dans les puissantes chaînes de montagnes plissées, localisées dans des zones étroites de l'écorce terrestre.

L'observation directe n'est pas possible dans les recherches des causes de ces formations vu le temps éphémère de la vie humaine voire de l'existence de l'humanité par rapport à la durée des phénomènes de l'orogénèse. L'homme ne peut donc émettre que des déductions théoriques, dont l'exactitude est d'autant plus complète qu'elles reposent sur un plus vaste nombre de faits d'observations justes. Comme une théorie n'est qu'une déduction généralisée pour interpréter la somme des faits connus, elle renferme forcément une part d'hypothèses. Comme l'interprétation de faits observés peut donner lieu à la construction de diverses théories, on ne s'étonnera pas à voir naître dans une jeune science comme la géologie qui s'enrichit chaque jour par de nouvelles observations, des théories souvent contradictoires pour expliquer les faits enregistrés par les observations des géologues. Il est encore à noter que des sciences auxiliaires de la géologie, la géophysique, les sciences physico-chimiques et même mathématiques ont apporté sur l'origine des forces qui déforment l'écorce terrestre des données fondamentales qui peuvent orienter les théories orogéniques dans de nouvelles voies.

Je me propose de rappeler brièvement les anciennes explications, puis d'esquisser le développement des vues plus récentes pour montrer le parti que la géologie en a tiré. Pour la rédaction de cette note j'ai utilisé les publications suivantes:

AUBART, D.: Le Jura et la tectonique d'écoulement. - Bulletin du Laboratoire de Géologie de l'Université de Lausanne, No 83, Lausanne 1945.

CLOOS, A.: Einführung in die Geologie, Berlin 1936.

FOURMARIER, P.: Principes de géologie, Paris et Liège 1944.

GIGNOUX, M.: Quelques réflexions sur les théories tectoniques récentes. - Travaux du Laboratoire de Géologie de l'Université de Grenoble, tome XXIII, année 1942, pg. 111-133.

» » Méditations sur la tectonique d'écoulement. - Travaux du Laboratoire de Géologie de l'Université de Grenoble, tome XXVIII, année 1950.

HAARMANN, E.: Die Oszillationstheorie, Stuttgart 1930.

HAUG, E.: Traité de géologie, Paris 1920.

MORET, L.: Les idées nouvelles sur l'origine des chaînes de montagnes. - Travaux du Laboratoire de Géologie de l'Université de Grenoble, tome XXV, pg. I-56. année 1951.

LUGEON, M.: Une hypothèse sur l'origine du Jura. - Bulletin du Laboratoire de Géologie de l'Université de Lausanne No 73, Lausanne 1941.

LUGEON, M. & GAGNEBIN, E.: Observations et vues nouvelles sur la Géologie des Préalpes romandes. - Laboratoire de Géologie de l'Université de Lausanne, No 72, Lausanne 1941.

ROUBAULT, M.: La Genèse des montagnes. - Presses universitaires de Paris. Paris 1949.

Pour étudier utilement la dynamique des phénomènes qui donnent naissance à la déformation de la surface terrestre, il faut que tous les mouvements qui se produisent dans la croûte de

la terre soient rapportés à un système de référence absolu. De ce point de vue deux alternatives fondamentales sont à considérer: ou bien la croûte terrestre en bloc fait corps avec le substratum magmatique ou bien la croûte et la masse magmatique peuvent se déplacer en indépendance l'une de l'autre.

Jusque dans la première décade de ce siècle on admettait presqu'à l'unanimité que la croûte fait corps avec le noyau et qu'elle ne peut se déplacer qu'avec celui-ci. C'est la notion de « f i x i s m e » qui s'applique à la t h é o r i e de c o n t r a c t i o n.

D'autres théories sont fondées sur la conception que la croûte figée ne fait pas corps avec le magma. Cette conception est désignée du nom de « m o b i l i s m e ».

La t h é o r i e d e l a d é r i v e d e s c o n t i n e n t s conçue dans sa forme extrême par A. WEGENER exige la mobilité des masses continentales les unes par rapport aux autres qui glissent sur leur subtratum visqueux. D'autres comme E. ARGAND, FR. KOSSMAT, R. STAUB admettent bien une indépendance entre la croûte et son substratum, mais l'ampleur des déplacements des masses continentales se réduisant au raccourcissement que la croûte subit par le mouvement plicatoire.

Une autre conception formulée déjà en 1906 par O. AMPFERER admet, sous la croûte solidifiée, dans le magma des courants provoquant des déplacements dans les masses subcrustales qui entraînent la déformation de la croûte.

Cette conception a été précisée par A. HOLMES et d'autres dans l'hypothèse que les mouvements subcrustaux ont leur origine dans l'échauffement inégal qui provoque dans le magma des courants comparables aux mouvements constatés dans les liquides et dans l'atmosphère, désignés du nom de « c o u r a n t s d e c o n v e c t i o n ».

Tandis que toutes ces théories font appel à un moteur intraplanétaire, quelques autres conceptions font appel, pour expliquer les déformations de la croûte à des causes extraplanétaires, notamment à l'action luni-solaire qui provoquerait des marées dans le magma, pouvant amener le déplacement des masses

subcrustales et déclencher le glissement de la croûte sur les zones magmatiques.

Comme toutes les théories de l'origine des plissements de l'écorce terrestre prêtent à des objections plus ou moins graves, de nombreuses variantes ont été imaginées pour parer aux points faibles que chacune d'elle présente.

La plus ancienne théorie proposée sur l'origine des montagnes et qui retenait la faveur des géologues au delà de la première moitié du 19^{me} siècle est celle dite de s o u l è v e m e n t.

Elle est basée sur les idées des « cratères de soulèvement » de J. HUTTON et de L. VON BUCH. D'après ces conceptions les matériaux éruptifs, laves et gaz, étaient capables de soulever les sédiments jusqu'à la verticale.

On attribuait un rôle actif aux roches cristallines qui constituent les massifs centraux des Alpes et d'autres chaînes plissées, en supposant que ces massifs étaient arrivés à la surface sous l'action d'une force agissant de bas en haut et qui aurait soulevé et crevé la couverture de terrains sédimentaires en refoulant latéralement ces terrains qui forment aujourd'hui de part et d'autre de ces massifs des zones de plissement.

Mais la théorie-clef des cratères de soulèvement n'est pas exacte. Il est vrai que l'intrusion, dans une couverture de sédiments, de masses magmatiques en forme d'énormes lentilles ou cloches, désignées du nom de l a c c o l i t h e s peut créer des soulèvements, des gauchissements, même des plis et des charriages locaux, mais l'origine des puissantes chaînes de montagnes ne cadre pas avec les dérangements locaux causés par le volcanisme. De plus on ne tardait pas à s'apercevoir que la formation des grands plis et l'arrivée des phénomènes éruptifs ne coïncidaient pas dans le temps.

Aussi E. SUESS et surtout A. HEIM se sont-ils élevés avec de bons arguments contre cette manière d'envisager les mouvements orogéniques comme la conséquence des phénomènes volcaniques. HEIM mit en évidence la présence de fragments roulés des roches éruptives sous-jacentes dans les sédiments crétacés fortement plissés recouvrant la masse de ces roches. Il démon-

trait avec BALTZER que les terrains cristallins des Alpes ont été plissés concurremment avec leur couverture de sédiments d'âge mésozoique et que des coins de ces sédiments sont enrobés dans le cristallin tout comme des écailles de cristallin se rencontrent dans les nappes sédimentaires.

En face de ces objections la théorie ne compte plus d'adeptes dans sa forme originale. Mais on ne perdra pas de vue que l'intercalation non seulement de produits volcaniques sous-marins, mais aussi l'intrusion de roches plutoniques dans les sédiments accumulés ne laisse pas de doute que l'orogénèse et la plutogénèse sont en relations réciproques étroites. Aussi est-on aujourd'hui moins catégorique dans la négation de tout rôle actif des roches plutoniennes et les théories actuelles tendent à revenir, quoique indirectement, à une conception de soulèvement par des forces subcrustales.

Elle céda la place à la théorie de la contraction que la plupart d'entre nous ont vécu et qui jusque dans la deuxième décade de ce siècle paraissait inébranlable.

Dès 1668, DESCARTES lia la formation des montagnes au refroidissement de la terre. Mais cette théorie ne prit corps qu'après l'édification de l'hypothèse cosmogénique de LAPLACE suivant laquelle la terre était initialement formée d'une masse de matières fondues. Le refroidissement progressif amenant une contraction de la masse terrestre, les couches superficielles s'adaptaient sur la masse centrale en s'affaisant et en se plissant. Ainsi la formation des chaînes de montagnes résulterait de l'écrasement entre deux aires de la croûte qui se rapprochent en raison de la contraction. Comme déduction de la cosmogénie de LAPLACE cette théorie est claire et logique et elle a l'avantage de donner une relation nette et simple avec des faits fondamentaux de la physique. Elle a été considérée longtemps comme l'une des bases les plus solides de la géologie. On interprétait de manière différente le jeu des forces mises en action par la contraction sans mettre en doute le refroidissement séculaire de la terre. E. SUESS la propageait dans son ouvrage magistral: «Das Antlitz der Erde» et A. HEIM en était un fervent adhérent.

Elle a été perfectionnée par la notion de «géosynclinal» introduite par J. D. DANA en 1873 qui fut complétée par E. HAUG par sa théorie des aires géosynclinales et des aires continentales. (1900)

Pour expliquer la formidable épaissseur des sédiments détritriques qui se sont accumulés dans certaines régions pendant des périodes géologiques relativement courtes par opposition à d'autres zones voisines où les mêmes formations sont peu puissantes, J. HALL avait déjà précisé, dès 1854, que le fond de la mer s'enfonçait au fur et à mesure du dépôt des sédiments suivant une ligne qui devient l'axe d'une dépression allongée en forme de synclinal. Il avait encore montré que les chaînes de montagnes se forment sur l'emplacement de ces synclinaux. DANA attribuait la formation d'une pareille dépression, qu'il nommait géosynclinal, à la compression latérale, non pas au poids même des sédiments accumulés.

E. HAUG a constaté que, dans une région plissée, la direction du plissement est sensiblement parallèle à l'axe du géosynclinal, déterminé par une ligne qui réunit les points où la sédimentation est au maximum de sa puissance. Tandis que HALL et DANA estimaient que les chaînes des montagnes se forment sur le bord des océans et que les continents croissent par adjonction de chaînes nouvelles toujours plus récentes, HAUG constatait, sur la base de nombreux faits, que les géosynclinaux sont toujours situés entre deux masses continentales et constituent des zones essentiellement mobiles, comprises entre deux masses essentiellement stables.

En dehors des géosynclinaux on rencontre de vastes surfaces où prédominent des formations néritiques moins épaisses et avec de nombreuses lacunes dans la série des dépôts et qui n'ont subi que de faibles ondulations. Ce sont les aires continentales.

Le rayon terrestre, diminuant par suite de la contraction, les aires continentales rigides s'enfoncent verticalement, donc se rapprochent en plissant le contenu des géosynclinaux qui surgissent pour donner les zones montagneuses plissées.

Les limites des aires continentales qui s'éloignent considérablement des continents actuels sont constituées par les géosynclinaux qui séparent les différentes unités continentales les unes des autres. (HAUG, 1900 et 1910)

On a cherché à mesurer la contraction effective de la surface réalisée par la formation des chaînes de montagnes connues. Le premier calcul dans cet ordre d'idées a été fait par ALBERT HEIM pour le Jura. La largeur actuelle de la chaîne est de 17 km; les couches plissées développées sur une surface horizontale occuperaient une largeur de 22 km. La contraction est donc d'environ 1/4.

Pour les Alpes, en raison de l'existence d'importantes nappes de charriage, HEIM arrivait à la conclusion que la largeur actuelle de la chaîne est au plus égale à 1/4 de la largeur des couches dépliées. D'autres auteurs arrivaient à une plus forte réduction. Selon MERCIER 150 km de plis et de nappes des Alpes auraient primitivement occupé une largeur de 1000 km. Enfin R. STAUB, en dépliant les 1800 km de régions plissées entre la Forêt-Noire et l'Afrique, obtient une largeur de 3500 km.

La théorie de la contraction n'a plus aujourd'hui la faveur des géologues et la conception d'une contraction généralisée de l'écorce terrestre n'a guère de partisans. De nombreuses objections ont été faites à la théorie. Les géophysiciens prétendent démontrer par le calcul que le raccourcissement du rayon de la terre a été trop minime pour pouvoir expliquer le rétrécissement élaborée en une période beaucoup plus courte.
tiaires.

B. GUTENBERG, par exemple, se basant sur la supposition que le raccourcissement du rayon de la terre n'a probablement pas excédé 1 mm par siècle, a calculé que dans les 100 millions d'années écoulées depuis le début de l'ère secondaire seule aurait pu naître une montagne de 2 km de haut et 200 km de largeur. Or la formation des Alpes exigerait un raccourcissement du rayon terrestre de 2 km, soit dans l'hypothèse adoptée, une durée de 200 millions d'années. Et l'on sait que la chaîne a été entièrement de la surface par les plis serrés des grandes chaînes ter-

Dans un autre ordre d'idées, en partant des coefficients de contraction déterminés par HEIM, MERCIER et STAUB et des coefficients de dilatation connus des matériaux de l'écorce terrestre, il doit être possible de déterminer par le calcul, au moins l'ordre de grandeur de l'abaissement de température correspondant.

En admettant avec A. HEIM pour les Alpes une réduction au 3/4 de la surface initiale, une largeur originelle de 1200 km et un coefficient de dilatation égal à la moyenne du coefficient de dilatation du calcaire, du quartz, du fer et du nickel, on arriverait à un chiffre approximatif de 2000 degrés, ce qui montre que l'hypothèse de la contraction correspond à une diminution de température énorme et qui est incompatible avec toutes les données géologiques d'après lesquelles l'abaissement de la température n'est depuis les temps primaires que de quelques degrés.

L'existence de périodes froides avec glaciers plus ou moins généralisés dès les périodes primaires prouverait plutôt que la déperdition progressive de chaleur par le rayonnement n'existe pas. Ces périodes glaciaires témoigneraient de températures moyennes analogues à celles des temps quaternaires et modernes.

