

---

# LES IDÉES NOUVELLES SUR L'ORIGINE DES CHAINES DE MONTAGNES

par Léon MORET

---

Le problème de la genèse des grands reliefs terrestres a depuis l'antiquité classique préoccupé philosophes et hommes de sciences, mais ce n'est guère qu'au XIX<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire à partir du moment où la Géologie fut enfin constituée en un corps de doctrine cohérent, que les idées sur la structure et l'origine des montagnes commencèrent à s'orienter vers une solution positive. Les descriptions régionales se multipliant et s'amplifiant sur des bases solides, on put enfin proposer, pour représenter ces objets, des cartes et des coupes géologiques, ou même des stéréogrammes à trois dimensions, dans lesquelles il était tenu un compte rigoureux des rapports de chronologie et d'architecture des divers terrains. On avait là ce que nos ingénieurs modernes appellent des « modèles réduits » de régions, et l'étude des montagnes pouvait dès lors être, pour ainsi dire, interprétée de l'extérieur.

Les progrès des sciences géologiques permirent de présenter de telles épures pour toutes les époques de l'histoire d'une région envisagée, de sorte qu'en réunissant ces jalons essentiels par des dessins intercalaires (la chose a été réalisée notamment pour les Alpes françaises), on a pu arriver à établir de véritables films en dessins animés permettant de faire la « cinématique » d'une chaîne de montagnes.

Or, depuis quelques années, l'intervention en Géologie des sciences physico-chimiques et même de l'analyse mathématique, a favorisé l'essor de nouvelles sciences dont l'une surtout, la Physique du Globe ou Géophysique, a apporté sur l'origine des forces qui déforment l'écorce terrestre, c'est-à-dire sur le côté « dynamique »

du problème, des données singulièrement importantes. Cette fois, c'est de l'intérieur que pourra venir la lumière.

Le but de cet article est, après un bref rappel des anciennes théories explicatives, de mettre l'accent sur les idées nouvelles qui se sont fait jour ces dernières années, en montrant leur développement historique et tout le parti que peut en retirer le géologue alpin qui, tout en pouvant se passer de ces théories pour effectuer son travail descriptif, est cependant journellement sollicité par le problème de l'origine des montagnes qui l'entourent<sup>1</sup>.

### Les anciennes explications.

Comme il est littéralement impossible de mentionner ici toutes les explications proposées pour l'origine des montagnes, notre choix s'arrêtera de préférence sur celles qui, depuis que la Géologie existe en tant que science d'observation, ont retenu le plus longtemps l'attention des chercheurs. La première est celle dite du *soulèvement*. Ce sont les travaux de HUTTON et de Léopold DE BUCH sur les cratères de soulèvement (idée fautive d'ailleurs) qui amenèrent les géologues à considérer les montagnes comme le résultat de phénomènes volcaniques, et l'on admit que les matériaux éruptifs, laves et gaz, sous pression, pouvaient être capables localement de soulever jusqu'à la verticale les sédiments. C'est ainsi que, pendant longtemps, on crut que nos massifs cristallins alpins du type Mont-Blanc, Belledonne ou Pelvoux, étaient arrivés à la surface en crevant de bas en haut leur couverture sédimentaire, laquelle était alors refoulée latéralement et symétriquement par rapport à l'axe de la chaîne.

Mais on ne tarda pas à s'apercevoir que la théorie clef des cratères de soulèvements n'était pas exacte et que les montagnes étaient presque toujours formées de roches plissées (ce dont s'était déjà rendu compte SAUSSURE dès 1796); aussi une violente réaction, menée surtout par Albert HEIM et Ed. SUSS, ne tarda pas à faire trébucher la théorie du soulèvement (à laquelle, comme nous le verrons, les théories actuelles tendent à revenir plus ou moins directement).

---

<sup>1</sup> Un exposé détaillé de ces théories se trouve dans les ouvrages suivants : P. FOURMARIER, *Principes de Géologie*, 2 vol. (Paris et Liège, 1944); M. ROUBAULT, *La genèse des montagnes* (Presses Univ. de France, Paris, 1949); Ch. MAURAIN, *Physique du Globe*, 4<sup>e</sup> édition (Paris, Colin, 1941); A. HOLMES, *Principles of physical Geology* (Nelson, Londres, 1947); L. MORET, *Précis de Géologie* (Paris, Masson, 1947).

Puis ce fut la théorie de la *contraction* qui obtint pendant longtemps la faveur des géologues, théorie qui, d'ailleurs, né fut rendue possible qu'à la suite de la fameuse hypothèse cosmogonique de LAPLACE suivant laquelle la Terre, goutte de matière en fusion issue du Soleil, s'était lentement consolidée en surface par suite de son refroidissement.

Dès lors, ce refroidissement progressif amenant une contraction de la planète, les couches superficielles s'adaptent tant bien que mal sur la croûte primitive, localement affaissée, en se plissant : c'est l'habit devenu trop grand pour un corps amaigri par la maladie. Cette hypothèse parut jusqu'au début du xx<sup>e</sup> siècle la seule explication possible, et reçut à l'origine la consécration d'Elie de BEAUMONT et surtout de HEIM qui lui avait apporté le renfort de mesures effectuées pour le Jura, chaîne qui au droit de Genève présente une contraction égale au quart de sa largeur primitive dépliée<sup>2</sup>. Perfectionnée par la suite avec la notion de géosynclinal introduite par James HALL et DANA, cette théorie de la contraction, qui fut explicitée par Emile HAUG et obtint un grand succès, car elle expliquait tout, devint la *théorie des géosynclinaux et des aires continentales*. Ces fosses géosynclinales sont de grandes dépressions allongées de l'écorce terrestre ayant presque toujours pris naissance en bordure des aires continentales ou compartiments relativement rigides de cette écorce. L'observation montre que les régions géosynclinales sont constituées par d'énormes accumulations de couches de faciès uniforme, généralement profond, et plissées : en bref, les régions géosynclinales sont devenues les chaînes de montagnes. Il faut donc admettre, si l'on veut comprendre l'épaisseur anormale des sédiments géosynclinaux, que le fond de ces fosses s'abaissait au fur et à mesure de l'accumulation des sédiments à une cadence sensiblement égale. Mais le rayon terrestre diminuant par suite de la contraction, les aires continentales s'enfoncent verticalement, donc se rapprochent en plissant le contenu des dépressions géosynclinales qui surgissent pour donner les zones montagneuses. Ainsi s'expliquent les chaînes qui ont successivement accidenté la surface de la planète, et qui, actuellement, se montrent plus ou moins détruites par l'érosion. Cette théorie, dont la plupart d'entre nous ont vécu pendant longtemps, ne peut plus être acceptée par les géologues depuis que l'on a pu calculer que le raccourcissement du rayon de la Terre avait été trop minime

---

<sup>2</sup> Des évaluations proposées plus tard pour les Alpes montrèrent que la réduction pouvait atteindre ici les 3/4.

pour pouvoir expliquer les grandes chaînes tertiaires. De plus, il est aussi prouvé que des périodes froides, avec glaciers plus ou moins généralisés, se sont montrées dès la période primaire; et d'ailleurs l'on ne sait plus maintenant si la Terre se refroidit ou si, au contraire, par suite des phénomènes de radioactivité elle se réchauffe.

### La théorie de l'Isostasie.

Entre temps, et dès 1855<sup>3</sup>, une notion géophysique extrêmement intéressante se fait jour qui, sous le nom de théorie de l'*Isostasie*, que lui donne son protagoniste le plus zélé, DUTTON, va devenir une théorie explicative des phénomènes de plissements de l'écorce terrestre. L'introduction de cette notion dans la Science géologique va y opérer un brusque changement d'orientation, car il va s'agir de rien moins que d'établir les lois d'équilibre de la Terre tout entière. En voici le principe :

On sait que CLAIRAUT a donné une formule célèbre, perfectionnée par HELMERT, qui permet de connaître la valeur théorique de l'accélération de la pesanteur ( $g$ ) en un point de latitude connue, situé sur l'ellipsoïde de référence d'aplatissement également connu. D'autre part, on peut mesurer la valeur réelle de la pesanteur en un point d'altitude et de latitude connues ramenées à la surface du géoïde<sup>4</sup>. Cette dernière valeur, dite valeur mesurée, doit subir un certain nombre de corrections : correction d'altitude (correction de FAYE, dite à l'air libre); correction destinée à tenir compte de l'action des masses rocheuses comprises entre le point d'étude et le sphéroïde de référence (correction de BOUGUER); enfin correction topographique déterminée par les irrégularités topographiques locales.

Or, pour un même point, la valeur calculée et la valeur mesurée de l'accélération de la pesanteur ne sont pas identiques et leur différence donne lieu à une anomalie que l'on a convenu d'appeler

---

<sup>3</sup> C'est l'étude des déviations de la verticale, dans l'Inde, au voisinage des masses de l'Himalaya, qui conduisit PRATT à cette idée fondamentale de l'isostasie, comme nous le verrons plus loin.

<sup>4</sup> Solide terrestre obtenu en supposant la surface de niveau des océans prolongée sous les continents. Pour être comparées utilement, toutes les mesures gravimétriques doivent être rapportées au géoïde terrestre, surface de référence essentielle.

l'anomalie de Bouguer. Cette anomalie se mesure en milligals<sup>5</sup> (1 mgal = 10<sup>-3</sup> cm. sec.<sup>-2</sup>).

C'est ainsi que les continents se caractérisent par un déficit par rapport à la gravité calculée, tandis que les grandes cuvettes marines et la plupart des îles océaniques sont au contraire caractérisées par un excès. De telles mesures ont été faites pour nos Alpes et l'on a pu se rendre compte que les valeurs de  $g$  y sont anormales par défaut, mais que le maximum de l'anomalie ne correspond nullement aux parties les plus élevées. Il en est de même pour d'autres chaînes, Jura, Pyrénées, Carpathes, Himalaya.

Ces anomalies de  $g$  sont généralement accompagnées d'anomalies de la direction de la pesanteur (dites déviations de la verticale).

Or, dans les massifs montagneux, lieux d'accumulation de roches superficielles, on pouvait à priori s'attendre à l'existence d'anomalies positives. Aussi, ces anomalies négatives, toujours constatées, amenèrent-elles les premiers observateurs à penser que les couches superficielles de la croûte devaient être moins denses sous les montagnes que sous les régions planes environnantes ou sous les océans. C'est ainsi que PRATT, frappé par les anomalies gravimétriques qu'il avait observées dans l'Inde, au voisinage de l'Himalaya, estimait que les roches constituant ces énormes massifs devaient être comme boursouflées et de densité ainsi réduite<sup>6</sup>. Mais, comme l'observation géologique s'inscrit en faux contre cette idée, c'est donc que la cause du déficit de masse se trouve plus en profondeur, et l'on peut alors conclure que les anomalies de la pesanteur traduisent une certaine irrégularité de la répartition des masses minérales profondes.

La notion d'isostasie fut par la suite complétée par les travaux de HAYFORD et de BOWIE qui furent alors amenés à introduire dans leurs calculs une nouvelle correction dite *correction isostatique*, ou de *compensation*, correspondant à la répartition des masses profondes entre la couche de référence (niveau des mers) et la surface à pression constante. Dès lors, les anomalies de la pesanteur se

<sup>5</sup> De Galilée. Une anomalie est la différence qui existe entre la valeur réelle d'un champ de force terrestre et celle présentée par le géoïde homogène et de forme géométrique parfaite. L'anomalie de Bouguer qui renseigne sur l'hétérogénéité de la profondeur de la croûte est donc un moyen extrêmement utile pour l'étude du sous-sol. Nous allons voir qu'une autre anomalie, celle de Hayford, renseigne, elle, sur le degré de perfection du rajustement vertical des masses perturbantes.

<sup>6</sup> Pour lui la densité des roches sous l'Everest était considérée comme plus faible que celle des roches de la vallée du Gange et, dans son esprit, cette inégalité devait se poursuivre en profondeur jusqu'à la surface de compensation de densité uniforme.

trouvent très réduites et, dans l'ensemble, on put admettre une distribution assez régulière de la pesanteur, confirmée d'ailleurs par l'étude de la déviation de la verticale, ce qui, en somme, est favorable à la notion générale d'isostasie.