Encore les phénomènes de radioactivité contredisent le refroidissement progressif de la terre; celle-ci paraît même, au contraire, se réchauffer.

Malgré ces objections, la théorie de la contraction demeurait vivace dans nombre d'esprits. ALBERT HEIM la défendait encore avec force en 1920 dans sa «Geologie der Schweiz». Son jugement: «Die Vorstellung einer Kernverkleinerung der Erde ist so lange berechtigt als man ihr keinen Irrtum in den Annahmen und Grundlagen nachweisen kann und nichts Besseres an ihre Stelle zu setzen weiss», n'est pas encore réfuté d'une manière irrécusable. Dans un mémoire publié en 1926 H. STILLE reste, lui aussi, partisan de la théorie de la contraction.

Enfin P. FOURMARIER après avoir soumis dans son ouvrage: «Principes de Géologie» (édition 1944) la théorie à un examen critique très serré et pesé les objections qu'on a opposées à la réalité d'une contraction est arrivé à la conclusion que plusieurs

de ces objections ne sont pas pertinentes, que d'autres sont sérieuses, mais qu'aucune d'elles n'a assez de poids pour réfuter définitivement et sans recours la théorie. Même la découverte de la radioactivité qui semblait avoir porté le coup mortel à la théorie, soulève d'autres problèmes tout aussi graves que ceux qu'elle prétend résoudre.

La Théorie de l'Isostasie.

Une notion géophysique sur les lois d'équilibre de la terre entière introduite dans la géologie va devenir une théorie auxiliaire dans l'explication de l'origine des phénomènes de plissement de l'écorce terrestre et y opérera un changement d'orientation dans la voie des recherches.

Cette théorie part de deux faits importants de la Physique du Globe, désignés sous les noms de déviation de la verticale et d'anomalies de la pesanteur.

Deux corps quelconques, de masses M et M', s'attirent selon la force «f» dont la grandeur est déterminée par la loi de Newton ou loi d'attraction universelle. Dans le cas particulier d'un corps situé à la surface de la terre et attiré par celle-ci, on parle ordinairement de poids; ce poids étant le produit de la masse par une certaine valeur g dite couramment attration ou intensité de la pesanteur, variable suivant les points.

Ce coefficient g dépend en particulier de la nature des masses qui constituent l'écorce terrestre dans la région considérée. Il est donc logique de penser que l'étude de ces variations donnera des renseignements sur la répartition des matières à l'intérieur du globe terrestre. Mais l'utilisation de ces connaissances sur l'attraction de la pesanteur ne peut se faire qu'en relation avec les notions sur la forme de la terre, telle qu'elle est donnée par la géodésie.

D'après ces données la terre a la forme générale d'un ellipsoïde aplati aux pôles. Cet aplatissement est une conséquence directe de son mouvement de rotation, l'ellipsoïde étant en

effet la figure d'équilibre d'une masse fluide soumise simultanément à une rotation et à l'effet de sa propre attraction.

Mais à cause des inégalités de la surface de la terre où existent des masses continentales à côté des abîmes des océans et à cause des déformations que subit la mer de la part des masses continentales, la terre est un ellipsoïde de révolution modifié par la terre ferme et qu'on désigne du nom de g é o ï d e.

La recherche de l'aplatissement moyen du globe terrestre ou, en d'autres termes, la détermination de la forme du globe peut être faite soit par des mesures géodésiques (méthodes géométrique) soit par l'observation du pendule (méthode physique).

« Dans la m é t h o d e g é o m é t r i q u e on détermine la longueur de deux arcs de méridien ou de parallèle et leurs amplitudes angulaires en latitude ou longitude. On obtient, pour les longueurs de ces deux arcs, des valeurs différentes de celles que l'on observerait sur une sphère, et on établit ainsi des équations où interviennent l'aplatissement et le demi-grand axe de l'ellipsoïde. La forme de l'ellipsoïde en est alors déduite.» (M. ROUBAULT, loc. cit. p. 42)

« Dans la m é t h o d e p h y s i q u e on détermine la valeur de g ou attraction de la pesanteur à l'aide d'un pendule et on réduit cette valeur au niveau de la mer. Le mathématicien CLAIRAULT a établi deux relations fondamentales dites «équations de Clairault» permettant de donner les valeurs de g à l'équateur et au pôle et par lesquelles on détermine l'aplatissement de l'elliopsoïde terrestre à l'exclusion du demi-grand axe, c'est-à-dire sa figure à l'exclusion de ses dimensions.» (M. ROUBAULT, loc. cit. p. 44).

Les travaux géodésiques ont établi la nécessité de rapporter les mesures faites à la surface de la terre à un g é o ï d e t e r r e s t r e, matérialisé par la surface de la mer prolongée sous les continents et abstraction faite du relief des continents. Ce géoïde fictif est dit e l l i p s o i d e d e r é f é r e n c e.

« Soit O un point situé à la surface du géoïde, ONs la direction du fil à plomb (la verticale) en ce point, on appelle s u r f a c e d e n i v e a u une surface S normale à la direction

ONs ou, d'une façon plus générale, une surface normale à la direction de la pesanteur. (Figure No 1)

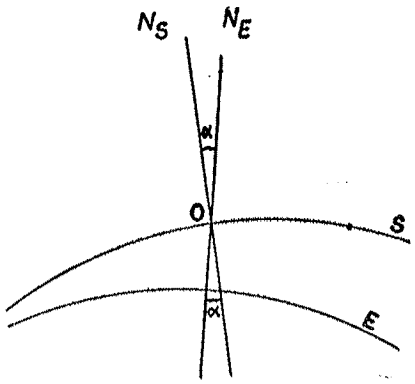


Fig. 1.
(D'après M. ROUBAULT, loc. cit. p. 45).

Soit E la section de l'ellipsoïde de référence et ON la normale en O à l'ellipsoïde de référence. ON_E fait avec la normale ONs, précédemment définie, un certain angle α Cet angle est dit déviation de la verticale.

Il résulte de ceci que la déviation dépend étroitement de la forme de l'ellipsoïde de référence. Il apparaît donc tout de suite la nécessité de conventions internationales précisant l'ellipsoïde de référence adopté, si l'on veut comparer des mesures faites en différents points du globe.

On mesure les déviations de la verticale en comparant les résultats d'observations astronomiques effectuées sur le terrain et ceux de calculs géodésiques faits sur l'ellipsoïde de référence.

Or, fait important, les mesures des déviations de la verticale effectuées ont conduit à l'obtention de valeurs notablement différentes des valeurs calculées. (M. ROUBAULT, loc. cit. p. 46).

La première observation de ce genre a été faite par l'astronome français BOUGUER qui mesura de 1735 à 1744 un arc de méridien dans les Andes. Il y trouva une valeur observée infé-

rieure à la valeur calculée et se montrant précurseur génial des idées modernes, il soupçonna des défauts de masses intérieurs dans les montagnes par rapport à la plaine.

Depuis cette époque les cas de déviation anormale se sont révélés de plus en plus nombreux; ceux observés dans les régions de l'Himalaya sont les plus connus. Mais l'interprétation de BOUGUER a été longtemps négligée; les géodésiens les enregistraient comme des erreurs et ce n'est que beaucoup plus tard qu'on est revenu à l'interprétation soupçonnée par BOUGUER.

Anomalies de la pesanteur.

Les équations de CLAIRAULT, perfectionnées depuis par HELMERT permettent de calculer la valeur de l'attraction de la pesanteur en un point de latitude connu sur l'ellepsoïde de référence d'aplatissement connu.

On peut supposer la terre figurée par un sphéroïde qu'on obtient en supposant la surface de niveau de la mer prolongée sous les continents et dont la densité irait en augmentant régulièrement de la surface au centre. HELMERT a donné une formule qui permet de calculer ce que devrait être la pesanteur sur chaque point de latitude connu sur un sphéroïde d'aplatissement également connu. On obtient ainsi l'intensité de la pesanteur calculée.

Mais on peut aussi mesurer la pesanteur en un point d'altitude et de latitude connu ramené au niveau de la mer du géoïde terrestre, ce qui donne l'intensité de la pesanteur mesurée.

Pour un même point la valeur calculée et la valeur mesurée peuvent être concordantes, mais en général il y a discordance et on dit qu'il y a anomalie de la pesanteur entre la valeur calculée sur l'ellipsoïde de référence et la valeur mesurée rapportée au géoïde.

L'anomalie de la pesanteur en un point donné est essentiellement liée à un défaut d'homogénéité de l'écorce terrestre

et à la présence de masses anormales situées localement dans celle-ci, ce qui explique l'importance de la connaissance de l'anomalie de pesanteur dans l'étude des propriétés de l'écorce terrestre. La différence entre ces deux valeurs peut être positive ou négative. Elle est positive quand la pesanteur est plus forte qu'elle devrait être dans le cas d'un globe constitué d'une façon théorique et négative quand la pesanteur est déficitaire par rapport à la pesanteur calculée.

En général les anomalies positives se rencontrent sur les océans et les anomalies négatives sur les continents et surtout dans les massifs montagneux. De telles anomalies négatives ont été constatées dans les Alpes, les Pyrénées, le Jura, l'Himalaya. On a encore pu constater que dans les Alpes le maximum d'anomalie ne correspond pas aux parties les plus élevées. Par contre l'attraction de la pesanteur est généralement trop forte sur les océans. Ces anomalies de la gravité sont généralement accompagnées d'anomalies de la direction de la pesanteur, dites déviations de la verticale. Ce sont là des faits constatés traduits par des mesures objectives et qui montrent des déficits de masse très nets pour les continents auxquels correspond une densité plus faible puisque l'écorce terrestre sous-océanique, dont le volume est moindre, exerce une attraction supérieure.

Comme dans son ensemble on doit admettre une distribution régulière de la pesanteur et comme le géoïde terrestre se trouve, comme ensemble, dans l'équilibre hydrostatique, il en découle que les anomalies de gravité contatées à la surface se réduisent à une zone peu puissante entre une couche de référence qui est le niveau de la mer et une surface à pression constante. Dans la zone entre ces deux surfaces doivent se produire forcément des mouvements de la croûte en vue de tendre au rétablissement d'un équilibre. Cette tendance à l'équilibre est désignée du nom d'isostasie.

De cette notion purement mathématique mais basée sur des faits d'observation découlent des déductions d'un grand intérêt pour la géologie.

D'abord il doit forcément se produire des mouvements de la croûte en vue de tendre au rétablissement de l'équilibre toujours dérangé par les forces internes et externes du globe.

Puis, ces mouvements ne sont possibles que si la croûte est mobile par rapport à son substratum. Il doit donc exister une zone de discontinuité ou de faiblesse dans une profondeur relativement faible. BARELL admet donc l'existence d'une telle surface séparant la lithosphère de la centrosphère et qu'il désigne du nom d'asténosphère.

Mais laissons de côté pour l'instant toutes les théories dans lesquelles on a cherché à utiliser la notion d'isostasie pour expliquer la formation des chaînes de montagnes et examinons les théories émises pour expliquer les faits constatés du point de vue géodésique. Deux théories ont été énoncées en 1855; elles sont dues à PRATT et à AIRY.

L'archidiacre PRATT qui étudiait en 1855 dans la plaine du Gange au voisinage de l'Himalaya les déviations de la verticale avait été frappé par les anomalies de la gravité qu'il y constatait. Dans le massif des montagnes il trouvait un déficit de gravité par rapport aux masses de la plaine Pour expliquer ces anomalies il estimait que les masses de l'Himalaya et de la plaine étaient constituées par des massifs de roches indépendants les uns des autres, de hauteur et de densité différente pour la même espèce de roches, mais de poids égaux et qui plongeraient dans la profondeur jusqu'à une surface de compensation de densité uniforme. Il estimait donc que les roches constituant les montagnes doivent être comme boursoufflées et de densité réduite par rapport aux mêmes roches constituant les plaines de sorte que l'excès de masse des montagnes serait compensé par un déficit de densité.

On pourrait matérialiser les vues de PRATT en plaçant dans un bain de mercure des blocs de même section transversale et de densité différente, mais dont les hauteurs seraient calculées de manière à donner à tous les blocs le même poids. (Figure No 2, A.)

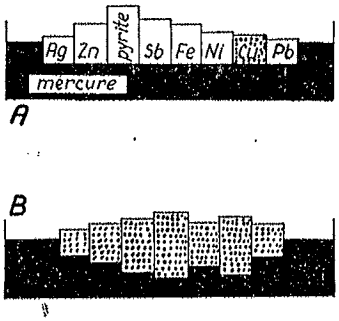


Figure 2.

La figure 2 A matérialise la conception de PRATT, la figure 2 B celle d'AIRY (d'après L. MORET, loc. cit. p. 6). Dans le premier cas les prismes sont de différentes natures mais de même poids; dans le second cas les prismes sont de même nature et possédant p. ex. la densité du cuivre.

La conception de PRATT contient en puissance la notion de compensation en profondeur de l'inégale répartition des masses de densité différente, car il parle textuellement «d'une atténuation sans doute répartie sur une grande profondeur».

Cette conception de PRATT n'est pas très précise aussi bien du point de vue physique que géologique, mais elle trouve quand-même une certaine vraisemblance dans la grande diversité des roches qui constituent la croûte terrestre sous de différentes conditions de profondeur et de pression.

La même année, l'astronome AIRY émit une autre conception sur le même sujet. Il admit que la densité d'une roche déterminée de la croûte terrestre est partout essentiellement la même, que les continents et spécialement les zones montagneuses correspondent à des blocs d'une roche de densité moindre et flottant sur un soubassement plus dense et mobile mais extrêmement visqueux dans lequel ils plongent comme des tronçons de glace dans la zone subcrustale liquide et à partir d'une profondeur déterminée l'équilibre hydrostatique existe.

Dans l'ordre d'idées d'Airy, on pourrait faire ce calcul, évidemment grossier.

Soit d la densité d'une masse continentale (granite) d' la densité du fond sous-océanique (basalte), h' l'altitude moyenne

du continent, h" la hauteur de sa partie immergée, on peut écrire, en négligeant le poids de l'eau de l'océan

$$(h'' + h')\ d = h''\ d'$$

$$\text{où } h'' = \frac{d}{d' - d}\ h'.$$

Soit 2,9 la valeur de d' (densité moyenne du basalte) et 2,6 la valeur de d (densité moyenne du granite) on obtient h" = 8,6 h'. (Voir Fig. No 3)

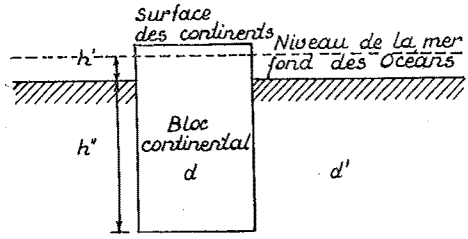


Fig. 3.
(D'après M. Roubault, loc. cit. p. 56).

Ce calcul montre que les masses continentales plongent, d'une façon notable, dans la masse sous-océanique et d'après notre calcul grossier la racine d'un continent dépasserait de 8,6 fois la hauteur de la partie émergée d'un continent. L'existence d'une telle «racine» des continents qui plonge dans la masse plus dense sous-océanique a d'ailleurs été confirmée par les observations séismologiques.

Une telle disposition pourrait être réalisée expérimentalement en plaçant dans le bain de mercure des prismes de même secteur et de même nature et possédant la même densité, mais des hauteurs différentes et par conséquent des poids différents. Ces prismes plongent dans le mercure jusqu'à des profondeurs en relation avec leurs poids et émergent dans la même relation. (Figure No 2, B.)

D'après la conception d'Airy, qui est aussi celle de la géologie, on peut considérer la croûte de la terre comme reposant sur les couches profondes plus denses et d'une plasticité latente

pour permettre des déformations sous l'action de contraintes prolongées.

Comme la cause du déficit de masse sous les hautes montagnes ne réside pas dans la densité réduite de la roche en ces régions, il faut conclure que cette cause se trouve dans la profondeur et que ces anomalies traduisent une certaine irrégularité de la répartition des masses profondes.

D'après les observations sur les anomalies précitées, l'isostasie apparaît comme un fait indéniable, dont l'existence n'est plus à discuter. Elle dit que l'écorce terrestre est dans un état d'équilibre particulier, l'équilibre isostatique, qui est en effet une notion de déséquilibre. Mais à partir d'une certaine profondeur, dite profondeur de compensation, tout rentre dans l'ordre. Au delà de cette profondeur, qui est de l'ordre de 40 à 60 km, la répartition des masses semble être régie par une loi de répartition régulière sous la forme de zones concentriques de densité croissante. En outre, on y peut admettre une répartition sensiblement hydrostatique des pressions.

Intercalons ici quelques mots sur la nature et la répartition des masses qui forment le globe terrestre. D'après une conception de ED. SUESS, le globe terrestre est formé de deux enveloppes recouvrant un noyau profond. L'enveloppe supérieure, la lithosphère, accessible à l'observation directe, est constituée par des roches légères, de la composition moyenne du granite et d'une densité moyenne de 2,6, caractérisée par la présence de Si et Al, d'où le nom de « Sial » donné par SUESS à cette zone. Le Sial repose sur une autre enveloppe formée de roches basiques ayant la composition moyenne d'un basalte ou d'une péridotite de la densité moyenne de 2,9 et caractérisée par la présence de silicium et de magnésium, d'où le nom de « Sima ». On attribue au Sima une puissance de 2900 km. Enfin vient le noyau lourd, probablement rigide et constitué par du fer et du nickel; d'où le nom de « nife ».

D'après les recherches géophysiques récentes on admet aujourd'hui que la base du Sial fait corps avec la partie superficielle cristalline du Sima et que cet ensemble qui forme la

«croûte» de la terre flotte sur la partie inférieure visqueuse et plastique du Sima dite « Sima vitreux ». On suppose d'après l'étude de la propagation des ondes sismiques que la surface de discontinuité entre la croûte et le Sima vitreux serait entre 40 et 60 km de profondeur.

Le « Sima cristallin » est constitué par des masses basaltiques, tandis que le sima vitreux est formé de péridotite, roche plus dense que le basalte.

C'est le géologue américain C. E. DUTTON qui, en 1889, a appliqué à la géologie les conceptions d'AIRY et de PRATT et qui proposa le nom »d'isostasie' qu'il définissait comme « la condition d'équilibre de la figure vers laquelle la gravité tend à réduire un corps planétaire qu'il soit homogène ou non ».

Il argumentait que la croûte, figée et de densité réduite reposant sur un magma mobile et plus dense, doit être par suite de la rotation axiale de la terre, dans l'équilibre hydrostatique et que cet équilibre ne comporte pas de dérangements permanents.

Si la terre était une masse homogène, sa figure d'équilibre serait un ellipsoïde géométrique. Mais comme elle est hétérogène et que la croûte est d'une puissance inégale et d'une densité qui diffère de celle du magma, il doit se produire des renflements dans les endroits d'accumulation de la matière moins dense et, au contraire, une dépression dans les lieux d'accumulation de la matière plus dense. A cause de l'isostasie la terre tendra toujours vers la figure qui répond à un sphéroïde de rotation. Si dans un point quelconque la valeur de la gravité répondant à ce point n'est pas réalisée, la croûte se lève; si cette valeur est dépassée, elle s'affaisse.

DUTTON estime que les mouvements terrestres tendant à donner à la terre sa figure d'équilibre, pourraient suffire pour expliquer la formation des continents, des bassins océaniques et des chaînes de montagnes en dehors de toute lypothèse sur le refroidissement de la planète et sur la constitution du noyau central. Or les conditions d'équilibre de la surface sont constamment dérangées par la dénudation à laquelle correspond à

un autre point une accumulation, provoquant une décharge respectivement une surcharge.

Comme chaque dérangement de l'équilibre dans un point de la surface doit être compensé à un autre point, le bloc déchargé monte et, par contre, le bloc surchargé s'affaisse, ce qui expliquerait d'après DUTTON les vastes mouvements verticaux constatés bien des fois dans l'histoire de la terre, réglés par les lois de l'isostasie. Comme tels on pourrait citer l'oscillation des socles de la Scandinavie et de l'Amérique du Nord qui s'affaissaient sous la charge des immenses glaciers du quaternaire pour se relever petit à petit après la fonte de ces calottes de glace. De même, l'affaissement des dépressions géosynclinales, des dépressions renfermant les dépôts houillers etc., serait réglé par l'isostasie.

DUTTON estime encore que par suite de la dénudation des continents et de l'accumulation des produits érodés le long des rivages des océans, les continents se trouvent déchargés et les régions littorales surchargées ce qui provoquerait un afflux de matière des régions surchargées pour que l'équilibre isostatique soit rétabli.

La poussée tangentielle de cet afflux déterminerait dans la région littorale la formation de plis parallèles, à déversement unilatéral et de direction perpendiculaire à la poussée, plis dont l'ensemble constituerait une chaîne de montagnes.

La théorie de DUTTON invoque une des données les plus solides de la géophysique qui n'a pas été contredite par les observations faites jusqu'à ce jour. Elle s'accommode bien de la présence des plissements sur les parcours des continents, du déversement des plis sur les continents et du serrement produit dans les géosynclinaux.

Elle a eu ses partisans convaincus, tandis que d'autres étaient d'avis qu'elle n'est pas adéquate aux problèmes grandioses qu'elle veut expliquer. Les adversaires reprochent à cette théorie que l'isostasie n'est pas assez opérante pour expliquer la surrection des chaînes de montagnes, ce qui impliquerait des oscillations du fond des océans peu vraisemblables eu égard à

ce que nous savons de la rigidité de l'écorce terrestre sous une surcharge donnée. Une couverture de glace d'une puissance de 2 km ayant entraîné un enfoncement du bouclier baltique de l'ordre de 200 à 300 m, on peut se demander quelle masse énorme de sédiments de densité 2,5 à 2,8 il faudrait invoquer pour provoquer, par réaction, le déséquilibre nécessaire à la formation d'une chaîne de plusieurs milliers de mètres de hauteur. Aussi c'est dans la combinaison avec d'autres causes qu'on cherchait la cause de la formation des chaînes de montagnes.

On veut bien admettre que l'isostasie explique les mouvements verticaux de la croûte terrestre, car une décharge de cette croûte par la dénudation doit provoquer un relèvement comme une surcharge par la sédimentation donnera naissance à un affaissement, mais comme la croûte est aussi soumise à des déplacements tangentiels il faut admettre que cette croûte peut se déplacer latéralement sur son substratum ce qui mène à la notion du « mobilisme ». (Voir p. 66).

Théorie de la dérive des continents.

La forme extrême du « mobilisme » est représentée par la « théorie de la dérive des continents » d'ALFRED WEGENER.

A. WEGENER a d'abord exposé brièvement cette théorie en 1912; il l'a développée en 1915 dans un livre: « Entstehung der Kontinente und Ozeane » et il l'a refondue dans plusieurs éditions jusqu'à sa mort en 1930 au cours d'une expédition en Groenland, en tenant compte des documents qui lui étaient opposés ou favorables.

La théorie veut établir une corrélation entre des données de la géophysique et celles de la géographie et de la géologie.

WEGENER admet, d'après AIRY, que les blocs continentaux forment des compartiments mobiles les uns par rapport aux autres. Les continents diffèrent, d'après sa conception, essentiellement des fonds océaniques. Dans les continents la masse granitique (Sial, densité 2,3) prédomine. Dans les fonds océ-

aniques, le sima vitreux (dunite) de densité 3 est largement prédominant et, au détriment du Sial, se prolonge sous celui-ci, de sorte qu'il existe un substratum simique continu sous une croûte discontinue.

A l'endroit des océans, il y a un excès de matériaux denses tandis que les continents, par contre, sont caractérisés par un excès de matière légère. Les continents sont donc des blocs de Sial flottant comme les ice-bergs flottent sur l'eau de la mer.

En allant à la dérive, d'où le nom de théorie de la dérive, ces blocs raclent devant eux des masses du Sial qui sont serrées et dressées en chaînes de montagnes.

Dans son état initial la théorie de WEGENER est fondée sur une constatation de fait purement géographique: la concordance des côtes atlantiques qui fit émettre à WEGENER l'hypothèse, pour l'Océan atlantique, d'une brisure agrandie par l'éloignement de ses bords américains et euro-africains.

Pour expliquer la formation des divers continents actuels, WEGENER admet qu'au début du Mésozoique tous les continents ne formaient qu'une immense masse coupée en deux par une large mer épicontinentale, la Thétys. (Figure 4)

Au Jurassique la dérive commençait. Madagascar est séparé de l'Afrique; l'Inde s'en est écartée et a écrasé devant elle le socle faiblement immergé qui la rattachait à l'Asie; l'Australie s'est dirigée vers l'Est, ce qui a provoqué la formation des chaînes plissées de la Nouvelle-Zélande. Après, l'Australie s'est déplacée vers le Nord en refoulant devant elle la Nouvelle-Guinée qui n'est séparée de l'Australie que par une mer épicontinentale et qui fait encore aujourd'hui corps avec l'Australie. Les guirlandes insulaires, Japon et Indomalaisie, deviennent des fragments de chaînes côtières, abandonnées par la dérive de l'Eurasie et restées englués dans le Sima visqueux tout comme la Nouvelle-Zélande s'est détachée par un processus analogue. Pendant le même temps l'Antarctie s'écartait de l'Australie, de l'Afrique et de l'Amérique du Sud.

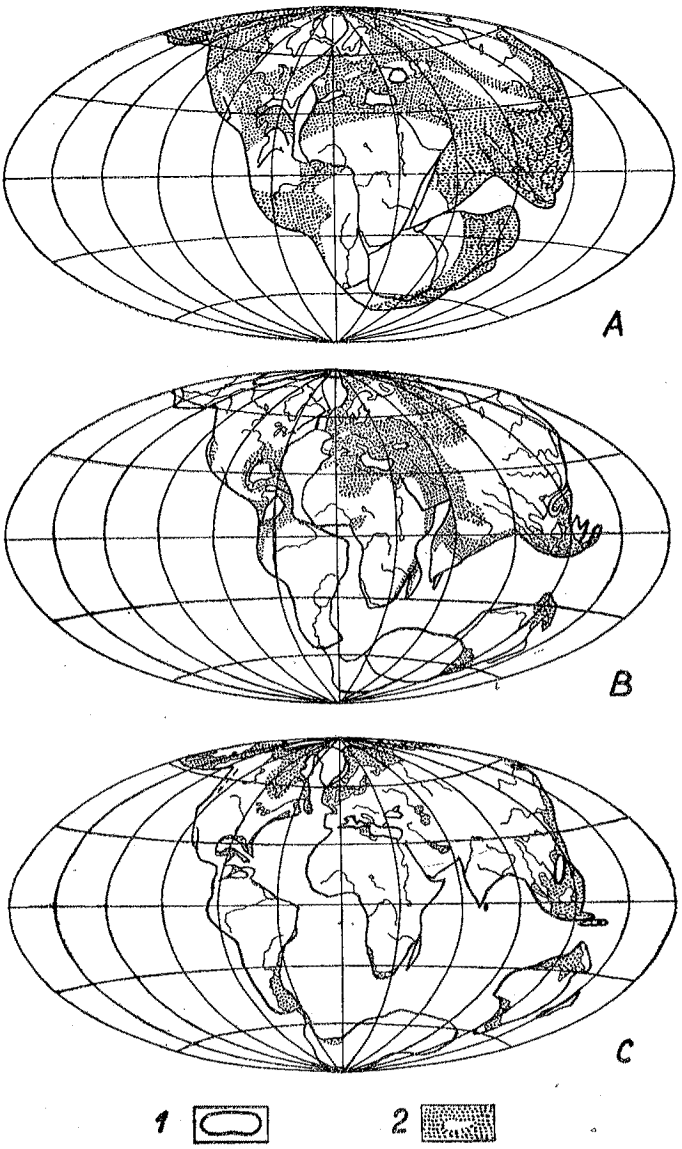


Fig. 4

La dérive des continents depuis le Carbonifère supérieur jusqu'au Quaternaire ancien (d'après A. Wegener).
A = Carbonifere supérieur B = Eocène; C = Quaternaire ancien.
1 = Contours des masses continentales; 2 = Mers épécontinentales.

Par suite de la translation des Indes et de l'Afrique vers le Nord, les sédiments accumulés dans la zone d'affaissement de la Thétys ont été écrasés et dressés en plis qui forment les chaînes alpines de l'Europe et de l'Asie centrale.