Cette conception purement mathématique de l'isostasie fut matérialisée par AIRY (fig. 1), puis par HEISKANEN, qui proposèrent, et cette fois en parfait accord avec les géologues, de considérer les couches superficielles du globe (croûte) comme flottant sur des couches profondes plus denses et possédant des propriétés différentes,

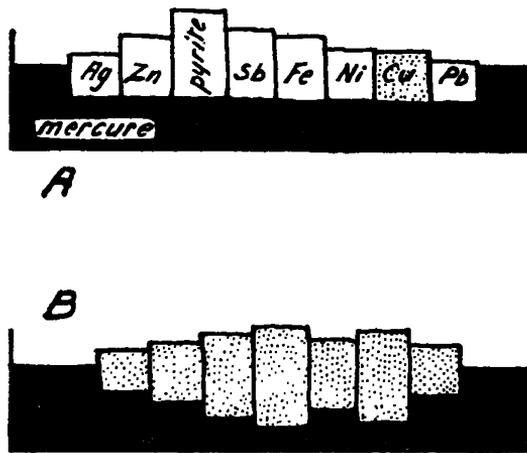


Fig. 1. — Schéma de l'isostasie. A, d'après Pratt; B, d'après Airy (dans ce dernier cas, tous les prismes sont de même nature et possèdent la densité du cuivre par exemple).

et en particulier une plasticité suffisante pour permettre de véritables déformations sous l'action de contraintes prolongées (magma). Entre ces deux éléments, croûte et magma, doit s'établir une sorte d'équilibre isostatique tendant vers l'équilibre hydrostatique, lequel ne peut être évidemment que rarement et complètement réalisé. On évalue à 50-60 km. l'épaisseur de cette croûte terrestre; au-delà, l'état de déséquilibre se régularise progressivement et la répartition des masses semble alors obéir à une loi de répartition régulière réalisée dans la surface dite de compensation <sup>7</sup>.

<sup>7</sup> On admet qu'il existe des zones concentriques de densité croissante, avec répartition hydrostatique des pressions.

Il faut aussi admettre que la croûte superficielle est plus épaisse sous les chaînes de montagnes que sous les océans où elle s'amincit et peut même disparaître complètement, pour faire place au seul magma<sup>8</sup>.

Ainsi peut-on commencer à saisir tout l'intérêt que présentent de telles recherches pour le géologue tectonicien.

Le grand géologue autrichien Eduard SUESS avait naguère proposé un schéma général du globe terrestre devenu rapidement classique et utilisé par tous les géophysiciens. Pour lui, le globe terrestre est formé de deux enveloppes essentielles recouvrant un noyau profond. L'enveloppe la plus superficielle ou lithosphère, celle accessible à l'observation, est constituée de roches légères (densité moyenne 2,3)<sup>9</sup> caractérisées surtout par la présence de la silice et de l'alumine, d'où le nom de Sial (zone sialique)<sup>10</sup> qui lui est donné par SUESS. Ce Sial est appliqué contre une seconde enveloppe essentiellement silico-magnésienne cette fois, le Sima (zone simique ou pyrosphère), formée de roches basiques ayant à peu près la composition d'un basalte ou d'une péridotite et dont la densité moyenne serait de 3 et l'épaisseur de 2.900 km. environ. Enfin, un noyau lourd, probablement rigide et formé de fer nickélique, la Nifé de SUESS (zone nifique, barysphère), occuperait le centre de la planète<sup>11</sup>.

Empressons-nous d'ajouter que cette hypothèse qui, comme nous l'avons dit, est devenue rapidement classique, doit être retouchée en tenant compte des récentes recherches géophysiques.

En effet, on admet actuellement que la base du Sial fait corps avec la zone simique superficielle et que cet ensemble flotte sur la partie inférieure visqueuse et plastique du sima dit « sima vitreux ». Mais, on ne peut encore préciser la profondeur de la surface de contact entre l'écorce cristalline et ce sima vitreux semi-fondu.

<sup>8</sup> On pense maintenant que non seulement la croûte est plus épaisse sous les montagnes qu'ailleurs, mais qu'elle peut pénétrer profondément dans le magma (voir plus loin). C'est ce que l'on appelle alors la racine (*root*) des chaînes montagneuses.

<sup>9</sup> C'est-à-dire la densité d'un granite de composition moyenne. Les plus profonds des sondages récents (en Amérique on a atteint 6.000 m.) ont montré que l'écorce terrestre était toujours formée de roches granitiques. Sous les bassins sédimentaires de surface, le granite se montre souvent lardé d'intrusions volcaniques.

<sup>10</sup> C'est alors notre « *croûte* », dont nous avons admis plus haut que son épaisseur était de l'ordre de 50 à 60 kms.

<sup>11</sup> Cette notion d'un noyau central métallique et rigide était basée sur l'étude de la propagation des tremblements de terre et sur l'existence des météorites, débris d'astres éclatés, presque toujours formés de fer et de nickel (v. L. MORET, *Précis de Géologie, loc. cit.*, pp. 12 et 138). Rappelons que le rayon terrestre est de 6.300 kms.

Cependant l'étude de la propagation des ondes séismiques a montré qu'à partir d'une profondeur variant de 40 à 60 km., apparaissent des discontinuités manifestées par l'accroissement des vitesses de propagation des vibrations élastiques (discontinuité de MOHORO-VICIC).

D'autre part, ces études ont également montré que la propagation des ondes dans la zone centrale du globe (Nifé de SUESS) subissait des perturbations mettant en évidence à une certaine profondeur (5.000 km.) une nouvelle discontinuité délimitant, dans le noyau, une *graine* centrale, dans laquelle la propagation des ondes est moins connue et dont la nature exacte reste encore une énigme <sup>12</sup>.

Quoi qu'il en soit, il ressort de tout cela que les continents ne sont pas des masses fixées, mais tout au contraire des zones mobiles, et ce n'est pas un des moindres mérites de l'isostasie que d'avoir favorisé la naissance de cette notion du *mobilisme*. Ce mobilisme peut d'ailleurs se manifester de deux façons : soit dans le sens verti-

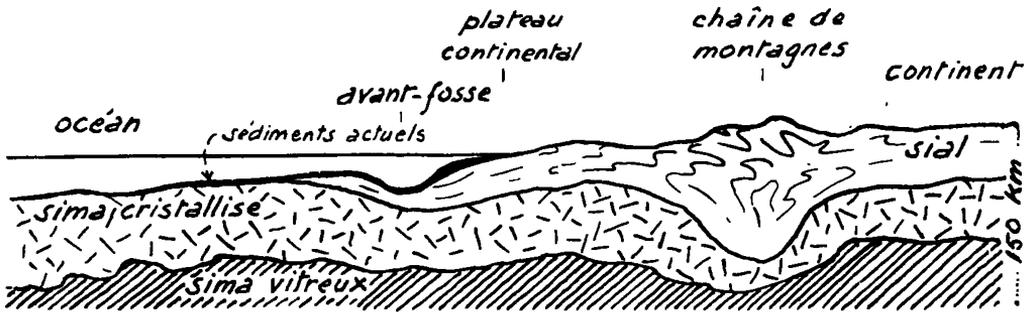


Fig. 2. — Schéma destiné à concrétiser les conceptions actuelles sur la structure des couches superficielles du globe.

cal, et ce sont nos mouvements dits épirogéniques, soit dans le sens horizontal, et ce sont les mouvements dits tangentiels de la tectonique classique et de la théorie de WEGENER-ARGAND. Les rapports respectifs entre continents et océans peuvent être schématisés par notre figure 2.

<sup>122</sup> De fait, dans l'enveloppe entourant le noyau-graine, les ondes longitudinales et transversales se transmettent dans des conditions très voisines de celles des corps solides légèrement plastiques; par contre, dans le noyau et surtout la graine, seules les ondes longitudinales se propagent.

### Les mouvements verticaux ou épirogéniques.

Ce sont de vastes oscillations d'ensemble des compartiments de la croûte, relativement rapides, réglées par les lois de l'isostasie, et que l'on a pu constater de nos jours et même mesurer. Ainsi, certaines côtes de Bretagne ou des Flandres s'enfoncent progressivement; par contre, le socle scandinave est en voie d'ascension, et ces phénomènes déterminent par conséquent soit une transgression, soit une régression marines, de sorte que l'on est immédiatement fondé à supposer que beaucoup de transgressions, stratigraphiquement établies au cours des périodes géologiques, même les plus lointaines, sont dues à des phénomènes de ce type.

L'exemple le plus remarquable, et le mieux étudié par de GEER et ses élèves<sup>13</sup>, est celui de la Scandinavie et de la Finlande qui, envahies au Quaternaire par l'immense glacier scandinave, s'affaîsèrent progressivement sous ce poids énorme. Elles en furent libérées partiellement il n'y a que 8.000 ans environ<sup>14</sup> au moment de la fonte des glaciers quaternaires. Depuis cette date, le socle scandinave dénudé se relève petit à petit, mais avec un retard mesuré et à la cadence actuelle de 1 m. environ par siècle dans les régions les plus favorisées, et bien que le retrait glaciaire soit depuis longtemps accompli. Les mesures gravimétriques ont montré qu'il existait dans les régions centrales de la Scandinavie une anomalie de —25 mgals, et l'on a pu calculer que, pour que l'équilibre isostatique soit réalisé, le sol de ce pays devait encore s'élever de 180 m., ce qui a permis à divers géophysiciens de calculer le coefficient de viscosité du sima vitreux qui, naturellement, est très grand (=  $10^{22}$  poises), expliquant ainsi la lenteur relative de tels mouvements.

J'ajoute que la flexibilité d'ensemble de la croûte sialique est non seulement prouvée par les vibrations séismiques qui l'agitent sans arrêt, mais également par les singuliers phénomènes des marées de l'écorce terrestre ou marées de la pesanteur, dus au mouvement diurne combiné du Soleil et de la Lune, et qui peuvent se manifester par des variations d'altitude de 10 à 30 cm. mesurées grâce à l'apparition d'instruments très précis et très sensibles, ou gravimètres<sup>15</sup>.

---

<sup>13</sup> Et grâce à l'étude des « varves », argiles litées très finement à zones saisonnières, ayant pris naissance dans les bassins lacustres des fronts de l'inlandsis glaciaire. De tels phénomènes se sont également produits pour le Bouclier Canadien.

<sup>14</sup> Les calculs de DE GEER montrent que cette calotte de glace était encore pleinement développée il y a 10.200 ans environ, et que l'affaissement de la Suède pouvait atteindre localement 275 m.

<sup>15</sup> On peut avec cet appareil enregistrer des variations inférieures à 0,02 mgal.

**Une première application remarquable de l'isostasie :  
la théorie de Wegener ou de la dérive des continents.**

C'est l'isostasie, interprétée par AIRY, qui est le fondement de cette célèbre théorie, dont le succès a été si grand parmi les géologues à la suite du mémoire d'Em. ARGAND (1922). Je rapporterai simplement ici le principe de cette hypothèse maintenant connue de tous.

POUR WEGENER, qui reprend d'ailleurs les idées anciennes mais en les accommodant à la sauce géophysique, les continents ou radeaux de Sial n'occupent pas aujourd'hui la place qu'ils avaient au cours des temps géologiques : mobiles et comme flottant sur le Sima, ils se sont lentement déplacés en divers sens tout en froissant leurs bords ou en raclant au-devant d'eux des matériaux qui, plissés, sont devenus les montagnes (ex-chaînes) bordières comme les Andes, les Rocheuses <sup>16</sup>.

Mais, pour expliquer les divers continents actuels, il imagine qu'à un moment de l'histoire du globe, n'existait qu'un seul et immense continent qui, à partir du Crétacé se serait fragmenté, et c'est précisément la concordance des côtes atlantiques qui mit le géophysicien allemand sur la voie de sa théorie et lui fit émettre l'hypothèse, pour cet océan, d'une brisure agrandie par l'éloignement de ses bords américains et eurafricains. Dès lors, tout s'expliquait, en particulier la fameuse fiction géologique du continent de Gondwana inventée pour expliquer les affinités fauniques et floristiques, ainsi que les phénomènes glaciaires, de l'Amérique et de l'Afrique du Sud, de Madagascar, de l'Inde péninsulaire et de l'Australie durant le Permo-Carbonifère : il n'y a qu'à réunir toutes ces terres par la pensée et tout devient clair si l'on admet une dissociation de ce bloc vers la fin du Permien et la dérive des fragments dans les directions voulues.

Le grand mérite d'ARGAND, qui adopta avec enthousiasme la théorie de WEGENER, fut de montrer tout le parti que le géologue tectonicien pouvait retirer de cette hypothèse en combinant l'idée d'isostasie avec celle du mobilisme ou des mouvements tangentiels, et de féconder pour un temps les recherches géologiques.