La dérive du continent américain commençait, d'après WEGENER, à partir du Crétacé. Prenant comme point de départ de sa théorie le fait que la côte orientale de l'Amérique et la côte occidentale de l'Eurafrique présentent une telle similitude de forme qu'en les faisant glisser de façon à les mettre en contact elles coïncident d'une manière frappante, WEGENER admet que les deux continents se sont disjoints le long d'une crevasse vers la fin du Crétacé. La présence de Crétacé marin sur les deux rives opposées permet de dater exactement le commencement de la dérive. La crevasse s'est ouverte de proche en proche dans la direction du Nord, de sorte que la séparation du Groenland est de date assez récente.

Les Amériques ont dérivé vers l'Ouest par rapport à l'Europe et l'Afrique et la preuve en est donnée par la présence de la longue chaîne plissée longeant le rivage Ouest des Amériques et résultant du frottement du bloc mobile sur le substratum visqueux à la surface duquel il dérivait.

De même que les guirlandes d'îles disposées en bordure de l'Asie orientale sont des fragments de ce continent laissés en arrière, les Antilles sont des fragments de l'Amérique en dérive.

WEGENER admet que les continents ont dérivé de l'Est vers l'Ouest, mais le mouvement fut différentiel, de sorte que les Amériques avançaient plus vite par rapport à l'Eurafrique que celle-ci n'avançait elle-même vers l'Ouest.

A l'appui de cette thèse, WEGENER rappelle que les continents se terminent en pointe vers le Sud, présentant une déviation caractéristique de cette pointe vers l'Est, qui serait l'effet d'un retard dans leur translation (Floride, Terre du Feu, Terre de Graham.)

Au cours de tous ces mouvements, les mers épicontinentales suivent le sort des continents auxquels elles sont étroitement liées.

WEGENER admet aussi, ce qui est d'ailleurs une conception de la géologie classique, que le Sial entourait autrefois la terre par une enveloppe continue, recouverte d'une nappe d'eau continue. Si l'on déroulait les plissements de socles continentaux, on arriverait à une étendue du Sial suffisant à recouvrir la surface entière de la terre. Aussi plus on remonte vers l'ère archéenne, plus l'étendue des zones plissées devient considérable. Ce n'est qu'à partir de l'Algonkien qu'on rencontre des dépôts horizontaux ou faiblement plissés. Plus on se rapproche des temps récents, plus les zones soumises au plissement se rétrécissent. La croûte sialique, originellement continue, a pu se fissurer et ses fragments se concentrer par suite du plissement, en découvrant le sima à l'endroit des océans.

La théorie de WEGENER a séduit beaucoup de géologues par sa conception du continent de Gondwana au Permo-Carbonifère. Depuis longtemps déjà les géologues avaient conçu la notion d'un grand continent disparu, situé dans l'hémisphère austral auquel E. SUESS avait donné le nom de Gondwana. (Fig. 5)

Cette conception se basait sur les faits suivants: Aux Indes, à Madagascar, en Afrique du Sud, en Amérique du Sud, en Australie, des surfaces étendues sont recouvertes de formations horizontales caractérisées par leur origine continentale, la présence d'une même flore dite Flore à Glossopteris du nom d'une plante spéciale inconnue dans les séries houillères de l'hémisphère nord, la présence de formations glaciaires à galets striés, le tout d'âge permo-houiller.

La géologie classique était d'avis que les contrées dispersées de l'hémisphère austral et où se trouvaient ces caratères étaient des fragments d'un continent ininterrompu, anormalement grand et aujourd'hui, dans sa majeure partie, enseveli.

Mais la théorie de la dérive des continents donne une solution élégante au problème de la disjonction des fragments d'un bloc continental de grandeur normale.

Dans la conception de WEGENER du continent de Gondwana seraient raccordés tous ces morceaux en mouvement, ce qui expliquerait aussi les phénomènes glaciers de l'Amérique et de

l'Afrique du Sud, de Madagascar, de l'Inde péninsulaire et de l'Australie durant cette ère géologique.

Cet immense bloc, après avoir subi une glaciation à cette époque, n'avait qu'à subir une dissociation vers le commencement du Secondaire et la dérive des fragments vers leur situation actuelle et la présence des traces de glaciation sur l'hémisphère australe entière est compréhensible. Cette dissociation de

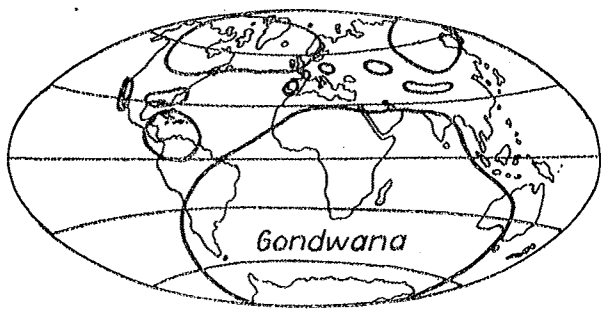


Fig. 5.
Le continent de Gondwana dans la conception classique.
(d'après ARLT.)

l'ancien bloc expliquerait aussi d'un coup les affinités fauniques et floristiques entre ces différents fragments et supprimerait la nécessité d'invoquer l'existence d'anciens « ponts continentaux » pour expliquer la migration d'animaux terrestres et de plantes au cours des périodes géologiques.

La théorie de WEGENER a donné lieu à des controverses et à des objections.

La notion d'isostasie invoquée par l'auteur implique la possibilité de mouvements verticaux de la croûte en vue de rétablir l'équilibre troublé; elle admet que le substratum est visqueux au point de permettre de tels déplacements. La vitesse de propagation des ondes séismiques indique que sous le fond des océans la densité est plus grande qu'à l'endroit des continents; cette notion est en accord avec les mesures de gravité. Mais la notion d'isostasie n'implique pas une p r e u v e pour les translations continentales. On peut seulement dire qu'un déplacement

des continents, dans ces conditions, nous apparaît du moins comme possible.

Comme moteur des translations continentales WEGENER invoque des forces extérieures à la terre: la dérive vers l'Ouest résulterait de la force retardatrice due aux marées; quant à la translation vers l'équateur, elle serait due à la force répulsive du pôle ou la poussée vers l'équateur.

Il y a une certaine indétermination dans cette conception. WEGENER estime que l'Australie dérivait vers l'Est, tandis que l'Europe se déplaçait vers l'Ouest; or il est difficile d'admettre que des forces nées d'une même cause peuvent provoquer le déplacement tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Il est aussi difficile de prouver que ces forces étaient assez efficaces pour produire les déformations intenses de la croûte terrestre.

WEGENER admet que la dérive des Amériques par rapport à l'Eurafrique a été continue aux cours des périodes géologiques postérieures au Crétacé et qu'elle se poursuit encore à l'heure actuelle. Les méthodes les plus précises de la géodésie doivent donc permettre de la mesurer.

Parmi les chiffres cités par l'auteur retenons ceux qu'il donne pour le déplacement annuel entre le Groenland et l'Europe.

Les observations ont donné pour l'intervalle 1823 à 1870 un déplacement de 9 m par an, pour 1870 à 1907 de 32 m par an.

Mais ces chiffres n'ont rien d'une justification exacte de la théorie de la dérive, car malgré qu'ils cadrent avec cette théorie ils peuvent avoir d'autres causes. Des mesures de précision établies par divers observatoires de l'Europe, des Etats-Unis, du Japon, indiquent des variations périodiques des longitudes de ces observatoires, dont la période serait de 11 ans et demi et dont la cause semble devoir être cherchée dans des pulsations dues à l'élasticité de la terre. Les contractions et les dilatations de la couche superficielle seraient la cause première de ce phénomène. Ces variations seraient des conséquences non d'une translation mais d'une déformation du globe.

La théorie de la dérive permet une explication plus simple des analogies observées entre les faunes de l'Amérique du Sud, de l'Afrique, de l'Inde et de l'Australie si l'on admet l'existence d'un seul continent, la terre de Gondwana, qui s'est fragmentée et a dérivé dans la suite.

Les éléments anciens de la faune australienne sont apparentés à ceux de l'Inde et du Ceylon; les éléments plus récents sont semblables à ceux de l'Amérique du Sud et diffèrent nettement de ceux des îles de la Sonde. Mais les éléments les plus récents rappellent ceux de ces Iles.

De même la flore à Glossopteris qui caractérise le Permien de l'hémisphère sud est tellement semblable en Amérique du Sud, en Afrique australe et centrale, à Madagascar, dans l'Inde péninsulaire et en Australie que E. SUESS avait déjà admis au Permien un vaste continent du début du Jurassique jusqu'au Permien un vaste continent qui se fragmentait du début du Jurassique jusqu'au Crétacé.

L'Atlantique ne possède pas les formes très anciennes du Pacifique, ce qui laisse supposer que les deux océans ne sont pas du même âge.

Par contre de nombreux mammifères et reptiles sont communs à l'Europe et à l'Amérique du Nord, ce qui indique que les deux continents étaient réunis dans un seul jusqu'à une date très récente. D'autres faits paléontologiques sont moins pertinents.

WEGENER estime que la comparaison des faunes de l'Amérique du Sud et de l'Afrique donne un argument en faveur de la dérive. D'après le paléontologue CH. SCHUCHERT la proportion des fossiles communs au deux rives de l'Atlantique ne dépasse pas 5 %. On pourrait encore faire remarquer que jusqu'à la fin du Tertiaire ancien, les climats étaient moins différenciés de sorte que l'analogie des faunes n'implique pas nécessairement un contact intime des continents.

Par contre dans la région de l'Atlantique nord les faunes d'invertébrés tertiaires présentent des différences de part et d'autre de l'océan, ce qui paraît en contradiction avec la théorie

de la dérive qui veut que l'Atlantique nord ne se soit formé qu'au tertiaire.

D'ailleurs on peut faire remarquer que, si les continents étaient réunis dans un seul bloc jusqu'au Crétacé, il devrait y avoir une bien plus grande uniformité des plantes et des animaux dans toutes les parties du monde avant cette époque et W. BERG estime que, du point de vue paléontologique, la théorie soulève plus de problèmes qu'elle ne prétend en résoudre.

Mais ce sont surtout les arguments géologiques qui doivent retenir l'attention dans un examen critique de la théorie.

Si les côtes de l'Atlantique étaient jadis en connexion parce qu'il y a analogie des contours du point de vue géographique, il doit y avoir également concordance du point de vue géologique.

WEGENER a donné une série d'arguments en faveur de la jonction entre l'Amérique du sud et l'Afrique et A. DU TOIT a appuyé ces arguments de faits qui ne peuvent manquer d'impressionner.

WEGENER a apporté à l'appui de sa thèse que la chaîne de l'Atlas, dont la formation eut lieu surtout dès l'Oligocène, n'a pas de prolongement en Amérique, parce que la disjonction des deux continents a dû se faire avant l'Oligocène.

Sur les rivages de l'Atlantique nord, les chaînes hercyniennes et calédoniennes de l'est de l'Amérique se prolongent directement en Europe, ce qui s'explique le plus simplement par l'idée de la dérive et l'élargissement d'une fissure.

Au nord de ces chaînes se trouvent des chaînes algonkiennes qui forment en Europe les Hébrides, en Amérique les chaînes du Labrador. La théorie de la dérive permet un emboîtement du tronçon américain dans celui de l'Europe sous condition qu'on fasse intervenir une translation et un mouvement de rotation.

De même le plateau basaltique qui s'étend sur le nord de l'Irlande, le nord de l'Ecosse, les Hébrides et les Färoër se poursuit en Islande et dans l'Ouest du Grœnland.

On constate aussi la présence de l'Old Red Sandstone sur les deux rives de l'Atlantique nord.

Il paraît rationnel que ces dispositions résultent d'une disjonction de l'Amérique par rapport à l'Europe, mais d'autres similitudes géologiques dans deux continents opposés ne permettent pas cette conclusion.

Il existe p. ex. des similitudes aussi grandes entre l'est de l'Asie et l'ouest de l'Amérique du Nord qu'on ne peut pas expliquer par une disjonction.

D'autre part R. T. CHAMBERLAIN fait l'objection que la similitude entre l'Old Red des Iles Britanniques et de l'Amérique du Nord plaide plutôt pour l'existence d'une large mer entre les deux continents. Il fait remarquer que ces formations gréseuses proviennent toutes deux de la désagrégation de chaînes calédoniennes qui suivant la règle se sont édifiées au bord d'un océan. D'ailleurs, le même Old Red se trouve dans l'ouest de la Russie en bordure du massif baltique et en Sibérie en bordure de l'ancienne plate-forme sibérienne. On ne peut pourtant ici admettre une dérive d'une région par rapport à l'autre. La région de l'Oural qui sépare en deux ces régions était occupée au Dévonien par la mer dévonienne.

CH. SCHUCHERT, après un examen attentif des deux rives de l'Atlantique nord, arrive à la conclusion que les chaînes plissées du versant atlantique de l'Amérique du Nord ne se prolongent pas en Europe, mais en tenant compte de leur âge, il constate que les chaînes de ces deux continents ont une symétrie par rapport à l'axe atlantique.

WEGENER cite encore un certain nombre de similitudes géographiques analogues pour en tirer des arguments en faveur de la dérive, et qui ont également rencontré des objections du point de vue géologique, de sorte qu'on arrive à la conclusion que les arguments géographiques ne sont pas non plus concluants et que la théorie de la dérive est plutôt une possibilité qu'une certitude.

E. ARGAND dans une synthèse mémorable intitulée la Tectonique de l'Asie, présentée au Congrès International de Géologie de Bruxelles en 1922 a adapté d'une façon brillante

la théorie de la dérive de WEGENER aux problèmes de la géologie des chaînes de montagnes de l'Asie en y apportant quelques variantes. La figure No 6 montre d'une façon schématique l'usage fait par ARGAND des déplacements des continents et le rôle qu'il fait jouer aux masses de l'Eurasie et de la Gondwana. Il se rallie aux idées de WEGENER sur le continent de Gondwana mais il considère le plissement des chaînes alpines et himalayennes comme résultant du serrage des dépôts sédimentaires entre l'Eurasie et la Gondwana.