---

<sup>16</sup> Mais les guirlandes insulaires (Japon, Indomalaisie) deviennent pour WEGENER, des fragments des chaînes côtières abandonnés par un continent en dérive et restés englués dans le Sima durci ! Nous verrons plus loin que cette interprétation ne trouve plus aujourd'hui beaucoup de crédit, tant chez les géophysiciens que chez les géologues. Cf. A. WEGENER, *La genèse des continents et des océans* (trad. M. Reichel, Paris, A. Blanchard, 1924).

Pour ARGAND, un géosynclinal est une zone singulière du Sial, qui, par suite d'étirements dus à des mouvements de dérive différentiels s'amincit considérablement puis s'affaisse dans le Sima et peut alors devenir le siège d'une active sédimentation. Notons que cette fosse géosynclinale est comprise entre les bords rigides des vieux môles de l'avant-pays (les « serres » d'ARGAND). Que l'on imagine maintenant un rapprochement de ces serres, des poussées latérales tangentielles entrent en jeu, comprimant les sédiments de notre géosynclinal. Ainsi prennent naissance en premier lieu de gigantesques rides ou géanticlinaux, émergeant tout d'abord en chapelets d'îles (les cordillères d'ARGAND), qui peu à peu se soudent pour former un véritable continent allongé. Les efforts tangentiels continuant à se faire sentir, d'autres géanticlinaux-cordillères vont se former, séparés par des géosynclinaux secondaires dont le fond peut à son tour se plisser et l'ensemble pourra enfin surgir pour donner une chaîne de montagne. Appliquant ces idées aux Alpes, ARGAND put, en une brillante synthèse, expliquer la formation de cordillères dans le géosynclinal alpin, puis la naissance des grandes nappes de charriage et de tous les autres plis secondaires par des poussées tangentielles dirigées vers le Nord et l'Ouest et déterminées par le môle africain en dérive contre le môle eurasiatique, qu'il va même chevaucher en déterminant le déversement des nappes sur l'avant-pays <sup>17</sup>. Pour ARGAND, l'Afrique a même laissé sa signature sur le front des Alpes (nappes préalpines) et dans sa région radicale (Dinarides). Nous verrons plus loin ce qu'il faut penser de cette tectonique dirigée; pour le moment, bornons-nous à constater que, ni les nappes préalpines, ni les Alpes dinariques n'ont l'origine lointaine que leur prêtait ce géologue et que la théorie des dérives continentales, fort en vogue chez quelques biologistes pour expliquer la répartition actuelle de certains animaux, n'est pas sans présenter d'assez graves difficultés géologiques, enfin que les vérifications géodésiques que l'on escomptait n'ont pas encore pu être établies.

### Les anomalies de l'isostasie et leurs conséquences sur l'évolution de la tectonique et la formation des chaînes géosynclinales.

Nous avons vu que la correction isostatique permet d'apporter aux mesures locales de la gravité des perfectionnements qui les rendent indépendantes des variations d'épaisseur de la croûte sia-

---

<sup>17</sup> On sait que la bordure orientale des Alpes (zone d'Ivrée) constitue, pour ARGAND, la racine des grandes nappes (Préalpes médianes) redressées et renversées au moment de la phase tectonique d'effondrement insubrien.

lique ou des variations de densité moyenne de cette croûte et que ces valeurs ainsi calculées deviennent très voisines des valeurs théoriques obtenues par la formule de CLAIRAUT. La compensation peut alors être regardée comme assez rigoureuse pour admettre la réalité de l'équilibre isostatique de la lithosphère.

Naturellement, il existe parfois de petites anomalies isostatiques obtenues en faisant la différence entre la valeur théorique de la gravité et cette valeur mesurée et corrigée isostatiquement. Ces anomalies sont généralement faibles et comprises entre  $-20$  et  $+20$  milligals. Elles résultent, d'une part, des erreurs inévitables de mesures, d'autre part, de l'hétérogénéité de la surface terrestre et leur étude intéressante pour le topographe demande toujours à être interprétée par un géologue, et peut se faire à l'aide d'appareils de mesure très précis tels que la balance d'EÖTVÖS ou le pendule d'HOLWECK-LEJAY.

Cependant depuis peu, et grâce aux beaux travaux de VENING-MEINESZ et de BULLARD, nous connaissons des *zones de très grand déséquilibre isostatique*, autrement dit des régions où les anomalies isostatiques sont très fortes, comme les Indes Néerlandaises et les Antilles. Ces zones sont en général le siège de séismes et d'une grande activité volcanique récente ou actuelle <sup>18</sup>.

On sait que les côtes du Pacifique, de même que les arcs insulaires du Pacifique occidental, sont marqués par la présence de chaînes plissées récentes ainsi que par des alignements de volcans encore en activité et d'épicentres séismiques et que, parallèlement à ces chaînes côtières, s'étendent d'étroites et profondes fosses océaniques.

Or, les campagnes gravimétriques sous-marines de VENING-MEINESZ <sup>19</sup> ont mis en évidence, depuis Sumatra jusqu'aux Philippines, l'existence d'une longue et mince bande sinueuse à fortes anomalies isostatiques négatives pouvant atteindre vers Célèbes jusqu'à  $-200$  milligals, et séparant deux zones à fortes anomalies positives, dépassant parfois 100 milligals (fig. 3).

Cette bande, de 100 à 200 km. de largeur, qui suit parallèlement la convexité de l'arc insulaire, longe Sumatra et Java, traverse Timor

<sup>18</sup> Ces mesures de  $g$  qui ont nécessité la mise en œuvre de méthodes spéciales, ont été effectuées à bord de sous-marins, et cela surtout au cours de la dernière guerre mondiale.

<sup>19</sup> F.-A. VENING-MEINESZ, J.-H.-F. UMBGROVE, Ph.-H. KUENEN, *Gravity expedition at sea 1923-1932*, vol. II. (Public. of the Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1934); P. LEJAY, Gravimétrie et tectonique dans les Indes Néerlandaises (*Bull. Soc. Géol. France*, t. XVI, p. 525, 1946); J.-H.-F. UMBGROVE, *The pulse of the Earth*, 2<sup>e</sup> édit. (La Haye, 1947); R. W. VAN BEMMELEN, *The Geology of Indonesia* (La Haye, 1949); I. DE MAGNÉE, *Géologie et Géophysique (Ciel et Terre, Bruxelles, 1947)*.

et se recourbe vers Ceram avant d'atteindre Célèbes. Mais il faut remarquer que sur une distance de près de 5.000 km., elle coïncide presque toujours avec des hauts-fonds ou des chapelets d'îles et évite les profonds sillons sous-marins qui les encadrent. Il est donc difficile de l'expliquer par un défaut de masse, puisque au contraire, il y a plutôt excès de masse; de plus, il faut noter l'absence de volcans dans la zone d'anomalies négatives elle-même.

L'étude géologique de ces îles de la zone de gravité déficitaire

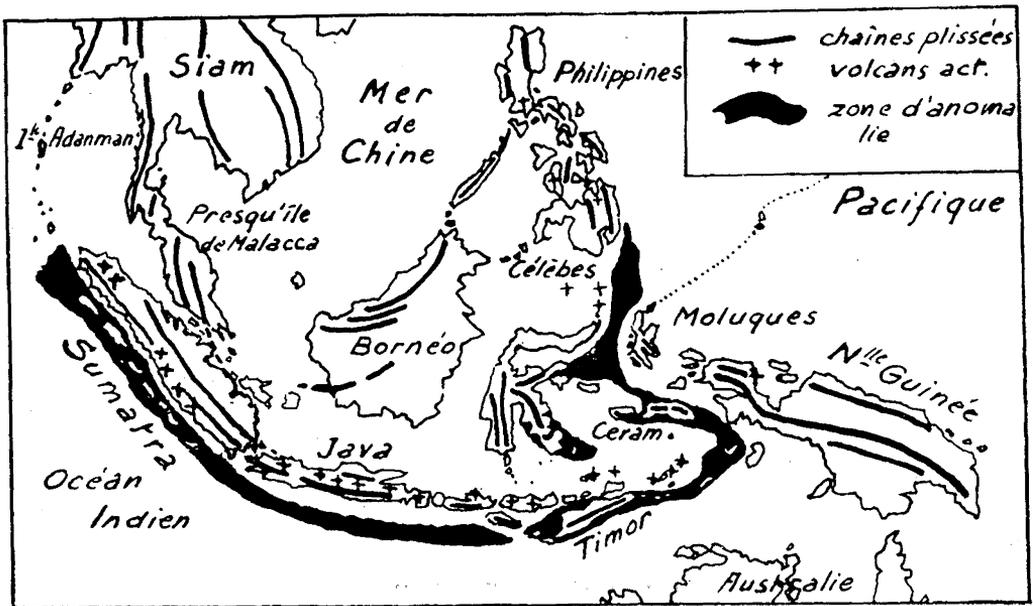


Fig. 3. — La grande zone d'anomalie négative des Indes orientales (en noir) (d'après Holmes, utilisant les travaux de Vening-Meinesz).

a montré que toutes ces régions avaient présenté, depuis le Miocène, une très grande mobilité. C'est à cette époque que se produisit le plissement principal, accompagné de failles inclinées et de charriages. Puis, au Pliocène, ces îles furent submergées et, par la suite, commença leur morcellement grâce à des cassures parallèles délimitant des compartiments dont les uns furent surélevés tandis que les autres s'effondraient. L'exhaussement continental, pendant le Quaternaire, fut même tel qu'à Timor, par exemple, certains récifs coralliens récents ainsi que des terrasses sous-marines furent portés à l'altitude de 1200 m., tandis qu'un intense volcanisme, qui

de nos jours, s'allumait à Sumatra, Java et sur les autres îles de la guirlande indonésienne.

Le résultat global de cette tectonique prouvé par les mesures est que, au Tertiaire, un très important raccourcissement de l'écorce s'est produit dans ces régions. On estime que ce rétrécissement doit atteindre 45 km. et que la masse de compensation constatée doit avoir une largeur de 60 km. et une profondeur de 20 km. Et ces caractères se retrouvent tout au long de la ligne d'anomalies signalée.

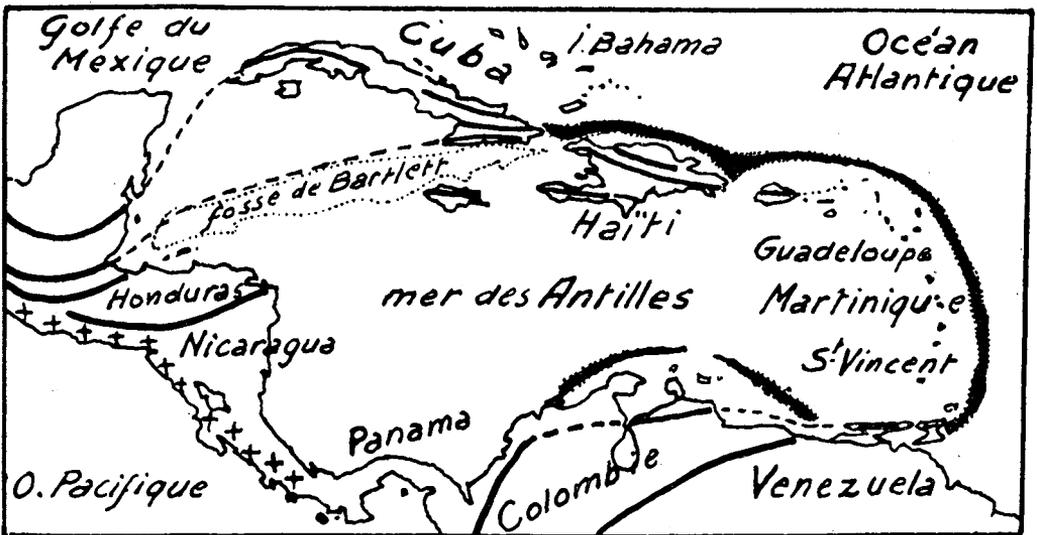


Fig. 4. — La zone d'anomalie négative des Antilles.

Ajoutons qu'une autre zone d'anomalies déficitaires non moins importante, puisqu'elle s'étend sur plus de 4.000 km., a pu être établie à l'extérieur de l'arc des Antilles (fig. 4), et passant par Cuba, la côte de la Guyane, Trinidad et les îles qui tangent la côte du Venezuela <sup>20</sup>.

L'analogie de forme de cette zone avec l'arc carpathique a pu être soulignée. Mais pour expliquer de telles zones d'anomalies négatives, VENING-MEINESZ ne voit d'autre hypothèse que celle consis-

<sup>20</sup> On retrouve encore d'autres zones d'anomalies isostatiques négatives au Sud du Golfe de Tarente, le long des côtes calabraises, mais aussi, comme nous le verrons, sur les continents, dans les Alpes en particulier.

tant à supposer que la croûte sialique, sous l'action de causes qui resteront à préciser, peut localement subir un fléchissement puis se transformer en une boucle qui finit par plonger dans le sima en comprimant les sédiments y contenus (fig. 5). En termes géologiques, c'est ce que nous appellerons un synclinal de sial dans le sima, et nous rejoignons ici une notion bien connue, celle du géosynclinal, dont nous avons parlé plus haut et qui, elle, fut naguère déduite d'observations stratigraphiques et tectoniques.

Et la comparaison fut immédiatement présentée et utilisée par les géologues pour expliquer la genèse de certaines chaînes de mon-

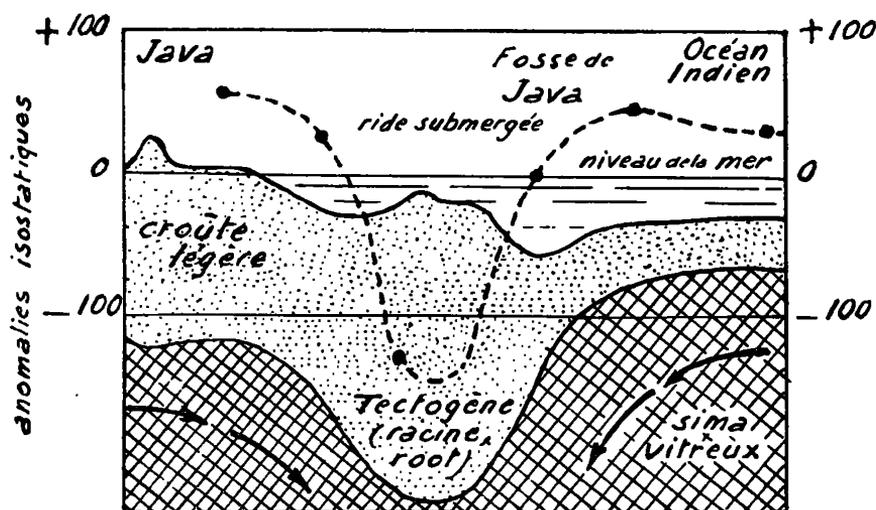


Fig. 5. — Interprétation, par Holmes, de la zone d'anomalie négative passant au Sud de Java et découverte par Vening-Meinesz. Il s'agit d'une chaîne montagneuse en formation.

tagnes. A. HOLMES <sup>21</sup>, des premiers, n'hésita pas à reconnaître dans les zones à gravité déficitaire l'équivalent d'un géosynclinal en cours d'écrasement donnant naissance à un arc montagneux plissé, idée à laquelle ne tardèrent pas à se rallier la grande majorité des géophysiciens.

<sup>21</sup> A. HOLMES : The thermal History of the Earth (*Journ. of the Washington Academy of Sciences*, XXIII, p. 169, 1963) et *Principles of Physical Geology* (Londres, Nelson, 1947).

Il est juste de reconnaître que bien avant les travaux des géophysiciens hollandais, les fosses bordières des guirlandes insulaires indonésiennes avaient été interprétées comme des géosynclinaux types, et citées en exemple comme telles dans certains ouvrages. Mais, étant donné l'idée que l'on se faisait alors de ces géosynclinaux, de telles zones auraient dû se caractériser par des anomalies positives alors que c'est tout le contraire qui a été observé. Pour HAUG, en effet, un géosynclinal est toujours compris entre deux mers épicontinentales (et c'est pourquoi d'ailleurs il avait été obligé de formuler l'hypothèse de son continent pacifique) et doit donc avoir un fond de matériaux simiques, se traduisant par une forte anomalie positive<sup>22</sup>. Par ailleurs, l'affaissement du géosynclinal doit déterminer des accumulations de roches très légères incapables de provoquer cet affaissement. On voit donc que les causes capables de contrarier la pesanteur et de détruire l'équilibre isostatique du substratum cristallin doivent être recherchées ailleurs.

De plus, dans une chaîne géosynclinale du type Alpes, par exemple, les forces tangentielles ou composantes horizontales prennent le pas sur les forces isostatiques qui sont essentiellement verticales, de sorte que les versants du géosynclinal sont toujours comme écrasés et déversés sur l'avant-pays et que l'image d'un étau avec ses mâchoires, ses « serres », entre lesquelles sont comprimés les plis, s'impose à l'esprit.

L'isostasie ne pourrait, semble-t-il, intervenir qu'au moment de la rémission de ces forces tangentielles et pour régulariser l'équilibre de la région en soulevant l'ensemble de la zone plissée qui va émerger sous forme de guirlandes d'îles, plus ou moins réunies en « cordillères », dont l'évolution va se prolonger jusqu'au moment où l'ensemble de la chaîne va lui-même émerger en refoulant les eaux marines. L'équilibre isostatique sera enfin atteint, et l'érosion

---

<sup>22</sup> A ce sujet, il n'est pas inutile de rappeler les caractéristiques des océans actuels et de préciser, à la lumière des récentes recherches séismologiques, l'opposition depuis longtemps signalée entre l'Atlantique et le Pacifique. Il paraît maintenant à peu près certain que le Sial manque presque complètement sous le Pacifique dont le fond est surtout basique (sima ?). Le Pacifique n'est donc pas un continent effondré, mais comme le souligne J.-P. ROYÉ (*Rev. scientif.*, n° 3271, 15 avr. 1947, p. 404) un trait à part de l'histoire géologique du globe. Par contre, la crête sous-marine atlantique qui s'étend parallèlement aux côtes dans la région médiane de cet océan, sépare deux zones différentes : à l'Est une zone à fond sialique, prolongeant l'Afrique, à l'Ouest une zone à fond simique d'allure pacifique. C'est donc dans cette crête atlantique médiane que doit être recherchée la similitude de contours entre le côté africain et le côté américain, et c'est à partir de là que la dérive continentale proposée par WEGENER, si dérive il y a, a dû se produire (fig. 6).

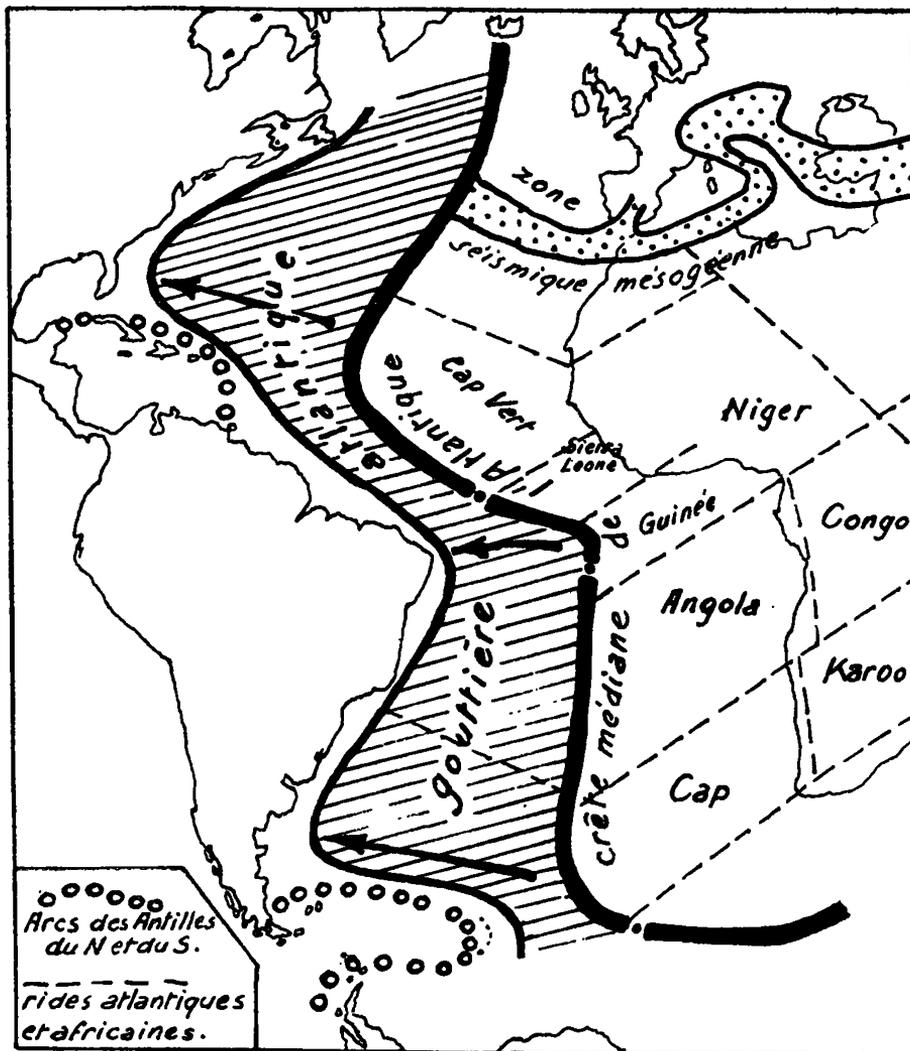


Fig. 6. — Structure de l'Atlantique, d'après J. P. Rothé.  
 Les noms géographiques désignent les divers bassins atlantiques et africains.

pourra alors progressivement détruire cet équilibre. On sait même, et l'observation nous l'a appris, que cette destruction peut être complète et que, sur une région ainsi nivelée, pénéplanée, la mer peut, par suite d'un affaissement, réenvahir la région où se dressait naguère, il y a des millions d'années, une fière chaîne de montagnes.

Depuis les travaux de VENING-MEINESZ, la notion de mobilisme, proposée par WEGENER, et utilisée avec tant d'éclat par Emile ARGAND, a été profondément modifiée. C'est ainsi que les notions de môles continentaux, de « serres », de mouvements tangentiels générateurs de plissements ont dû être révisées et que le moteur des grands phénomènes tectoniques est de plus en plus recherché très au-dessous de la région plissée, dans la croûte sialique et même encore plus profondément. Le mécanisme qui a présidé au plissement des fosses géosynclinales est encore à préciser.

Mais il semble dès maintenant prouvé qu'une fosse géosynclinale est une zone singulière de l'écorce où le sial vient se ployer en une boucle synclinale qui pénètre plus ou moins profondément dans le sima, ce qui explique les fortes anomalies isostatiques négatives constatées <sup>23</sup>.

Les bords de la boucle, en se rapprochant, déterminent le plissement des sédiments contenus dans cette dépression, et c'est donc l'allure des mouvements crustaux et, d'une façon générale des phénomènes profonds qui vont déterminer l'allure et le sens de déversement des plis ainsi formés <sup>24</sup>. Il n'est donc plus question d'étau, de serres, de continents en dérive, et du « sens de la poussée » selon une expression chère aux géologues tectoniciciens.

Une question se pose immédiatement à l'esprit : quelle est donc la nature des forces capables de ployer ainsi localement la lithosphère en une boucle géosynclinale ?

<sup>23</sup> Quant aux zones d'anomalies positives qui longent ces zones de fortes anomalies négatives, et dont la valeur, ainsi que nous l'avons vu, est toujours faible (20 mgals), on les explique par la tension qui s'exerce sur certaines portions de l'écorce terrestre ou par un simple excès de masses (bandes d'anomalies positives des crêtes sous-marines). Mais, pour expliquer les zones de très fortes anomalies positives des grandes fosses comme celle de la mer de Banda et qui atteignent jusqu'à + 100 mgals, il n'est pas question de relèvement profond car ces affaissements sont récents et même se continuent actuellement; dès lors on fait intervenir des causes très profondes telles que des variations de densité du sima vitreux. Et peut-être faudrait-il voir là l'origine de ces « courants de convection » dont il va être maintenant question.

<sup>24</sup> Cette allure des plis peut donc apparaître parfois comme incohérente et difficilement explicable. On doit donc se borner à la constater. Mais il n'est pas impossible qu'à l'aide d'expérience sur modèles réduits (du genre de celle de GRIGGS, voir plus loin) on ne puisse arriver à la reproduire.

Ici le géologue s'efface devant le géophysicien, tout en se réservant le droit de contrôle et de critique sur les théories proposées. Au demeurant, c'est un géologue, AMPFERER, qui, des premiers mit le doigt sur la solution avec son hypothèse des courants sous-crustaux capables d'entraîner en profondeur des boucles sialiques. Cette hypothèse fut ensuite reprise par E. KRAUS dans un ouvrage très discuté<sup>25</sup> où, pour expliquer la formation des montagnes, il invoque la présence de courants magmatiques descendants créant de véritables « zones de succion » qui, par sous-charriages, provoquent la formation de plis couchés et de nappes de recouvrement.