Pour ARGAND, un géosynclinal est une zone du Sial, qui, par suite d'étirements dus à des mouvements de dérive différentiel, s'amincit et finit par s'affaiser dans le Sima. En conséquence de cet affaissement il peut devenir le siège d'une active sédimentation. Cette fosse géosynclinale est comprise entre les masses rigides de l'avant-pays (les «s e r r e s» d'ARGAND). Dès que ces serres se rapprochent les sédiments sont comprimés et ainsi prennent naissance de grandes rides ou géanticlinaux, émergeant en chapelets d'îles qui, peu à peu, se soudent pour former une terre ferme allongée. Les efforts tangentiels continuant à se faire exercer, d'autres géanticlinaux vont se former, séparés par des géosynclinaux secondaires qui sont soumis au plissement et un jour l'ensemble surgira pour former une chaîne de montagnes.

Ainsi l'Afrique en se déplaçant vers le nord, s'avança sur l'Europe qu'il allait même chevaucher en déterminant la formation de chaînes plissées et de nappes de charriage. Les chaînes plissées, grâce à leur inertie, continuent leur mouvement vers le nord en se disjoignant ainsi de l'Afrique pour provoquer l'affaissement de la Méditerrannée.

D'autres variantes de la théorie de la dérive ont été proposées par divers auteurs, entre autres par F. B. TAYLOR G. A. F. MOLENGRAFF R. STAUB. E. ARGAND, tout en acceptant la théorie de la dérive, n'a pas cherché le moteur du phénomène. STAUB trouve la cause dans un conflit de forces, celles qui sont dues à la rotation de la terre et celles qui résultent de déplacements subcrustaux. Mais on ne fait intervenir en ordre principal que des causes extraplanétaires, hypothèse qu'on ne peut pas démontrer.

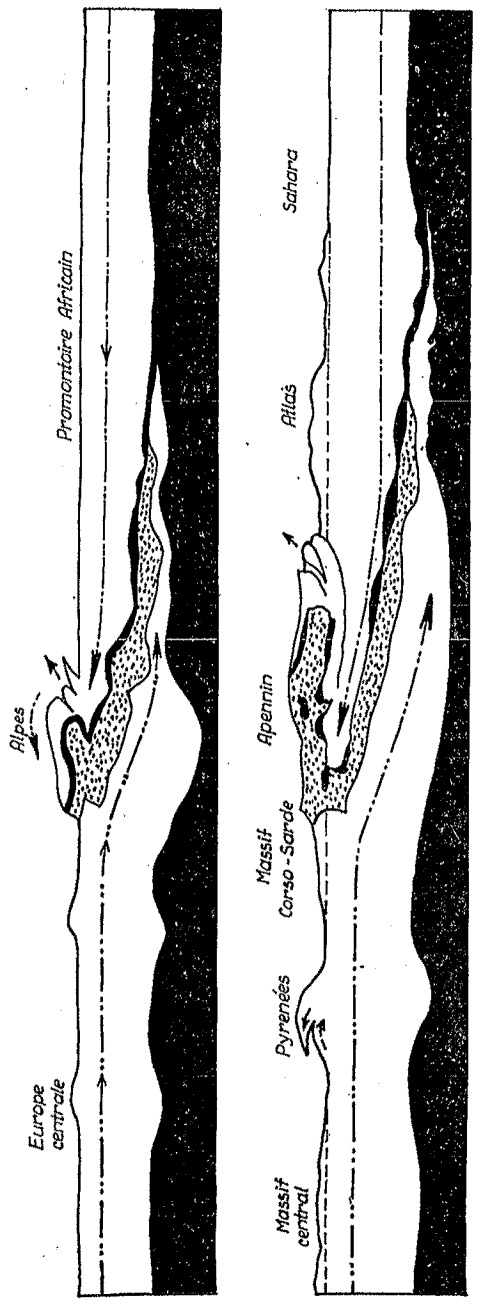


Fig. 6.

Schema montrant le rôle des déplacements de blocs continentaux dans la formation des Alpes et des Apennins, (d'après ARGAND).

Les courants interplanétaires comme cause primaire des mouvements orogéniques.

En opposition avec ce point de vue les géophysiciens et les géologues sont revenus à une conception émise déjà en 1902 par le géologue autrichien O. AMPFERER qui fait appel à des forces propres à la terre et notamment aux déplacements du substratum vitreux.

AMPFERER avait émis en 1906 l'hypothèse de courants subcrustaux capables d'entraîner en profondeur des mouvements du magma. E. KRAUS invoqua la présence de courants magmatiques descendants créant de véritables « zones de succion » provoquant la formation de plis couchés et des nappes de recouvrement.

La cause de ces courants est discutée. A. HOLMES est d'avis qu'ils sont dus à la présence d'éléments radioactifs inégalement répartis. D'autres invoquent des réactions interplanétaires, des différences de densité dans le magma, des variations de température. On émet l'opinion que c'est un phénomène comparable à celui des tourbillons étudiés par le physicien BÉNARD pour les mouvements de l'atmosphère, désignés du nom de « courants de convection » et déterminés par des différences locales de température. (voir pages 98 - 99).

Mais à côté de la question du moteur s'est posée l'autre question du mécanisme qui provoque le plissement des fosses géosynclinales, berceau de la future chaîne plissée. Pour WEGENER et ARGAND se sont les mouvements tangentiels des blocs continentaux en dérive, les « serres » d'ARGAND. Mais depuis les travaux de F. A. VENING-MEINESZ, J. H. P. UMGROVE; P. H. KUENEN et d'autres géophysiciens la notion de mobilisme telle qu'elle découle des conceptions de la dérive a été profondément modifié à la suite de recherches gravimétriques exécutées surtout dans les Indes Néerlandaises et dans les Antilles où ont été constatées de graves anomalies de l'isostasie et dont l'interprétation a donné lieu à un changement de vue dans le mécanisme de la formation des chaînes géosynclinales.

Les régions précitées sont des zones de très grand déséquilibre isostatique, le siège de séismes et d'une grande activité volcanique.

Les recherches sur les anomalies de l'isostasie faites à bord des sous-marins ont mis en évidence depuis Sumatra, en passant par Java, Timor, Céram, Célèbes, jusqu'aux Philippines une bande large de 100 à 200 km et d'une longueur de 5000 km à fortes anomalies négatives et encadrée de part et d'autre par deux zones à fortes anomalies positives. La bande à anomalie négative coïncide presque toujours avec des chapelets d'îles et de hauts-fonds, tandis que les zones à anomalies positives qui l'encadrent coïncident avec les sillons sous-marins. On a donc le cas paradoxal qu'à un excès de masses correspond une anomalie isostatique négative.

Toutes ces régions à gravité déficitaire ont présenté, depuis le Miocène, une très grande mobilité. C'est à cette époque que se produisit le plissement principal. Au Pliocène ces îles furent submergées et dans la suite, commença leur morcellement en compartiments dont les uns furent surélevés tandis que les autres s'effondraient. Par les plissements tertiaires un important raccourcissement de l'écorce s'est produit qu'on estime à 45 km. Par ce raccourcissement la croûte sialique devait subir un fléchissement, se transformer en ce qu'on désigne « une boucle » qui plonge dans le Sima en comprimant les sédiments y contenus. C'est ce que nous appelons en terme de géologie un géosynclinal de Sial qui s'infléchit dans le Sima. Le géosynclinal forme donc une masse de compensation qui remplace le Sima d'une densité supérieure, ce qui explique l'anomalie négative.

Une autre zone d'anomalie déficitaire qui s'étend sur plus de 4000 km de longueur a été établie à l'intérieur de l'arc des Antilles. D'autres zones d'anomalies négatives ont pu être établies au Sud du golfe de Tarente le long des côtes calabriennes, dans les Alpes, dans les Carpathes.

A. HOLMES a considéré ces zones à gravité déficitaire comme l'équivalent d'un géosynclinal en cours de formation, donnant naissance à un arc montagneux plissé.

Ce n'est pas là une idée inédite, puisque depuis longtemps les fosses bordières des guirlandes insulaires indonésiennes avaient été considérées comme des géosynclinaux. Mais d'après les vues d'alors, ces géosynclinaux devaient être des zones caractérisées par des anomalies de gravité positives.

HAUG admettait que le Pacifique formait autrefois un continent autour duquel a pris naissance une immense ceinture de plissements tertiaires. Quant à la formation des géosynclinaux HAUG supposait que la contraction aurait donné lieu à leur première ébauche, tandis que l'isostasie aurait facilité leur approfondissement graduel en raison de l'accumulation des sédiments qui déterminerait un excès de pesanteur.

Mais il y a une contradiction dans cette supposition qui admet que l'affaissement du géosynclinal doit déterminer des accumulations de roches sédimentaires très légères et que cet affaissement est provoqué par la charge de ces sédiments moins denses que la croûte sialique.

A. HOLMES interprète les fosses géosynclinales de l'Indonésie comme une zon de l'écorce terrestre où le Sial se fléchit

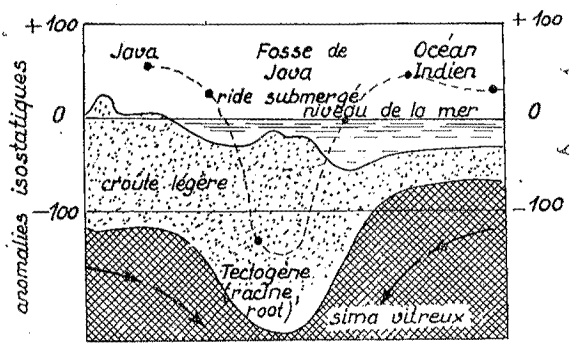


Fig. 7.

Interprétation, par HOLMES, dans la zone d'anomalie négative passant au Sud de Java et établie par les travaux de VENING-MEINESZ. Schéma d'une chaîne de montagne en formation (d'aprés L. MORET loc. cit. p. 8.)

en une « boucle » synclinale qui pénètre plus ou moins profondément dans le sima, ce qui expliquerait les fortes anomalies

gravimétriques négatives. Cette conception a été généralisée pour tous les géosynclinaux et est adoptée aujourd'hui par la majorité des géologues.

On désigne, d'après A. HOLMES, la « boucle » aujourd'hui par le nom «racines» (root) d'une chaîne de montagne. (Fig. 7)

On admet que les bords de la « boucle » géosynclinale, en se rapprochant, compriment les sédiments accumulés dans cette dépression et produisent le plissement. C'est l'allure des mouvements subcrustaux, ou, d'une façon générale, des phénomènes de la profondeur qui déterminent le style et le sens du déversement des plis ainsi formés.

Il n'est donc plus question de môles, de continent en dérive, de serres ou d'étau. (Figure 8)

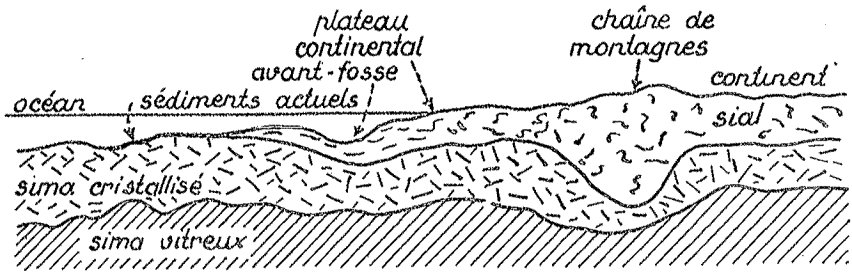


Fig. 8.

En généralisant on pourrait matérialiser, d'après les vues exposées, les conceptions sur la structure des couches superficielles du globe par le schéma donné dans la figure No 8 (d'après L. MORET, loc. cit. p. 8.)

Les moteurs de ces mouvements sont les courants de convection.

L'introduction des courants de convection dans la géophysique est due au géophysicien hollandais VENNIG-MEINESZ qui a cherché, dès 1934, à expliquer par ces courants les anomalies extraordinaires décelées dans les Indes Néerlandaises et dans la Mer des Antilles, mentionnées plus haut.

C'est surtout l'introduction des courants de convection combinée avec le réajustement isostatique, qui a donné nais-

sance à une nouvelle théorie avec plusieurs variantes de la genèse des chaînes de montagnes.

Exposons d'abord, en quelques mots, d'après M. Roubault, loc. cit. p. 180, le principe des courants de convection :

Lorsque les divers points d'une masse liquide ou fluide sont à des températures inégales, les différences de densité qui en résultent au sein du milieu déterminent l'existence de courants qui transportent la chaleur par convection ; ce sont les courants de convection. Il y a donc ainsi destruction de l'équilibre hydrostatique. L'existence de ces courants détermine à l'intérieur des masses fluides des zones dans lesquelles les courants sont fermés sur eux-mêmes; ce sont les cellules de convection. (Fig. 9)

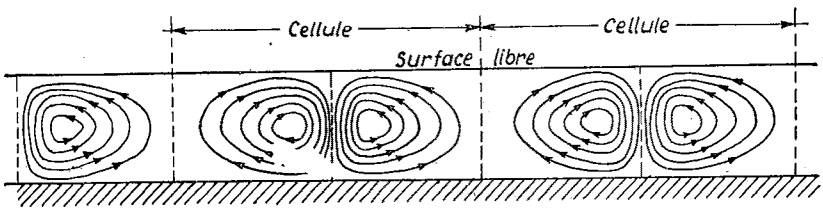


Fig. 9.
Section de cellules de convection réalisées expérimentalement; (la surface inférieure est à une température plus élevée que la surface supérieure). D'aprés H. Bénard. (tirée de M. Roubalt, loc. cit. p. 181).

L'introduction des courants de convection dans une hypothèse orogénique suppose donc l'existence d'une certaine fluidité, mais fluidité à l'échelle terrestre ce qui veut dire que des roches réputées solides à notre point de vue peuvent s'écouler avec une extrême lenteur sous des pressions considérables et prolongées.

La physique permet de donner quelques ordres de grandeur pour les forces développées par les courants. PEKERIS a fait ce calcul en se basant sur les données établies par JEFFREYS pour les valeurs de la viscosité à la partie externe de l'enveloppe et les valeurs au bord du noyau de la terre.

Les dimensions des cellules sont énormes. Les dimensions ont été déduites de nos connaissances de l'épaisseur de l'enveloppe qui est de 2900 km. On sait que la largeur d'une telle cellule est sensiblement égale à 3 fois la hauteur; la valeur ainsi obtenue de 7 à 10.000 km correspond à la largeur du Pacifique. (Figure 10)

PEKERIS a enfin pu estimer pour les courants de convection terrestres la force radiale qui exerce une pression sur la croûte dans le cas de courants provenant du centre; elle atteint 3 à 5000 kg/cm2.

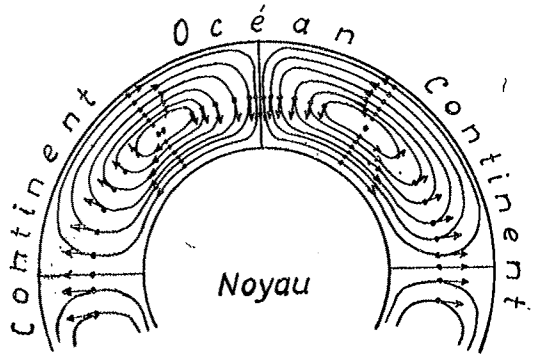


Fig. 10.
Direction des courants de convection dans la croûte terrestre. La longueur des flèches est proportionnelle à leur vitesse.) (D'après C. L. PERKINS. tirée de M. ROUBALT, loc. cit. p. 183.)

L'importance de telles valeurs est dans le fait que dans ces énormes cellules de convection la masse de l'enveloppe peut être considérée comme pseudovisqueuse c. à d. que les roches réputées solides se comporteraient comme des fluides visqueux, ce qui implique que les courants de convection pourraient engendrer des forces orogéniques sans qu'on implique aucune hypothèse de fusion.

C'est dans ce sens que le géologue américain GRIGGS à appliqué les courants de convection dans sa théorie sur l'orogénèse.

D. GRIGGS a exposé son hypothèse en 1939 dans un mémoire intitulé: « A Theory of Mountain Building ». Il énonce d'abord les conditions que doit remplir toute hypothèse susceptible d'expliquer d'une façon satisfaisante la formation des chaînes de montagnes. Elle doit donner la raison de l'existence d'une composante tangentielle suffisamment grande pour plisser l'écorce terrestre, elle doit expliquer la contraction locale d'une bande de la croûte apparemment démontrée par l'existence des zones plissées formant les grandes chaînes, elle doit encore expliquer le parachèvement d'une chaîne de montagnes par l'élévation ultérieure de la région comprimée et plissée dans une cuvette géosynclinale. Enfin il faut encore expliquer la nature intermittente des phénomènes d'orogénèse.

Dans cette ligne de succession des phénomènes, GRIGGS admet que le plissement se fait pendant une phase initiale dans la zone classique géosynclinale par une prédominance de la pression tangentielle provoquée par les courants de convection, tandis que dans une phase terminale les masses plissées seraient poussées vers le haut grâce à un réajustement isostatique, de sorte que les montagnes résulteraient d'une combinaison des courants de convection et de l'isostasie.

La nature intermittente des phénomènes orogéniques s'explique d'après GRIGGS par le caractère périodique des courants de convection terrestres.

Pour que les courants de convection prennent un état de régime stable, il est nécessaire que la température de la masse soit abaissée par conduction pendant la durée du transport. Cette condition maintient l'existence d'un gradient de température qui entretient le phénomène de façon continue. Cette condition ne semble pas réalisée à l'échelle terrestre et l'état de régime continu n'y est pas obtenu. Or on a établi, au moyen d'expériences, que, lorsque l'état de régime stable n'est pas obtenu, le courant de convection est périodique: il passe par une vitesse maximum, puis s'arrête. De plus cette vitesse maximum est trois fois plus grande que la vitesse d'un courant au régime stable réalisé dans le même fluide.

PEKERIS et VENING-MEINESZ ont aussi calculé la vitesse du flux dans les cellules terrestres; ils ont obtenu, le premier 5 cm par an dans une cellule de 2 900 km de profondeur, le deuxième 1 cm par an dans une cellule de 1.200 km. GRIGGS admet qu'on peut tabler sur une vitesse de déplacement moyenne de l'ordre de 10 cm par an. A une telle vitesse, le transport de matière du noyau jusqu'à la croûte durerait environ 30 millions d'années, de sorte que dans le cas particulier des Indes Néerlandaises les plissements dans la cuvette géosynclinale se sont faits au Miocène et que l'anomalie négative persistera encore pendant 20 millions d'années jusqu'à la surélévation de la chaîne de montagnes.

Pour matérialiser ces conceptions D. GRIGGS a même imaginé une méthode pour faire voir l'effet de tels courants à l'aide d'un modèle. (Voir fig. 11)

On s'est demandé quelle est l'origine de ces courants de convection qu'on suppose exister à l'intérieur du globe ?

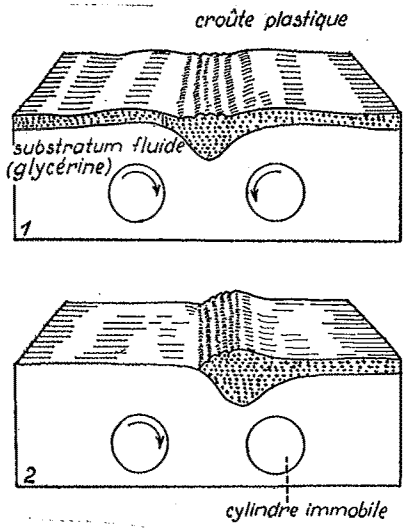


Fig. 11.

Expériences de GRIGGS montrant comment peuvent agir les courants crustaux. En (1) formation d'une chaîne symétrique; en (2) formation d'une chaîne dissymétrique (Figure tirée de L. MORET, loc. cit. p. 24).

D'après l'opinion de A. HOLMES, leur cause serait dans la présence d'éléments radioactifs inégalement répartis dans le Sima et qui détermineraient dans la zone simique de gigantesques « cellules de convection » fonctionnant par couple en sens inverse. Nous reproduisons dans le croquis ci-joint d'après A. HOLMES le schéma de deux cellules voisines fontionnant en sens inverse et supposées entraîner la croûte salique superposée au Sima suivant une bande longue et étroite. (Figure 12)

Par ces courants de convection la chaleur en excès peut être conduite par le phénomène de la plutogénèse et de l'orogénèse à la surface. Le système subit un arrêt, (N° 3 de la fig. 12) les plis remontant à la surface, les chaînes de montagnes sont érodées et quand il y a de nouveau répartition inégale de la chaleur dans le sima, l'orogénèse peut se répéter.

A côté de la conception de GRIGGS il existe encore plusieurs variantes de la théorie des courants parmi lesquelles nous mentionnons celle de A. DALY.

D'après DALY la croûte cristalline formant le fond du géosynclinal est plus dense que le substratum visqueux à haute température dans lequel elle pénètre. Elle se brise et des fragments descendent jusqu'à ce qu'ils atteignent une zone de même densité où ils se réchauffent et passent à l'état visqueux; en même temps ils se dilatent, deviennent moins denses et sont alors animés d'un mouvement ascensionnel qui provoque la naissance d'un véritable courant subcrustal. A leur tour les sédiments arrivés dans la profondeur, passent à l'état de fusion et se dilatent. Cette double action provoque un effort de poussée de bas en haut qui fait émerger la zone plissée en chaîne de montagne.

Ainsi s'expliquerait la montée du granite refondu dans la partie axiale des géosynclinaux et le fait que la phase d'émergence d'une chaîne de montagne, dite la phase paroxysmale, est toujours accompagnée d'injections granitiques. En ce moment peuvent aussi prendre naissance des roches plutoniennes plus basiques par un processus de « contamination ».

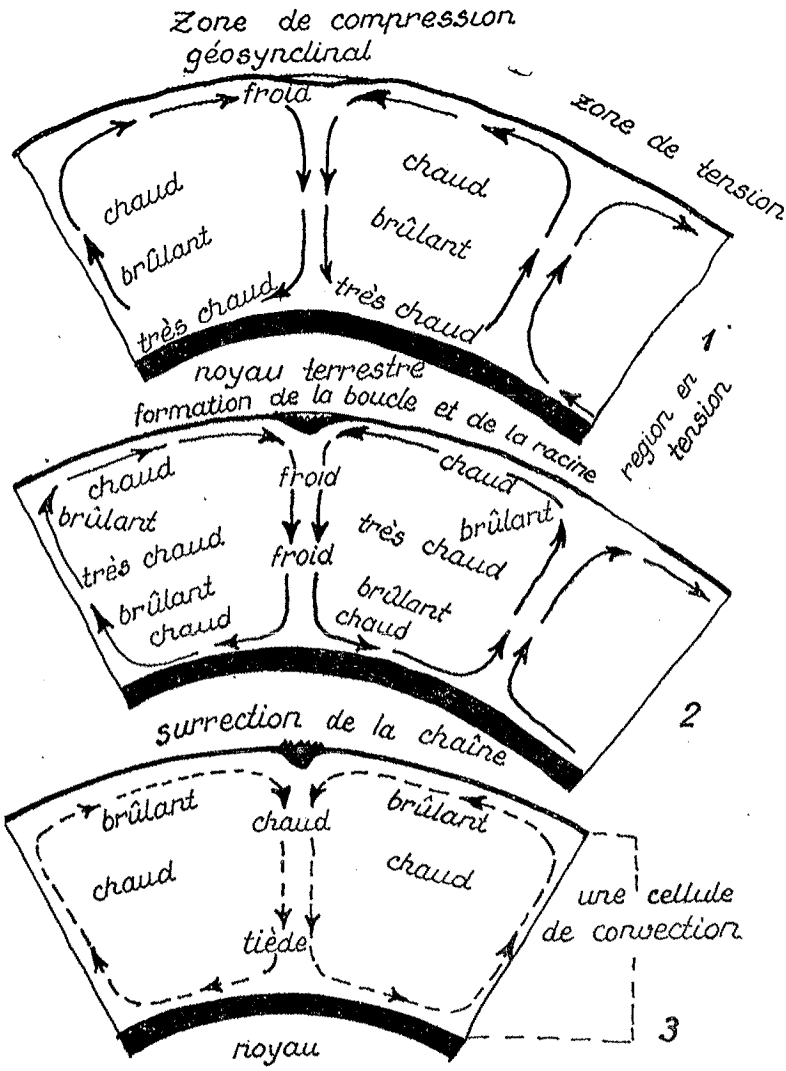


Fig. 12.

Trois sections de la zone externe de la terre montrant les relations possibles entre l'orogénèse et l'existence hypothétique de courants convectifs. (D'après A. Holmes tirée de L. Moret, loc. cit. p. 20.)

Ceci nous ramène à l'ancienne théorie du soulèvement par intrusion granitique si âprement combattue par les adhérents de la théorie de la contraction et l'on aboutit à cette alternative ou bien la plutogénèse crée l'orogénèse ou l'orogénèse est le primaire qui provoque la plutogénèse.

Intercalons ici un mot sur la valeur de l'expérience en géologie.

D'une façon générale il ne faut pas perdre de vue que les expériences classiques telles qu'on les pratique en géologie ne sont pas des vérifications absolues d'une théorie; elles démontrent seulement leur possibilité physique. Rappelons seulement trent seulement sa possibilité physique. Rappelons seulement le fait que nous avons entendu parler assez longtemps de la «vérification expérimentale» de la théorie de la contraction. Rien ne paraissait plus logique et quand-même on n'a pas tardé à nous démontrer que cette théorie ne peut pas répondre à la réalité.

On doit reprocher à ces expériences que les relations de dimensions auxquelles devront répondre les modèles construits sont faussées. Pour obvier à ce reproche on a recours aujourd'hui en géologie au « modèle réduit ».

Dans la méthode des « modèles réduits » toutes les propriétés d'un matériel donné: densité, viscosité, rigidité, plasticité et qui peuvent être exprimées en unités c. g. s. de longueur, masse, temps, doivent être réduites suivant des rapports soigneusement fixés.

Dans les expériences de reconstitution des phénomènes de plissement, une des propriétés les plus importantes des corps utilisés est la viscosité c. à d. la propriété que présente un matériel de rester plastique sans se rompre.

Or jusqu'ici on employait dans ces expériences l'argile, la plastiline, le sable. Les calculs ont démontré que ces corps sont trop rigides et qu'il faut se servir, pour rester dans les rapports, des matériaux comparables à de la pâte dentifrice diluée.

GRIGGS employait dans ces expériences, pour présenter l'écorce terrestre, des matériaux d'une viscosité analogue à une couche d'huile lourde noircie flottant sur la glycérine non colorée. Celle-ci ne peut pas se plisser par compression. Pour y faire naître un plissement, GRIGGS fait tourner en sens inverse dans la glycérine deux cylindres horizontaux. Il réilise ainsi des pseudo-courants qui entraînent en profondeur et déforment les couches d'huile noircie. (Figure 11)

Dès que les cylindres tournent, mais lentement, une dépression se fait dans l'huile lourde entre les cylindres, image d'un géosynclinal qui s'amorce. Quand la vitesse augmente, l'huile noircie se plisse et s'enfonce, comme par « succion » dans la glycérine. Quand les cylindres tournent lentement ou s'arrêtent, la partie de l'huile enfoncée dans la profondeur, remonte et surgit en une intumescence allongée, dont les versants ne tardent pas à s'écouler par gravité. C'est l'image d'une chaîne de montagnes symétrique. Quand un cylindre tourne et que l'autre reste immobile, c'est l'image d'une chaîne dissymétrique aux plis déversés vers le cylindre en mouvement.