Depuis peu, l'entente semble bien s'être faite sur l'existence de tels courants thermiques se manifestant dans le sima vitreux. La cause de tels courants est encore discutée par les géophysiciens car on invoque la radioactivité (présence d'éléments radioactifs inégalement répartis), des réactions interplanétaires, des différences de densité dans le sima, des variations de températures, etc. Quoi qu'il en soit, nous connaissons dans la nature actuelle, dans l'atmosphère ou dans les liquides, des courants d'un type spécial dits « courants de convection » déterminés par des différences locales de température. Depuis les travaux du physicien BENARD, on sait que ces courants déterminent dans ces fluides des « cellules de convection » dans lesquelles prennent naissance des mouvements d'allure giratoire<sup>26</sup>.

On peut donc imaginer, dans certaines régions de la zone simique vitreuse, la présence de deux cellules gigantesques voisines et fonctionnant en sens inverse (fig. 7). Un tel mécanisme peut très bien entraîner la croûte sialique superposée et plus ou moins adhérente à ce sima, suivant une bande longue et étroite, notre boucle géosynclinale sialique.

On a même calculé la vitesse des courants qui prennent ainsi naissance, vitesse qui est naturellement faible : pour PEKERIS et VENING-MEINESZ, cette vitesse serait de 1 cm. par an pour une cellule située à 1.200 km. de profondeur et de 5 cm. lorsque cette cellule se trouve à 2.900 km. J. GOGUEL a fait de son côté des calculs qui

---

<sup>25</sup> E. KRAUS : *Der Abbau der Gebirge*; Bd I; der alpine Bauplan (Bornträger, Berlin 1936). Sur les théories de KRAUS, cf. M. GIGNOUX, Une nouvelle synthèse tectonique des Alpes : L'ouvrage de E. KRAUS (*Rev. de Géographie alpine*, t. 27, Grenoble, 1939).

<sup>26</sup> Ce sont d'ailleurs de tels courants auxquels on a fait appel pour expliquer la genèse des prismes basaltiques, à partir d'un magma pâteux, ainsi que les sols polaires dits « sols polygonaux ».

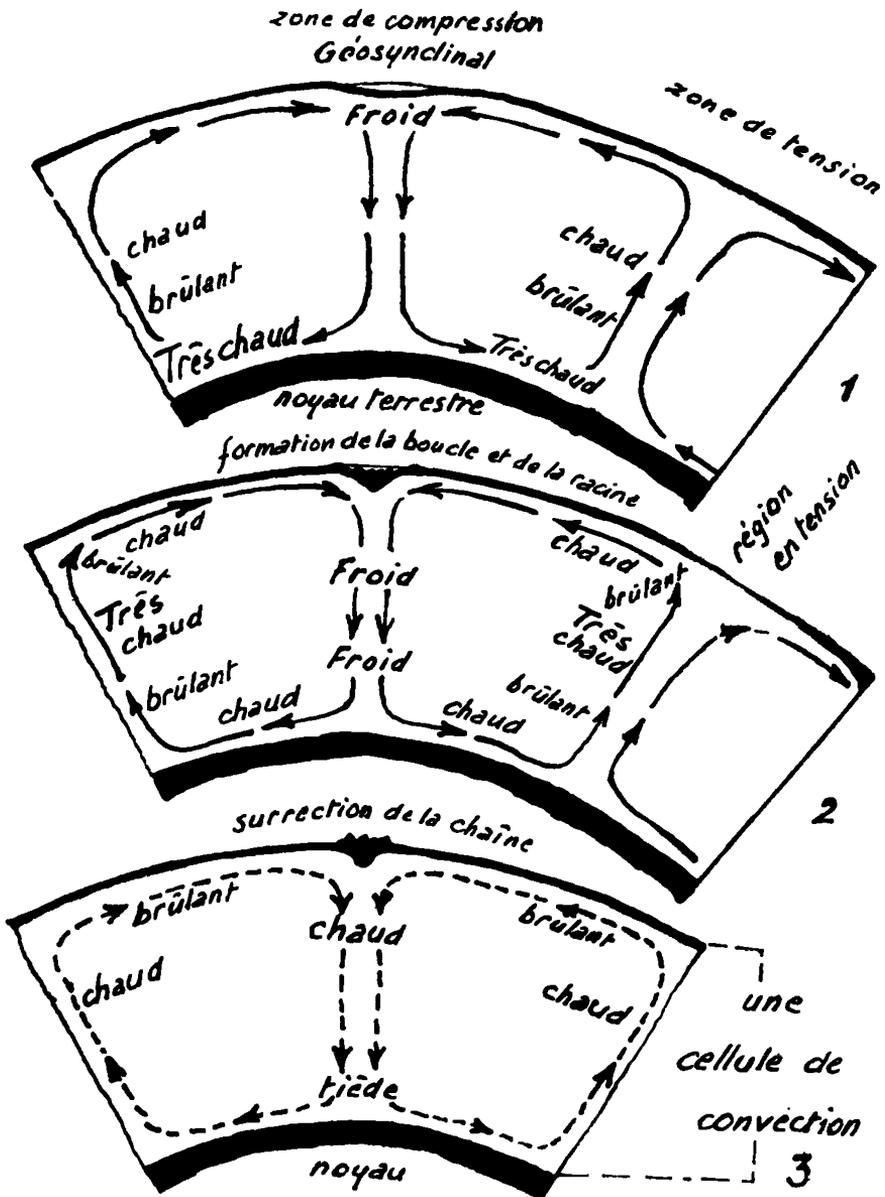


Fig. 7. — Trois sections de la zone externe de la Terre montrant les relations possibles entre l'orogénèse et l'existence hypothétique de courants convectifs (d'après Holmes).

l'ont conduit à des chiffres du même ordre, même pour une profondeur de 80 km. <sup>27</sup>.

La boucle sialique formée, s'enfonçant progressivement dans le sima, la suite du phénomène doit se dérouler suivant l'ordre indiqué ci-dessus et l'on peut dire que, dans les Indes néerlandaises notamment, on assiste à la naissance d'une chaîne de montagne, et que la phase actuelle est déjà très avancée dans le déroulement du scénario et doit correspondre à la montée générale de la zone plissée et au début du rétablissement de l'équilibre isostatique.

Est-ce à dire que toutes les chaînes montagneuses ont cette origine ? Probablement non, car la nature est complexe et variée dans ses moyens. Mais, il est très probable que la genèse des chaînes géosynclinales doit être recherchée dans cette direction, ce qui est déjà fort intéressant.

Naturellement, des perfectionnements ou des variantes ont été proposés à la thèse que nous venons d'exposer.

C'est ainsi que R. A. DALY, J. H. F. UMBGROVE, puis J. GOGUEL, expliquent la formation des zones plissées géosynclinales par le foisonnement et la montée du granite réfondu dans la partie axiale la plus profonde de la boucle sialique <sup>28</sup>, ce qui nous ramène indirectement, comme je l'ai déjà dit, à l'ancienne théorie, si combattue, du soulèvement par intrusions granitiques et explique que la phase paroxysmale des orogénèses soit toujours accompagnée d'injections sialiques acides <sup>29</sup>. A ce moment peuvent également prendre naissance toutes les roches mixtes sialo-simiques, par le processus de la « contamination » exposé par des pétrographes comme KENNEDY et ANDERSON, RITTMANN, HOLMES. Toutefois, les spécialistes ne sont pas encore d'accord sur l'exacte nature de ces phénomènes profonds qui échappent à leur analyse, puisque, de leur côté, des pétrographes aussi avertis que H. BACKLUND et C. E. WEGMANN estiment qu'il n'y a pas à proprement parler de phénomènes de fusion au droit des racines des chaînes montagneuses,

<sup>27</sup> Voir le très important ouvrage, unique en son genre, que cet auteur vient de consacrer à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre (*Mém. Serv. Carte Géol. France*, 2<sup>e</sup> édit., 1949).

<sup>28</sup> C'est ce que l'on appelle maintenant la *racine* (*root*) d'une chaîne de montagnes. Cf. R. A. DALY, *Igneous rocks and the depths of the Earth* (New-York, 1933), *Architecture of the Earth* (London, 1928) et *Our mobile Earth* (New-York, London, 1926).

<sup>29</sup> Ainsi s'expliquerait, dans cette nouvelle théorie, l'ordre des venues de roches éruptives (séquences éruptives) qui, dans toutes les régions plissées du globe est le même, roches basiques pendant la période préorogénique, acides et sialiques pendant la phase de plissement proprement dite, basiques et intermédiaires venant les accompagner à la fin et après la phase orogénique.

mais plutôt imbibition granitique progressive (granitisation des anciens auteurs) suivant le processus désigné actuellement par le terme « migmatisation ». Et c'est pour concilier les partisans de la thèse liquide et ceux de la thèse solide que L. GLANGEAUD<sup>30</sup> a suggéré qu'en profondeur les roches devaient se présenter sous des états spéciaux très différents des deux extrêmes, liquides et solides, et qu'il a appelés dynamomorphes ou oligophasés. Si j'ai bien compris l'argumentation de cet auteur, qui part des acquisitions les plus récentes de la physique et de la rhéologie, il est certain que, étant donné les hautes pressions, tensions et températures qui doivent exister en profondeur, et la présence de fumerolles, la matière cristalline stable doit passer à un état mixte, difficile à définir, mais qui doit être caractérisé par la perturbation des réseaux cristallins ainsi qu'un grand désordre moléculaire. Or, l'expérience a montré, pour certains corps, le quartz notamment, que sous cet état, la matière présente une grande viscosité (donc plasticité) et un pouvoir diffusif très élevé, qui facilite les migrations des éléments de l'écorce terrestre à l'échelle ionique et moléculaire.

On voit ainsi tout le parti que l'on peut retirer de ces notions pour édifier une théorie thermodynamique de l'écorce terrestre et pour expliquer les phénomènes massifs d'intrusions acides (granites) ou basiques (basaltes) et même le métamorphisme, lié de si près à la formation des chaînes de montagnes<sup>31</sup>.

### Vérifications expérimentales de Griggs sur modèle réduit.

Ces expériences de D. GRIGGS<sup>32</sup> étaient destinées à vérifier l'effet des courants de convection du substratum sur les couches superfi-

<sup>30</sup> Voir surtout, Orogénèse et pétrogénèse profonde d'après les théories géophysiques nouvelles (*Revue Scient.*, 1<sup>er</sup> et 15 déc. 1947).

<sup>31</sup> On admettait jusqu'ici que le métamorphisme régional était une conséquence de la formation des montagnes géosynclinales, donc une conséquence des phénomènes de plissement. Or une théorie récente, due à R. PERRIN, renverse les données du problème et, se basant sur les phénomènes de réaction à l'état solide (il n'est donc plus question ici de températures élevées et de fusion des masses minérales pour expliquer le métamorphisme) ainsi que sur les changements considérables de volume qui accompagnent de telles réactions, y trouve une source d'énergie suffisante pour justifier les grands phénomènes de plissement, et leur extrême complexité. On pourrait alors songer à un véritable *foisonnement* des masses minérales, rappelant par exemple celui qui se produit lorsque de l'anhydrite se transforme en gypse. (Cf. R. PERRIN : le métamorphisme générateur de plissements, *Ann. des Mines*, 1934, p. 135; R. PERRIN et M. ROUBAULT : le granite et les réactions à l'état solide, *Bull. serv. Carte géol. Algérie*, 1939).

<sup>32</sup> D. GRIGGS : A theory of Mountain Building (*American Journal of Science*, CCXXXVII, p. 611, 1939). Antérieurement à ces expériences, H. CLOOS, puis

cielles à l'aide d'un modèle réduit dont les propriétés avaient été remarquablement calculées et réduites.

On sait en effet que cette méthode des modèles réduits, couramment utilisée par les techniciens, ne peut être employée sans une grande prudence<sup>33</sup>. En particulier, toutes les propriétés physiques d'un matériau donné (densité, viscosité, rigidité, élasticité) et qui peuvent être exprimées en fonction des unités c. g. s. de longueur, masse et temps, doivent être ici réduites suivant des rapports de similitude soigneusement étudiés. Une des propriétés les plus importantes des corps utilisés dans les expériences de reconstitution des phénomènes de plissements est la viscosité, c'est-à-dire la propriété que présente un matériau de rester plastique sans se rompre. Or, jusqu'ici, on utilisait dans ces expériences des corps tels que l'argile, le sable, la plastiline, etc. Mais les calculs d'ingénieurs tels que MAILLET et PAVANS DE CECCATY, KING HUBBERT, ont indépendamment montré que ces corps étaient encore trop rigides et qu'il fallait se servir de matériaux comparables à de la pâte dentifrice diluée<sup>34</sup>.