Comme conclusion des expériences de GRIGGS on peut se demander si la pesanteur ne peut pas avoir par elle-même, à l'échelle des temps géologiques, un rôle actif dans l'orogénèse en déclenchant sur des pentes même très faibles un glissement de couches et en provoquant ainsi des plissements et des charriages. Cette conception d'un écoulement des masses superficielles le long d'une surface inclinée et sous l'intervention de la pesanteur comme force agissante n'est pas neuve. ED. REYER, déjà en 1890, réalisa des essais de géologie expérimentale qui confirmèrent cette idée. En 1893, H. SCHARDT démontrait le premier, dans une étude sur les Préalpes romandes, l'existence dans les Alpes, de larges nappes de charriage et admettait comme cause de ces larges déplacements de couches que les couches peuvent se détacher de leur substratum sur de vastes surfaces et cheminer sur une couche plastique en pente de manière à recouvrir par charriage des formations plus récentes. La pesanteur n'entre en fonction qu'en second lieu, après que la croûte a été soulevée par une autre force primaire. (Figure 13)

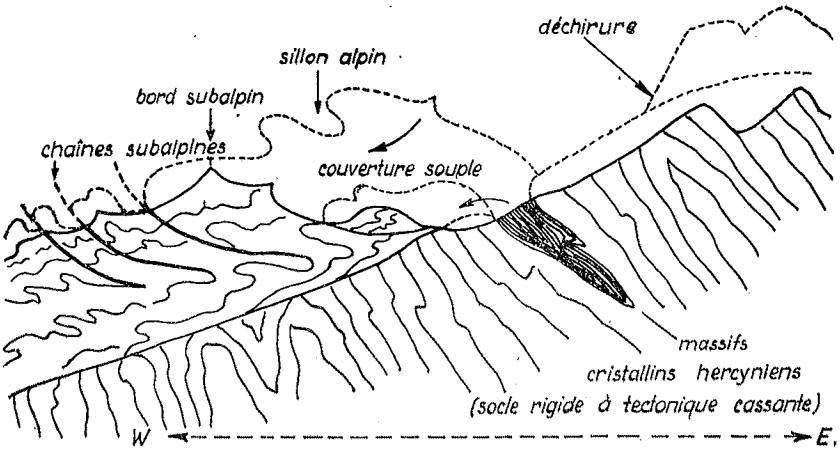


Fig. 13.
Formation des chaînes subalpines d'après l'hypothèse de l'écoulement des masses par gravité suivi de la dénudation du Massif cristallin. (D'après L. Moret, loc. cit. p. 34.)

Théorie d'oscillation de E. Haarmann.

Cette explication, après avoir été longtemps repoussée, n'a été reprise qu'en 1930 par E. HAARMANN dans sa théorie d'oscillation.

La théorie d'oscillation admet comme moteur des forces orogéniques dans une première période des causes cosmiques qui produisent des changements dans les conditions générales d'équilibre de la terre, ce qui se traduit par le déplacement des masses internes visqueuses.

La consolidation de la première croûte de la terre se faisait sous forme de blocs figés, indépendants les uns des autres et flottant sur un substratum visqueux. A cette époque les déséquilibres étaient facilement corrigés par un déplacement de ces blocs flottés jusqu'à l'endroit où leur présence permettrait de rétablir l'équilibre. Ainsi le départ de la masse de la lune, arrachée à la terre en un endroit situé vers le centre de l'Asie y provoqua un appel de masses légères. En effet, dans les hauts plateaux de l'Asie centrale nous avons la partie la plus vaste de la terre en masses sialiques.

Par la consolidation généralisée de la croûte, la mobilité des masses solides cessa et toute dérive était impossible (Haarmann n'admet donc la théorie de la dérive que pour l'époque la plus ancienne de la terre et la rejette pour les périodes plus récentes). Le rétablissement de l'équilibre ne pouvait donc, après la consolidation ininterrompue de la surface de la terre, se faire que par un déplacement des masses internes, restées plastiques et qui se mouvaient vers l'endroit où il y avait un déficit ou qui s'éloignaient d'un endroit où il y avait excès de masse. C'est ainsi que se produisaient des gonflements à la surface de la terre ou des g é o t u m e u r s répondant à un afflux de magma et des dépressions, les g é o d é p r e s s i o n s, répondant à un écoulement du magma.

Comme ces deux phénomènes sont liés l'un à l'autre, ils doivent forcément s'avoisiner dans la partie de la surface de la terre où ces mouvements se produisent.

Dès que l'influence cosmique se déplace, il y a aussi déplacement du lieu de formation des géotumeurs, ce qui provoque dans un corps sphérique des mouvements oscillatoires; d'où le nom de t h é o r i e d e l ' o s c i l l a t i o n.

Les larges ondulations qui résultent de la formation des géotumeurs et des géodépressions constituent la t e c t o g é n è s e p r i m a i r e (Haarman préfère l'expression tectogénèse comme d'un sens plus général à celle d'orogénèse parce que l'auteur est d'avis que la formation d'une zone plissée n'implique pas nécessairement une surélévation de cette zone en chaîne de montagnes). Toutes les autres dislocations des sédiments par plis, failles, charriages qui ne sont d'après l'auteur que des phénomènes en dépendance de la tectogénèse primaire, forment la t e c t o g é n è s e s e c o n d a i r e.

Par la formation des géotumeurs et des géodépressions se créent des différences de niveau; l'érosion et le transport de matière peuvent entrer en action; de puissantes masses de sédiments sont transportées dans les dépressions. Les couches accumulées de cette façon sont prédestinées à se déformer grâce à leur disposition tabulaire, qui facilite le glissement de paquets de couches les uns sur les autres.

Si la pente est suffisante, le matériel se déplace, sous la seule action de la pesanteur, et s'amoncelle et c'est ainsi que se produisent des plis, des failles et des charriages. La pesanteur joue donc le rôle essentiel dans la tectogénèse secondaire. (Figure 14)

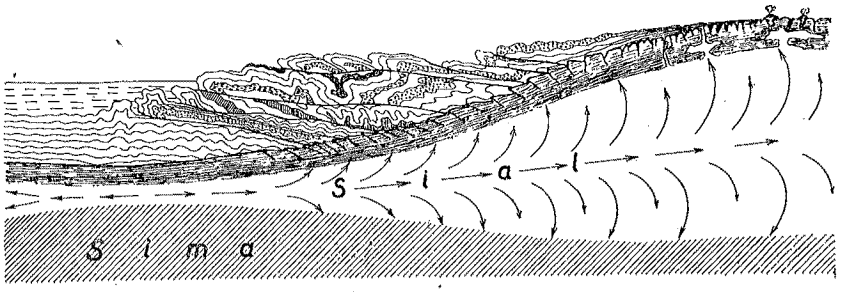


Fig. 14.
Schéma de la formation d'un géotumeur (tectogénèse primaire) et de plis, de failles et de charriages par glissement, sous la seule action de la pesanteur (tectogénèse secondaire, (D'après E. HAARMANN, loc. cit. p. 34).

La théorie de l'oscillation est donc fondée sur les conceptions suivantes:

1) Le sphéroïde terrestre n'est pas encore dans un équilibre parfait et stable, mais la croûte a une tendance vers l'isostasie.
2) Les compartiments de la croûte s'élèvent et descendent; ils sont dans un mouvement vertical; il y a de l'oscillation.
3) Ces mouvements ont une allure rythmique.

La théorie de Haarmann fait appel à deux facteurs:

a) à une cause extérieure à la terre provoquant la formation des géotumeurs.
b) à l'action de l'érosion et au transport des matériaux vers les dépressions, puis au glissement sous l'action de la pesanteur qui provoque des accumulations en même temps que les plis et des charriages dont les sédiments sont affectés.

La théorie de l'oscillation a fait le sujet de longues discussions dans la Société géologique allemande qui ne furent guère favorables à la conception de HAARMANN.

Une objection capitale est faite contre l'imprécision même de la cause extérieure supposée de provoquer la formation des géotumeurs. HAARMANN admet que le déplacement des pôles pourrait avoir joué un rôle important. Cette cause devrait donc agir tantôt suivant le méridien, tantôt suivant le parallèle, voire même dans les deux directions à la fois. Il faudrait aussi imaginer que ces déplacements étaient considérables et brusques, ce qui paraît invraisemblable pour produire p. ex. des géotumeurs contournées comme celles qui auraient donné naissance aux Alpes, aux Carpathes et à d'autres grandes chaînes de montagnes aux contours sinueux.

On a encore fait une critique sévère à la tectogénèse secondaire à laquelle on reprochait d'être en opposition avec des faits bien observés. S. VON BUBNOFF a même fait la remarque que la formation de plis par glissement vers le bas est inadmissible et que la plupart des mouvements tectoniques sont dirigés vers le haut, à l'encontre de la pesanteur.

D'autres critiques ont même calculé que les géotumeurs sont forcément à grand rayon de courbure et qu'elles ne peuvent présenter une inclinaison de leur flanc suffisante pour permettre le glissement des terrains sédimentaires qui les recouvrent. On fit remarquer p. ex. qu'un charriage de 50 km exigerait une intumescence haute de 10 km et une pente de 20 % pour la surface d'écoulement.

On objectait aussi que, si les roches pouvaient couler comme des fluides, les vallées escarpées de nos montagnes devraient être depuis longtemps comblées par l'écoulement de leurs versants.

On oubliait que les phénomènes de la dynamique externe, l'érosion et le creusement des vallées qui créent les inégalités du relief, se forment et disparaissent avec une vitesse infiniment plus grande que les déformations tectoniques de l'écorce terrestre.

On oubliait aussi que les matériaux meubles glissent lentement sur des pentes extrêmement faibles et on ne tenait pas

compte de la mobilité considérable des masses lorsqu'elles sont soumises à des efforts qui s'exercent l e n t e m e n t.

Ainsi la théorie de HAARMANN n'éveillait pas d'échos malgré l'intérêt réel qu'elle présente en donnant à la tectonique d'écoulement par gravité une grande importance dans les phénomènes orogéniques. Les géologues auxquels elle s'adressait étaient trop peu familiarisés avec les nouvelles vues de la physique qui tendent à effacer la frontière entre la mécanique des fluides et celle des solides.

Théorie de l'écoulement par gravité.

Sur la base de ces conceptions de la physique moderne, la théorie de l'écoulement des masses par gravité, repoussée si longtemps par la majorité des géologues, vient de nouveau d'être reprise, et, à ce qu'il paraît, avec un succès croissant par LUGEON, GAGNEBIN, L. MORRT, M. GIGNOUX et d'autres.

Sans faire appel aux notions théoriques de la physique moderne, les géologues ont pu constater de nombreux faits d'importants mouvements horizontaux différentiels dans une même masse de couches. Ces mouvements se localisent le long d'une seule surface qui est une surface de décollement. Par suite de ce décollement la masse supérieure a glissé par rapport à la masse inférieure suivant une surface lubrifiante, argile, argile salifère, argile imprégnée d'eau gypseuse, c. à d. une masse qui déflocule aisément et conserve ainsi une grande plasticité.

On constate une indépendance complète entre la masse glissante et son substratum. Tandis que le substratum a conservé son allure tranquille, il y a froncement et plissement des masses superficielles. L'assise lubrifiante s'injecte dans les boucles anticlinales dessinées par le complexe froncé. Si la boucle se distend et crève, il y aura migration ascendante, ce qui conduira au phénomène du d i a p i r i s m e. La matière plastique renflée d a n s les boucles s'amincira et se laminera e n t r e les boucles. (Figure 15)

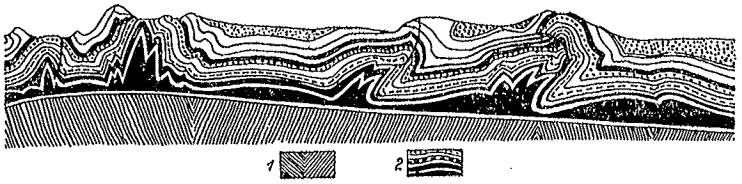


Fig. 15.
Schéma de couches triasiques gypsifères et de calcaire jurassique, fortement froncées et plissées, en mouvement sur un substratum cristallin tranquille. 1 - Plis du Jura, 2- Substratum paléozoique et métamorphisé. (D'après A. Buxtorf.)

Cette disharmonie est difficile à expliquer par les forces « tangentielles », s'appliquant à toute l'épaisseur de la croûte solide, telle qu'on l'imagine dans la théorie de la contraction.

Quand même on pourrait expliquer le plissement des couches accumulées dans les géosynclinaux par le jeu des « serres », ce mécanisme ne pourra produire des plis à la surface même des blocs jouant le rôle de serres.

La théorie des forces tangentielles admettait qu'une poussée s'exerçant par l'arrière et venant du géosynclinal était transmise à une grande distance par la couverture. ARGAND pensait que les plissements des nappes penniques (nappes internes des Alpes) résultent de l'écrasement des sédiments entre les massifs centraux des Alpes (Mont Blanc et Aiguilles Rouges, massif de l'Aar et du St. Gothard) et le massif rigide de l'Afrique en dérive vers le nord. Les nappes accumulées au nord des massifs centraux ne seraient qu'un excédant de matériaux débordant de l'auge comprimée entre les deux serres de l'étau. La mise en place de ces napppes qui ne sont que des pellicules minces comparativement à leur extension latérale se serait faite par la seule intervention d'une poussée tangentielle par l'arrière. (Fig. 16)

Cela se comprendrait si la lame des couches de couverture était rigide comme une planche que l'on peut faire glisser sur une table en la poussant de l'arrière. Mais nous voyons que les couches de la couverture se sont mises en plis; les calcaires les plus durs sont recourbés et ondulés, les argiles se sont

laminées ou se sont accumulées dans un grand nombre de charnières.

D'autres masses charriées sont constituées par un grand nombre de minces couches d'un terrain mou, le Flysch, composé exclusivement par des grès et des schistes et qui sont extraordinairement repliées sur elles-mêmes sans être laminées; il n'existait donc ni surcharge ni compression latérale.

Dans d'autres nappes on a pu établir l'intervention de moments de t r a c t i o n ce qui est en opposition avec l'effet d'une poussée tangentielle.

Et encore le mouvement a été différentiel. Souvent le socle n'a pas participé aux plissements formés au-dessus de ce socle. (Voir Figure 15)

Comme, en face de ces faits, il est difficile d'admettre l'intervention de la poussée tangentielle s'exerçant par l'arrière, il est logique de chercher une cause locale, résidant dans les couches mêmes et qui serait l'écoulement par gravité.

On s'aperçoit que c'est la reprise de la théorie de la tectogénèse secondaire de HAARMANN sous une forme plus concrète et, ajoutons, aussi plus restreinte.

La théorie de l'écoulement par gravité a été appliquée à la formation du plissement du Jura et surtout des nappes des Alpes.

On est d'accord qu'il s'agit ici de phénomènes superficiels qui ont fait décoller des masses supérieures d'un substratum et qui cheminent plus vite que celui-ci. Mais il ne faut pas perdre de vue que tous les plissements ne peuvent pas s'expliquer par l'hypothèse de l'écoulement par gravité. Cette cause ne convient que pour expliquer les plis de couverture c. à d. le froncement d'une masse déformable séparée de son substratum par l'intercalation de matière plastique. Encore faut-il une inclinaison appropriée.

Pour les parties intérieures d'un géosynclinal il faut admettre la compression des matériaux déposés entre les massifs résistants qui jouent le rôle de serres d'un étau, quelle que

soit la force qui met en mouvement ces massifs pour les rapprocher les uns des autres.

Ici se pose aussi le problème des « zones des racines » c. à d. de la région où la nappe de charriage a pris son origine.

D'après la théorie classique l'origine d'une nappe de charriage doit être cherchée dans cette partie de l'écorce se déformant plastiquement, car cette théorie admet que les nappes ne seraient que des excédants de matériaux débordant de l'auge comprimée entre les serres des avant-pays. On devrait donc concevoir les nappes de charriage comme de grands plis couchés au style horizontal qui doivent dans leur lieu d'origine (racines) s'enfoncer en profondeur dans un style isoclinal, de sorte que dans la région des racines les couches sont dressées parfois jusqu'à la verticale. (Voir figure 16)

Comme la continuité entre la nappe et la zone supposée des racines n'existe plus, on admettait une destruction par l'érosion et on s'efforçait de trouver dans la zone des racines des terrains de même âge et de même facies que dans la nappe et c'est là qu'on plaçait les racines de cette nappe comme il est indiqué d'une façon schématique dans la figure No 16.

Dans les Alpes suisses occidentales p. ex. on distingue une région interne et une région externe, la première comprenant d'énormes épaisseurs de sédiments transformés en roches cristallines et en schistes lustrés qui auraient donné naissance aux nappes les plus profondes de la série désignée du nom de nappes internes ou nappes penniques et dont les racines se trouveraient dans cette zone.

La région externe comprend des nappes formées par des terrains jurassiques, crétacés et tertiaires à facies préalpins. Mais comme on ne trouvait pas dans les Alpes suisses des racines pour ces terrains, ARGAND admettait l'origine des nappes préalpines au-delà des zones penniques. Le problème de la translation de ces nappes sur une distance de plus de 150 km restait donc un peu énigmatique.

La théorie de l'écoulement évite le difficile problème de l'enracinement des nappes. Elle admet qu'une couverture de

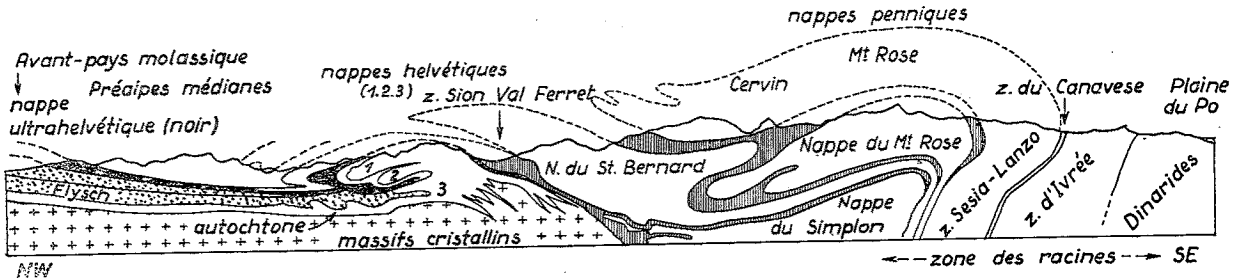


Fig. 16.

Structure des Alpes de la Suisse occidentale d'après la conception de E. Argand. — Dans les synthèses classiques d'Argand les nappes ont leur origine dans la région interne, dite „ zone des racines ". (D'après L. Moret ; Précis de Géologie, p. 395.)

Jurassique, de Crétacé, de Tertiaire recouvrait les massifs cristallins centraux et que cette couverture a glissé en bloc. S'il n'y a donc plus aujourd'hui de couverture sur les massifs cristallins du Mont Blanc, du St. Bernard, de l'Aar, c'est que cette couverture s'est décollée et se trouve dans les nappes de charriage subalpines et dans le Jura. Il n'y avait donc pas d'érosion, mais il y a eu de la «dénudation tectonique» d'après l'expression de M. Gignoux. (Voir la figure No 13)

Mais il reste quand-même le problème de la structure de cette zone dite « de racines ». L'allure tectonique de cette zone forme un grand contraste avec l'allure de la région des nappes, qui est au style horizontal tandis que dans la zone des racines les couches, dressées parfois jusqu'à la verticale, plongent en profondeur. Cette stucture verticale ne peut pas être l'aboutissement d'un écoulement par gravité. Ce n'est plus de la tectonique superficielle. C'est la tectonique profonde de compression, exercée par des bords rigides qui se rapprochent l'un de l'autre et dont le mouvement de rapprochement a été cherché soit dans la contraction, soit dans la dérive, soit dans la force de courants magmatiques profonds.

De même les plis à vaste rayon de courbure, comme on les observe dans notre pays et en Lorraine, à la bordure du Bassin de Paris, en Angleterre et ailleurs ne peuvent pas s'expliquer par l'action de la gravité avec glissement de la couverture sur un substratum plus rigide. Elle n'est pas applicable dans le cas où l'ancien substratum a lui-même participé au plissement.

La théorie de l'écoulement par gravité explique bien les plis superficiels résultant du froncement d'un paquet de couches décollées de son substratum et même certaines nappes de charriage.

Mais dans l'ensemble d'une grande chaîne de montagnes, elle ne peut expliquer que des détails de structure puisqu'elle n'intervient qu'au moment où, par suite d'autres phénomènes orogéniques qu'il reste à expliquer intégralement et que les différentes théories exposées ont tendance à mettre sur le compte de forces tangentielles, s'est formé le plan incliné sur lequel vont couler les masses superficielles.

Le grand problème de la thèorie est celui de la possibilité pour des corps solides comme les roches de glisser sur des pentes et de se plisser comme le feraient des corps plastiques. De cet aspect du problème s'est occupé en premier lieu M. GIGNOUX qui insiste dans son mémoire: « Méditations sur la tectonique d'écoulement par gravité » sur la conception que la différence entre un solide et un liquide n'est qu'une question de forces et de temps.

La notion d'écoulement est depuis longtemps connue en géologie, mais cette notion a fait une évolution remarquable à la lumière des nouvelles théories physiques qui tendent à effacer la frontière entre la mécanique des fluides et celle des solides.

M. GIGNOUX cite le fait que toute schistosité implique un écoulement qui se manifeste dans l'alignement des paillettes de minéraux et dans le clivage schisteux, implique même un écoulement différentiel par lequel des tranches empilées de la roche se déplacent les unes par rapport aux autres; se sont encore les bélemnites tronquées et les ammonites déformées qui démontrent un déplacement par écoulement. Il y a aussi les coupes minces qui nous font voir l'effet des mêmes mouvements sous le microscope.

Rappelons encore les expériences classiques de laboratoire qui démontrent qu'une roche est d'autant plus déformable que le milieu ambiant a une plus haute pression et une température plus élevée. C'est donc dans les zones profondes de l'écorce terrestre que les roches manifestent le plus de possibilité d'écoulement.

Dans les expériences de laboratoire on soumet à une compression, entre deux mâchoirs d'un étau, une matière plus ou moins plastique pour reproduire des formes tectoniques comme schistosité, plissement, faille, surface de charriage.

A la suite de ces expériences les géologues sont d'avis que l'action seule de la gravité ne peut pas suffire pour provoquer la déformation tectonique des couches, mais que cette défor-

mation ne peut résulter que des déplacements relatifs de deux compartiments de l'écorce terrestre.

Mais on connaît dans les Alpes des nappes dont l'amplitude minimum de charriage est de l'ordre de 50 km. Dans ces cas il est quand-même difficile d'admettre que l'avance de ces masses soit due uniquement à une poussée de l'arrière comme le supposent les théories classiques, car ces lames n'ont pas assez de rigidité pour transmettre une telle poussée. L'allure de ces lames de couches montre d'ailleurs, comme le rappelle M. GIGNOUX, que la progression de la nappe n'est pas comparable à celle d'une planche qu'on pousse, mais à celle d'une flaque de goudron ou de miel déposée sur une table recouverte d'une toile cirée et que l'on chasse en soulevant cette toile en forme d'une faible voûte.

C'est à propos des nappes de charriage que se pose la question fondamentale: des solides comme les roches peuvent-ils s'écouler sous l'action de forces très faibles telles que celles mises en jeu par leur propre poids?

Cette question est du domaine de la mécanique.

En vue des expériences classiques sur les déformations tectoniques les géologues admettaient que l'action seule de la gravité ne peut pas provoquer ces déformations. M. GIGNOUX insiste sur la circonstance que ces expériences ne font pas intervenir la notion du temps géologique.

Des expériences faites surtout en Amérique ne duraient au plus que quelques dizaines d'années. Mais pour pouvoir conclure numériquement du modèle à la réalité il faut adopter un même changement d'échelle pour toutes les grandeurs mesurables entrant en jeu, les longueurs, les forces et le temps.

M. GIGNOUX rappelle fort à propos que R. MAILLET et R. PAVAN DE CECCATY ont démontré par des raisonnements mathématiques rigoureux que le choix de ces unités implique l'emploi d'une matière de viscosité déterminée.

Si nous voulons reproduire sur modèle réduit en 10 ans la formation d'une chaîne de montagnes qui a duré 10 millions d'années, les temps seront réduits dans le rapport de $1 : 10^{-6}$

(1 : 1.000.000). Pour rester dans le même changement d'échelle, il faut opérer, d'après les auteurs précités, avec une matière telle que, par rapport aux roches, le module d'élasticité soit réduit dans le rapport $1:10^{-12}$ et le coefficient de viscosité dans le rapport de $1:10^{-18}$. Ainsi les matériaux qu'il faudra employer dans le modèle réduit pour les soumettre à l'action de la gravité, doivent être à la fois extrêmement compressibles et extrêmement peu visqueux. Cela serait réalisé par une solution de gélatine ou de la pâte dentifrice diluée. Une telle substance placée sur un plan incliné, même de très faible pente, s'écoulera en donnant naissance à des plis. Mais elle serait incapable à réagir par flexion à une compression tangentielle.

Ces auteurs arrivent à la conclusion que, vu à l'échelle des temps géologiques, les roches seraient incapables de transmettre une poussée tangentielle opérant de l'arrière et que les plis et les charriages sont le résultat de l'écoulement par gravité sur des pentes très faibles.

M. GIGNOUX estime que la difficulté des géologues à se rallier à la théorie de l'écoulement par gravité réside dans la répugnance à admettre « contre le gros bon sens » que les roches solides peuvent couler sur une faible pente comme des liquides.

Il faut cependant penser à l'échelle des temps géologiques et non pas à l'échelle d'une vie éphémère humaine et il cite quelques exemples, d'ailleurs depuis longtemps connus, de solides qui coulent comme des liquides, mais avec une extrême lenteur.

Il cite d'abord le comportement de la cire à cacheter à la température ordinaire.

Le bâton de cire a l'apparence d'un solide qu'on peut casser mais non ployer. Mais posons ce bâton à ses deux extrémités sur deux supports et en une quinzaine de jours ce bâton sera déformé et courbé en arc sous son seul poids. Ralenti à l'échelle de quinze jours un coup de marteau ne casserait plus la cire, mais le marteau s'y enfoncerait comme une cuillère dans un pot de miel.

Rappelons encore le comportement de la poix à la température ordinaire. Si l'on perce un trou dans un tonneau rempli de poix, la poix s'écoulera, dans le courant de plusieurs semaines, par le trou.

La démonstration la plus instructive est donnée par la glace des glaciers.

A l'échelle du moment la glace est un corps solide, qui, frappé à coups de marteau, se brise en éclats sans se déformer.

A l'échelle d'une année ou de plusieurs années, la glace est un corps plastique susceptible d'un écoulement visqueux sous l'effet d'une pente extrêmement faible. Les glaciers coulent comme des fleuves, mais avec une vitesse cent mille fois plus petite. Au front du glacier, la glace est souvent rubanée par suite de l'empilement de couches de glace provoqué par le mouvement différentiel en conséquence que les lames supérieures de la glace coulent plus vite que les lames inférieures. Par un même mouvement différentiel la glace devient schisteuse. Une galerie creusée dans la glace se ferme d'elle-même en quelques mois par rapprochement des parois.

L'observation d'un glacier nous apprend aussi qu'il faut changer l'échelle du temps quand nous voulons comprendre différents phénomènes géologiques qui se jouent à la fois mais à des accélérations bien différentes.

La surface d'un glacier n'est pas régulière et plane comme celle d'un fleuve malgré que les deux coulent, mais à une vitesse différente.

Les ruisseaux d'eau de fonte qui se forment en été à la surface du glacier y creusent des vallées en miniature et les changements de pente font naître dans le glacier des crevasses. Que ces vallées et ces crevasses y existent en même temps que la glace coule se comprend parce que le creusement des vallées et l'écartement des parois des crevasses se fait avec une vitesse beaucoup plus grande que l'écoulement de la glace.

Vu à l'échelle des temps différente deux phénomènes d'écoulement de la glace et de creusement de vallées à la surface, ont une existence indépendante.

Ces faits réfutent aussi l'objection qu'il serait impossible que persistent les inégalités du relief des montagnes et des vallées profondes si les roches pouvaient couler sur une faible pente comme les glaciers, sous la seule action de leur poids. Les phénomènes d'érosion et de creusement des vallées se forment et disparaissent avec une vitesse infiniment plus grande que les déformations tectoniques de l'écorce terrestre.

Le creusement et le comblement des vallées et des lacs demandent au plus quelques dizaines de milliers d'années, mais il faudrait vivre plusieurs dizaines de millions d'années pour voir s'écouler les roches.

L'intervention de l'écoulement par gravité joue sans doute un rôle non négligeable dans la formation de certains plissements montagneux, mais il faut quand-même bien se garder à donner à cette intervention de la pesanteur un rôle qu'elle n'a pas pu jouer. Elle ne peut entrer en jeu qu'en seconde ligne après que la tectonique profonde a créé les conditions de pente qui provoquera l'écoulement d'une couverture de sédiments étalée sur une intumescence dressée par d'autres forces que celle de la simple gravité.