Dans ses expériences, GRIGGS s'est servi, pour représenter l'écorce terrestre, de matériaux présentant une viscosité analogue; une couche d'huile lourde noircie flottant sur de la glycérine non colorée (fig. 8). Un tel complexe ne peut plus se plisser par compression; dès lors, pour y faire apparaître des plissements, GRIGGS à l'aide d'un artifice spécial, comprenant deux cylindres horizontaux baignant dans la glycérine et tournant en sens inverse, réalise de pseudo-courants de convection (image des courants magmatiques de l'écorce) qui entraînent en profondeur et déforment les couches superficielles et dans un ordre qui est celui que nous avons décrit plus haut. En effet, dès que les cylindres commencent à tourner, mais lentement, une dépression apparaît dans l'huile lourde entre les deux cylindres, amorce de nos géosynclinaux. Mais à une vitesse plus grande des cylindres, l'écorce superficielle se plisse et s'enfoncé, comme par un phénomène de « suction », dans la glycérine. Puis, quand les cylindres ralentissent leur mouvement, ou même

---

Ph. H. KUENEN, avaient entrepris à l'aide de matériaux très visqueux (argiles pâteuses, lames de vaseline, paraffine et huile flottant sur de l'eau), des expériences qui tendaient à se rapprocher de la réalité (Leidsche Geologische Mededeelingen, VI, 1937, Leiden, p. 169).

<sup>33</sup> Cf. M. GIGNOUX, Modèles réduits et plissements de l'écorce terrestre (*Bull. mens. Soc. Scient. Dauphiné*, n° 4, avr. 1948, t. 64); KING HUBBERT, Strength of the Earth (*Bull. Amer. Ass. Petr. Geol.*, 29, n° 11, nov. 1945).

<sup>34</sup> Notons dès maintenant que de tels corps incapables de transmettre des poussées, ne peuvent pas être plissés par compression et s'écouleront sous l'influence de la seule gravité, conclusion importante que nous utiliserons plus loin pour expliquer certains plissements et nappes de charriage de nos Alpes.

s'arrêtent, la partie de la croûte qui avait été aspirée en profondeur commence à remonter, obéissant à l'équilibre isostatique (ou hydrostatique), et surgit enfin en donnant une intumescence allongée, image d'une chaîne de montagne dont les versants ne tardent pas à s'écouler par gravité (terme ultime de la genèse d'une chaîne mon-

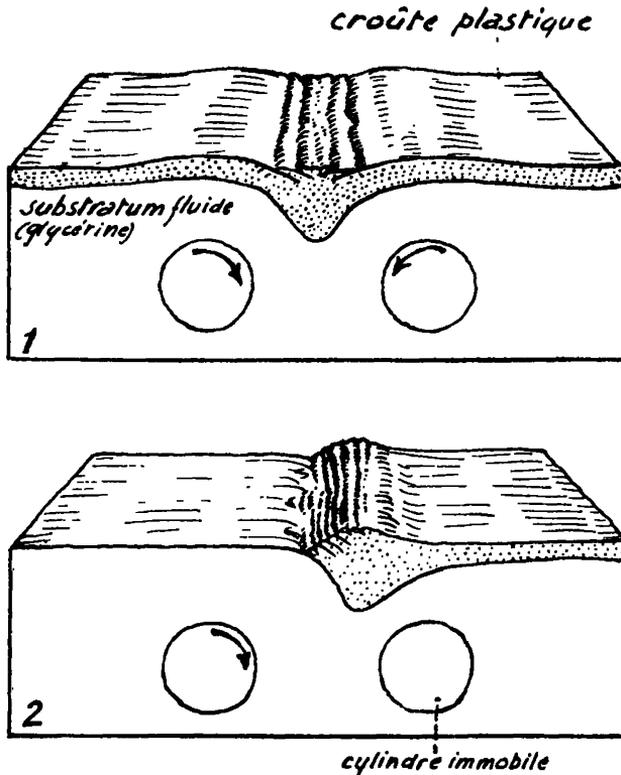


Fig. 8. — Expériences de Griggs, montrant comment peuvent agir les courants sous-crustaux. En 1, formation d'une chaîne symétrique. En 2, formation d'une chaîne dissymétrique.

tagneuse, comme nous le verrons), donnant les plis les plus externes, plus ou moins recouvrants et charriés.

#### Cas particulier : genèse des chaînes dissymétriques des bordures continentales.

Nous avons ici en vue les chaînes circumpacifiques qui surplombent des fosses dont tous les plis sont déversés vers l'Océan et qui sont également doublés au large, par une zone étendue d'anomalies

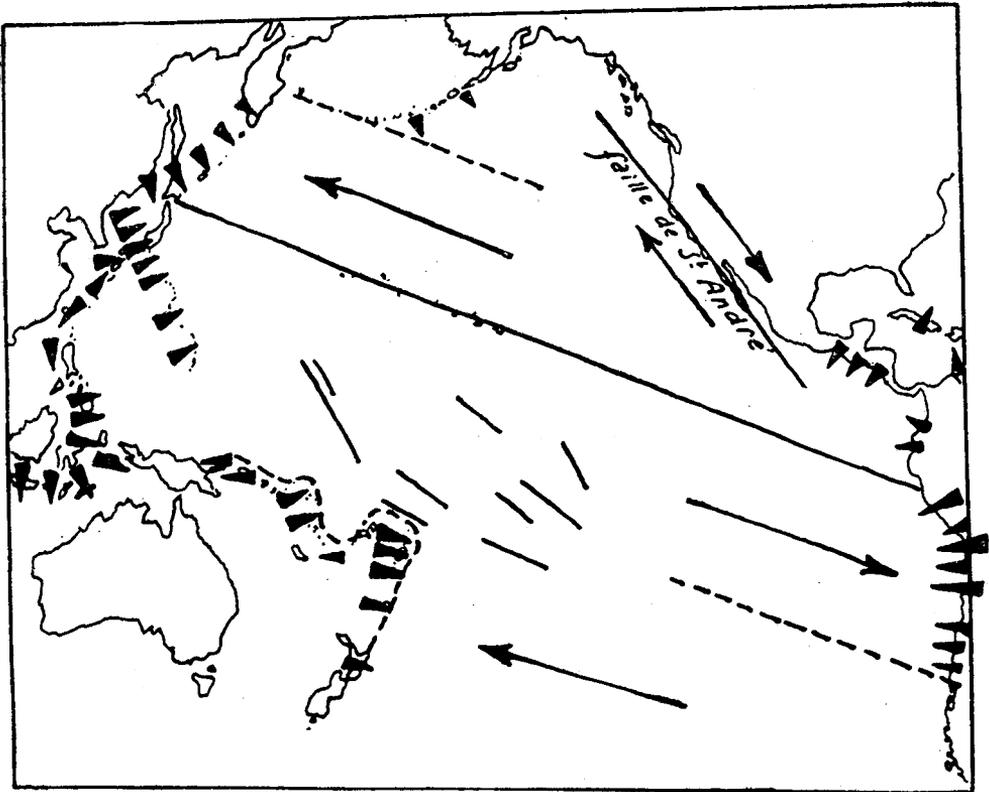


Fig. 9. — Les centres séismiques autour du Pacifique, d'après R. Schwinner. Les petits triangles noirs sont orientés de telle façon que leurs bases indiquent la localisation des foyers des chocs profonds et les sommets aigus l'emplacement de groupes d'épicentres de séismes normaux. Les grandes failles radiales (décrochements) suivant lesquelles sont dirigés les actuels mouvements des compartiments de l'écorce terrestre sont également indiquées.

négatives. Une telle structure porte évidemment à penser que l'Amérique et l'Asie ont pu dériver l'une vers l'autre, comme deux radeaux de Sial se rapprochant du Pacifique central, en créant des bourrelets marginaux plissés, nos chaînes liminaires (TAYLOR).

L'étude de la répartition des centres séismiques autour du Pacifique et de leur propagation a permis à SCHWINNER, dès 1941<sup>35</sup>, de

<sup>35</sup> R. SCHWINNER, Seismik und tektonische Geologie der Jetztzeit (*Zeitschrift für Geophysik*, t. 17, p. 103, 1941-42).

confirmer cette dissymétrie. De fait, les épicentres des séismes normaux peu profonds (0 à 60 km.) sont situés dans les fosses qui longent les cordillères côtières américaines et les arcs insulaires de l'Extrême-Orient (fig. 9).

Et c'est également dans les zones d'anomalies négatives qui ceinturent l'arc indonésien que se montrent de tels épicentres.

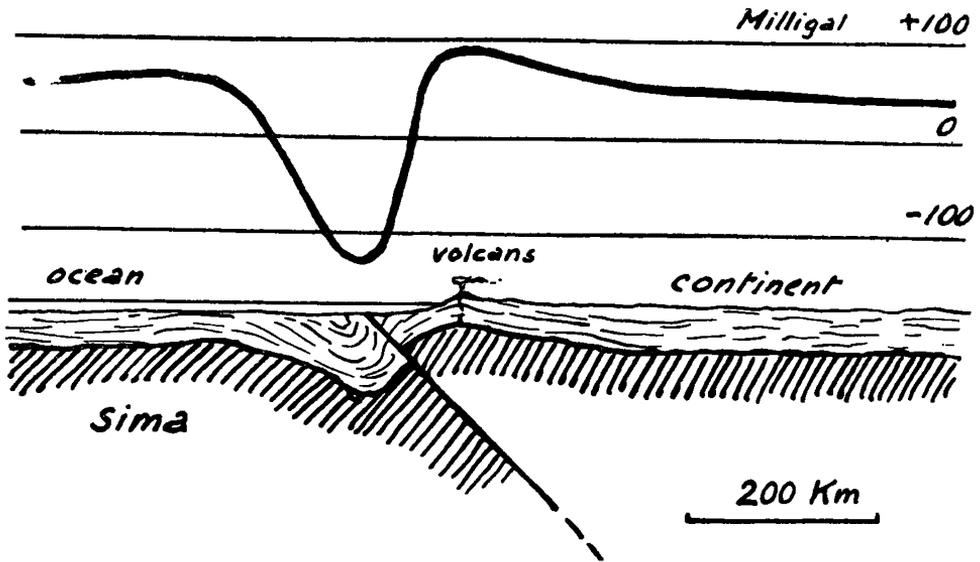


Fig. 10. — Une côte du type Pacifique, schématisée par Schwinner.

Par contre, les chocs intermédiaires et profonds (60 à 250 km. et 250 à 720 km.), sont répartis à l'intérieur des continents et des arcs insulaires; on peut même dire qu'ils sont d'autant plus continentaux qu'ils sont plus profonds. D'où l'idée de SCHWINNER que le lieu de ces épicentres est une vaste surface plane, inclinée à 35-45°, sorte de faille plongeante vers l'intérieur des terres et bordant les continents et les arcs insulaires vers l'extérieur (fig. 10). Mais il est évidemment bien difficile de dire si, le long de cet accident, c'est le continent qui est refoulé sur le socle océanique ou, au contraire, ce socle qui s'enfonce sous le domaine continental. De toute façon,

c'est certainement l'entrée en jeu de tels accidents, véritables failles vivantes, qui est responsable des tremblements de terre et du volcanisme du cercle Pacifique. D'autres accidents radiaux (décrochements) s'y associent, et déterminent dans l'écorce un certain nombre de compartiments plus ou moins mobiles. L'un de ces décrochements est tristement célèbre, c'est la faille de Saint-André, parallèle à la côte californienne, et dont le jeu périodique détermine les terribles tremblements de terre qui agitent cette région.

GRIGGS, au cours de ses expériences sur modèle réduit, citées plus haut, a pu reconstituer la structure de ces chaînes dissymétriques (fig. 8, 2).

Il semble donc prouvé que les grandes failles bordières du Pacifique ne sont pas des accidents superficiels comme on le croyait, mais au contraire des accidents importants pénétrant très profondément dans le sima plastique (jusqu'à plus de 700 km. pour quelques géophysiciens) qui, grâce à sa viscosité élevée, peut donc se rompre sous un effort puissant (tandis que les faibles contraintes continues ne font que le plisser).

Les zones liminaires où les socles sialiques des continents abordent le sima sous-océanique suivant une surface oblique sont de toute évidence, comme l'admet L. GLANGEAUD<sup>36</sup>, des zones dynamosensibles. Les diffusions et déplacements de matière doivent s'y accompagner d'augmentation des pressions, donc des variations de la viscosité et de déformations (état de désordre de la matière). C'est ainsi que commencerait la phase paroxysmale du cycle orogénique et la montée des magmas, basiques d'abord, puis enfin acides et granitiques déterminant pour ce dernier un véritable « diapyrisme plutonique » (fig. 11).

Ainsi amorcé très anciennement (Jurassique ou Crétacé), le phénomène orogénique va aller en s'accroissant, et cela, non seulement pour les cordillères des côtes américaines, mais aussi probablement pour les côtes japonaises, et nous savons qu'il se continue sous nos yeux en Californie.

Dans certaines régions, en Chine notamment, les failles-flexures granitisées signalées par P. TEILHARD DE CHARDIN, d'âge permien et

---

<sup>36</sup> Loc. cit., p. 1117 et suivantes.

jurassique, ne sont sans doute que la conséquence d'une telle « palingénèse » profonde. Enfin, la crête sialique médiane de l'Atlantique dont nous avons déjà parlé, qui vient affronter le sima du fond de la cuvette atlantique occidentale, semble bien, pour J. P. H. ROTHE, se trouver dans la situation d'une chaîne liminaire du type pacifique en gestation.

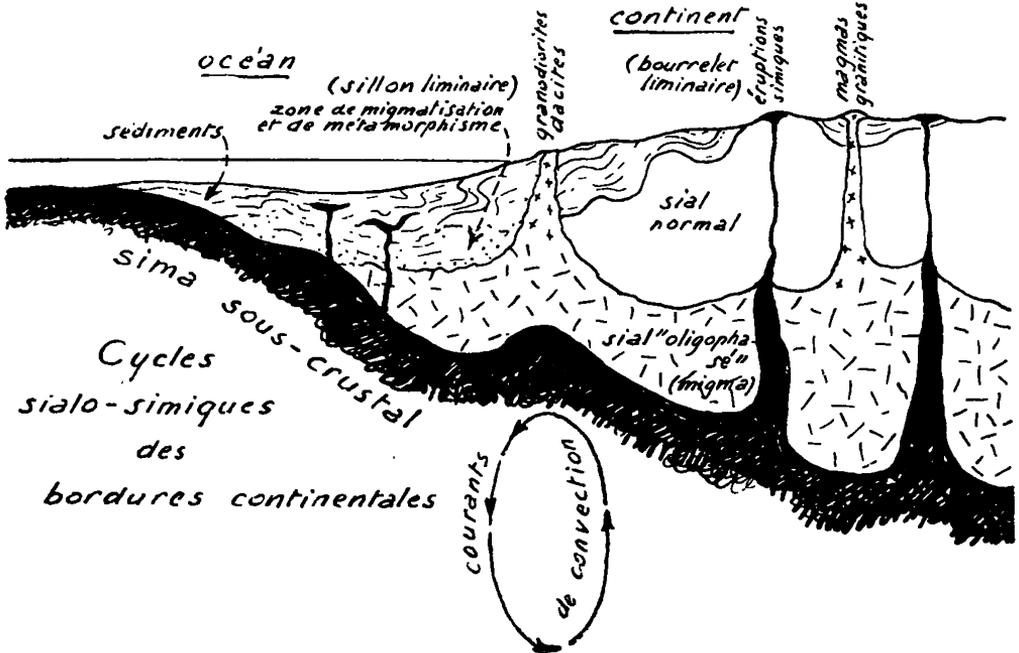


Fig. 11. — Structure des bordures continentales, d'après L. Glangeaud.

Dans d'autres régions, correspondant au domaine de plissement de la Mésogée, de tels phénomènes ont dû exister (par exemple aux Antilles et dans l'Afrique du Nord où l'Atlas littoral algérien aurait, d'après GLANGEAUD, joué le rôle de bourrelet frontal liminaire), mais le plus souvent ils ont été masqués par d'autres phénomènes orogéniques plus puissants, de sorte que ces régions se présentent actuellement à nous comme un palimpseste plus difficile à déchiffrer.

#### La théorie de l'écoulement des masses par gravité.

Les idées nouvelles que nous venons d'exposer permettent de comprendre comment une zone montagneuse de style alpin, étendue et de direction plus ou moins sinieuse, peut prendre naissance à la

surface du globe terrestre, d'abord par une sorte de phénomène de succion (intervention des courants sous-crustaux de convection) accompagné de compressions et de plissements, puis consécutivement par élévation générale d'un gigantesque bourrelet plissé (intervention de l'isostasie rétablissant l'équilibre hydrostatique, ou du foisonnement granitique accompagné de palingénèse), la géotumeur de E. HAARMANN.

Cette intumescence complexe ainsi en place, est-il permis d'affirmer que les phénomènes de plissements sont terminés ? L'étude de certaines régions montagneuses, en particulier les Alpes françaises, porte les géologues à penser qu'il n'en est rien et que des plissements et même des plis couchés à long cheminement (nappes de charriage) ont continué de se former sur les flancs surélevés de notre géotumeur, et cela par simple écoulement des masses par gravité.

Cette hypothèse, invoquée par le géologue suisse Hans SCHARDT, dès 1893, pour expliquer les plis du Jura, jouit actuellement d'un grand regain d'intérêt depuis les travaux des géologues grenoblois sur les régions classiques des recouvrements de l'Embrunais-Ubaye.

Mais elle avait déjà été reprise en 1930 par le géologue E. HAARMANN<sup>37</sup> qui, sur des bases purement spéculatives, avait à l'époque édifié sur le sujet une véritable théorie orogénique explicative de tous les phénomènes tectoniques. Pour HAARMANN, en effet, le point de départ d'une région montagneuse est la formation, grâce à d'hypothétiques courants magmatiques ascendants orientés (orogènes), d'une immense intumescence (sa géotumeur). C'est là le point important de sa théorie, ce qu'il appelle la « tectonique primaire » car, sur les flancs de sa géotumeur, clivés et décollés, les sédiments en glissant par gravité vont se froisser pour donner lieu aux manifestations banales de plissements que présentent les couches superficielles de l'écorce. Cette « tectonique secondaire », celle qu'observent et que cherchent à expliquer les géologues, est donc le fait de la seule gravité.

Mais cette théorie, intéressante, puisque pour la première fois la tectonique d'écoulement par gravité venait heureusement complé-

---

<sup>37</sup> Die Oszillations-Theorie; eine Erklärung der Krusten Oberwegung von Erde und Mond. (F. ENKE, Stuttgart, 1930). Sur l'écoulement des masses par gravité, voir les lumineuses publications de M. GIGNOUX. Quelques réflexions sur des théories tectoniques récentes (*Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble*, t. 23, 1942); Méditations sur la tectonique d'écoulement par gravité (*ibid.*, t. 27, 1950); La tectonique d'écoulement par gravité et la structure des Alpes (*Bull. Soc. Géol. France* (t. XVIII, 1948, p. 739).

ter celle des courants magmatiques profonds de KRAUSS, ne trouva pas dans les milieux géologiques de l'époque, et malgré les efforts et la conviction de son auteur, un accueil encourageant; il faut dire que les explications et les conséquences qu'il en tirait n'étaient point faites pour convaincre ses nombreux contradicteurs.

L'idée devait être reprise, car elle était bonne, mais demandait à être étayée et présentée avec des arguments géologiques différents et précis. Ce fut l'œuvre des géologues alpins de Grenoble et en particulier de D. SCHNEEGANS et de M. GIGNOUX et de quelques géologues étrangers parmi lesquels il faut citer surtout L. TREVISAN (Pise), puis M. LUGEON et le regretté E. GAGNEBIN (Lausanne).

Les nombreux articles consacrés à l'écoulement des masses par gravité par M. GIGNOUX nous éviteront d'entrer ici dans de longs exposés, et nous ne retiendrons que l'essentiel de la théorie.

Et tout d'abord, l'observation géologique prouve que toutes les roches, même les plus dures, comme les schistes cristallins, les quartzites, les calcaires, peuvent se ployer en replis parfois très compliqués. Nous connaissons également nombre de roches dites « laminées », renfermant des fossiles déformés (Bélemnites tronçonnées, Ammonites étirées), état de choses qui se traduit même à l'échelle microscopique par un alignement des éléments clastiques ou cristallins et témoigne d'un écoulement du type laminaire. Mais ce ne sont point là des preuves décisives en faveur d'un écoulement dû à la seule pesanteur, car des phénomènes de compression d'origine diverse peuvent bien produire de telles déformations.

Toutefois, on peut remarquer, et certains esprits avisés y avaient depuis longtemps pensé, qu'il est difficile de faire intervenir la compression latérale, les mouvements tangentiels invoqués par la géologie classique depuis WEGENER et ARGAND, pour expliquer les plis à long cheminement et les nappes de charriage. En effet, même si l'on admet que ces nappes sont issues de la zone du Briançonnais (et la chose paraît certaine pour la région des recouvrements de Flysch de l'Embrunais-Ubaye, et est de plus en plus acceptée pour les Préalpes médianes du Chablais et de la Suisse), la distance à parcourir par de tels objets, épais de 1.000 mètres au grand maximum, serait au moins de 50 km. Comment, dans de telles conditions, expliquer la transmission des pressions dans ces nappes pelliculaires ? Lorsque je dus en 1936 établir les maquettes successives de mon Film du Palais de la Découverte, il me fut donné de constater l'impossibilité dans laquelle je me trouvais d'enraciner, suivant la thèse argandienne, ces nappes dans la zone d'Ivrée. Tout

au plus fut-il possible de les faire glisser de la zone de bordure occidentale briançonnaise, sur le versant Ouest du bourrelet alpin.

Il est vrai que depuis quelques années, et surtout depuis les belles observations de D. SCHNEEGANS dans le Gapençais et l'Embrunais, nous avons acquis la certitude que les énormes massifs de Flysch à Helminthoïdes si curieusement contournés, mais sans la moindre trace de laminage ou de mouvements différentiels, qui forment les deux rives de la Durance entre Saint-Clément et Savines et recouvrent les terres noires autochtones, avaient acquis leur situation actuelle par suite d'un simple écoulement dû à la pesanteur. Et, comme l'écrit M. GIGNOUX, « même en admettant qu'à l'origine de son écoulement il y ait eu, dans la zone du Briançonnais, une sorte d'étau, agissant comme le fait la pression des doigts sur un tube de pâte dentifrice, il est bien certain que, sortie de ce « tube », la pâte qu'était le Flysch a débordé vers l'Ouest en une coulée « turbulente » pour laquelle nous ne voyons guère d'autre moteur possible que la gravité ».

Ajoutons cependant que, si dans la masse de ce Flysch, nous ne voyons pas de traces de mouvements différentiels (laminages, décollements, etc.), il est toutefois nécessaire, pour expliquer le déplacement en masse de ce terrain briançonnais, de supposer d'importants clivages suivis de décollements de couches et cela au niveau d'horizons particulièrement plastiques de la base de l'ensemble. Le rôle des décollements prend donc ici une très grande importance et, en ce qui concerne nos Alpes, un terrain s'y prête tout particulièrement, grâce à la présence de niveaux lagunaires surtout gypseux : c'est le Trias. Ceci explique que la surface anormale des grands charriages soit presque toujours soulignée par des coussinets de ce terrain et spécialement de gypses et de cargneules, dont on connaît la grande propension au diapyrisme<sup>38</sup>.

Nous comprenons maintenant comment des paquets de couches appliquées sur les versants inclinés d'une intumescence montagnaise puissent, en se clivant au niveau de leur base, glisser et se plisser comme le ferait un quelconque corps plastique, du goudron par exemple (fig. 12). Pour bien saisir ce qui se passe, il faut se

---

<sup>38</sup> Sur cette question, voir surtout M. GIGNOUX, La tectonique des terrains salifères; son rôle dans les Alpes françaises (*Livre jub. Soc. Géol. France*, t. 2, Paris, 1930), et M. GIGNOUX et L. MORET, Description géologique du bassin supérieur de la Durance (*Trav. Lab. Université de Grenoble*, t. 23, 1942), et *Géologie dauphinoise* (Arthaud, Paris-Grenoble, 1943). Mais de tels accidents peuvent être également dus à la présence d'horizons marneux (ex., schistes du Lias, marnes callovo-oxfordiennes).

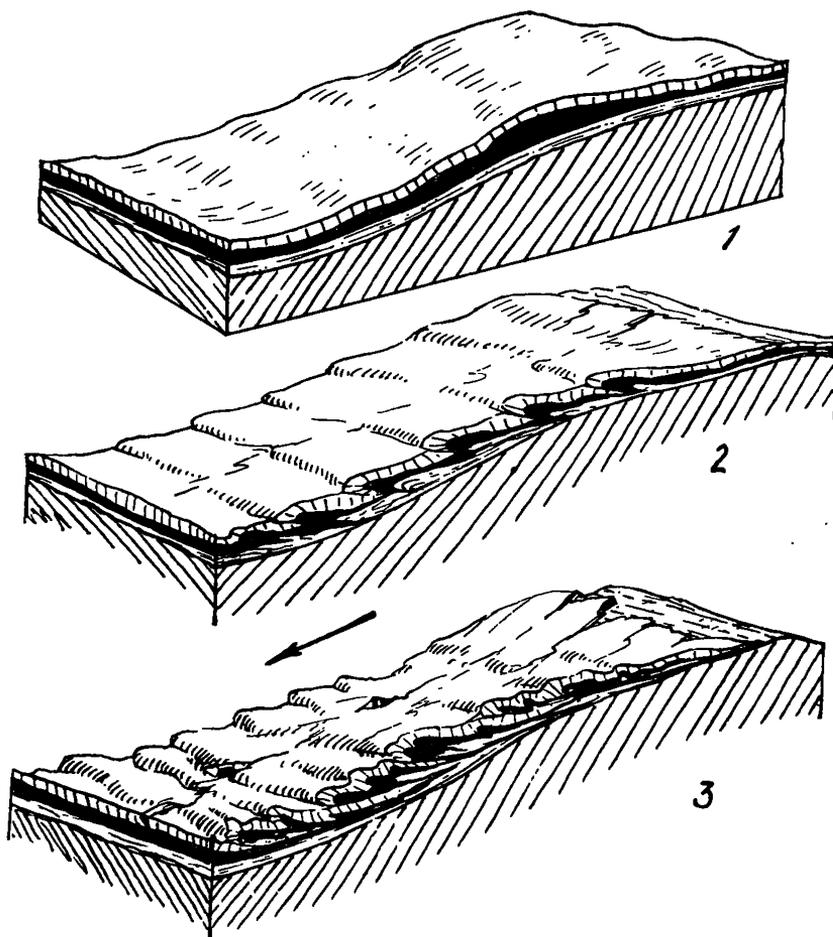


Fig. 12. — Schémas destinés à faire comprendre le mécanisme de la tectonique d'écoulement par gravité sur les versants d'une jeune chaîne. En noir, horizon plastique ou salifère au niveau duquel se produit le clivage des couches, provoquant la formation de vagues solides (plis), leur accumulation vers l'extérieur de la chaîne, la dénudation des parties hautes.

rappeler que la différence entre un solide et un liquide dans cette situation n'est qu'une question de temps et de force <sup>39</sup>.

Une comparaison heureuse peut être faite avec la glace d'un glacier qui, bien que d'apparence solide et stable, s'écoule insensiblement sur une pente souvent faible. Si cette glace s'écoule en masse en se plissant comme le ferait une pâte plastique (écoulement par gravité) elle peut aussi, par suite de mouvements différentiels, se cliver en de nombreuses tranches (écoulement laminaire saccadé, tectonique de choc) qui donnent à la glace de certains glaciers (ex. : Glacier de la Brenva, près Courmayeur) cet aspect rubané si caractéristique et qui ne doit pas d'ailleurs être confondu avec la stratification des névés de la zone d'alimentation soulignée par des impuretés minérales. Et cependant la surface du glacier n'est point plane, mais burinée par l'érosion, surtout les eaux de fonte, et peut se fissurer sous l'action des irrégularités du lit rocheux. Or, cette érosion multiforme est infiniment plus rapide que la vitesse d'écoulement de la glace; et cette remarque permet de répondre à une objection qui a été souvent faite aux tenants de la tectonique d'écoulement par gravité des roches, à savoir que, si vraiment un tel phénomène pouvait se produire, toutes les dépressions superficielles seraient comblées et les vallées ne pourraient pas exister, au moins en région montagneuse. On voit que cette objection n'a plus maintenant aucune valeur.

En résumé, l'hypothèse de l'écoulement des masses par gravité peut parfaitement expliquer les plis superficiels (plis épidermiques) comme ceux des chaînes subalpines, de même que certaines nappes de charriage (nappes helvétiques, Préalpes, Flysch à Helminthoïdes de l'Embrunais, etc.).

Elle permet d'autre part d'esquiver le difficile problème de l'enracinement de ces nappes qui, inévitablement, doit se poser lorsqu'on invoque les mouvements tangentiels : avec la nouvelle tectonique, cette question ne se pose même pas puisque la couverture a glissé en bloc et qu'il n'y a pas de racines. Elle explique aussi ces immenses surfaces dénudées suivant lesquelles sont mis à nu nos massifs cristallins externes, et que l'on mettait sur le compte de l'érosion (fig. 12). Il s'agit ici de déchirures agrandies par le glissement infiniment lent de l'une des lèvres et l'intervention de l'érosion devient secondaire : ainsi pourrait-on expliquer le long sillon alpin (Grésivaudan-Combe de Savoie), dominé par le bord

---

<sup>39</sup> Et surtout n'oublions pas que, pour le tectonicien, l'unité de temps est le million d'années.

subalpin, qui limite vers l'extérieur notre massif cristallin de Belle-donne (fig. 13).

Il est juste de reconnaître que l'intervention de la seule tectonique d'écoulement par gravité devient plus difficile à appliquer au fur et à mesure que l'on s'avance dans une région plus interne de nos Alpes. En effet, l'écaillage des massifs cristallins et la présence de tels coins cristallins laminés et morcelés pénétrant parfois très avant dans la couverture sédimentaire, montre indubitablement la mise en jeu d'autres forces s'exerçant aux dépens de matériaux rigides.

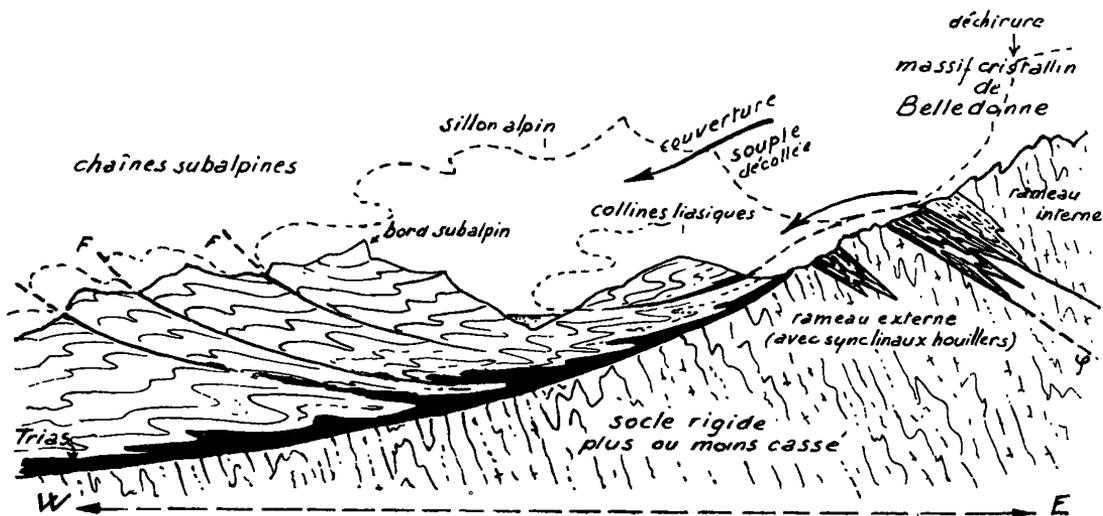


Fig. 13. — Formation des chaînes subalpines (ici Chartreuse) dans l'hypothèse de l'écoulement des masses par gravité, suivie de la dénudation du massif cristallin. Le sillon subalpin est alors une déchirure agrandie.

Et c'est pourquoi beaucoup de géologues, tout en acceptant d'enthousiasme les données de la tectonique nouvelle, n'en restent pas moins attachés aux idées argandiennes de « vieux matériel » et d'étau dont les « serres », mises en mouvement par des forces tangentielles, l'isostasie ou le foisonnement granitique, auraient fait jaillir la pâte sédimentaire du fond du géosynclinal alpin.

D'autres géologues, par contre, restent logiques avec eux-mêmes et vont jusqu'au bout des conséquences de la théorie; M. GIGNOUX, en particulier, admet que ces vieilles roches dures du tréfonds peuvent aussi couler, non seulement en surface, mais encore dans la pro-

fondeur. Dès lors, la distinction entre magma liquide et écorce solide s'efface et nous arrivons à une théorie de l'*écoulement généralisé* devant laquelle commence à vaciller l'esprit du géologue de terrain.

Il est évident que, si l'on admet que toutes les roches, même les plus dures, peuvent s'écouler en surface à une échelle de temps où le million d'années serait l'unité, il est inadmissible de ne pas supposer que le phénomène puisse également se produire en profondeur, de sorte que le tréfonds de la croûte sialique doit, ainsi que vient de l'affirmer M. GIGNOUX, pouvoir couler comme cette écorce elle-même. Mais nous avons déjà longuement insisté sur l'état de désordre moléculaire dans lequel devait se trouver, d'après L. GLANGEAUD, la base de la croûte sialique, état « dynamomorphe » essentiellement propice aux diffusions et à un état de viscosité permanente, de telle sorte qu'il peut exister, dans ces parties profondes, un passage insensible de la croûte au sima. Or, à fortiori, un tel état de la matière minérale doit-il se présenter dans les zones de succion et les boucles sialiques synclinales génératrices des chaînes de montagnes et du métamorphisme ? L'observation montre qu'il en est bien ainsi car, dans nos zones axiales du géosynclinal alpin (zone des bouillonnements penniques) nous voyons des roches silicatées aussi dures que des gneiss ou des micaschistes, ployées en boucles anticlinales compliquées au sein de la masse synclinale des schistes lustrés qui, elle-même, épouse tous ces replis. Toutefois, près de la surface, nous savons tous que la croûte sialique conserve une certaine rigidité : sa vitesse d'écoulement est si lente, comparée à celle de la couverture souple, qu'elle peut pratiquement être considérée comme nulle, donc comme un matériau rigide. Et il y a lieu pour ces zones superficielles dans lesquelles s'exerce la recherche géologique, de conserver la distinction d'ARGAND, entre le vieux matériel, déjà plissé, cassant, et impropre à subir un nouveau plissement, et le matériel neuf, plus malléable. C'est parce qu'elle était en grande partie un matériel neuf que la zone pennique a pu être si régulièrement plissée. C'est parce qu'il est un matériel vieux que le Cristallin des massifs hercyniens externes s'est cassé en coins ou en esquilles qui s'insinuent dans les replis de la couverture sédimentaire.

En résumé, la tectonique d'écoulement se présente à l'heure actuelle comme un des facteurs essentiels et presque unanimement reconnus de la formation de certains plissements montagneux. Mais dans l'ensemble d'une grande chaîne de type alpin, elle ne peut expliquer que les détails de structure (et non des moindres d'ailleurs) puisqu'elle n'intervient que sur les versants de l'énorme intumes-

cence dressée, elle, par le jeu de forces qui, jusqu'à nouvel ordre, semblent bien être de nature différente de celles de la simple gravité.

### Essai de chronologie tectonique d'une chaîne de montagne symétrique du type géosynclinal.

Cette chronologie va s'étendre sur une très grande durée, car si nous adoptons comme terme de comparaison l'histoire du géosynclinal alpin, la genèse d'une telle chaîne doit être excessivement longue et pourra atteindre entre 150 et 200 millions d'années (début du Lias, jusqu'à l'époque actuelle). En voici les principaux stades (fig. 14) :

1. *Naissance des pressions* le long d'une zone de résistance crustale faible et sous l'action des courants de convection.

2. *Fléchissement de la croûte* suivant cette zone et individualisation d'un géosynclinal allongé. Arrivée de la mer (transgression), entrée en jeu des phénomènes de sédimentation. Dans ce géosynclinal, des venues magmatiques simiques donnent lieu à des filons-couches (sills) ou même à des îles volcaniques à laves basiques (fig. 14-1).

3. *Formation d'une boucle géosynclinale* par accentuation de la dépression et rapprochement de ses bords. Début des phénomènes de plissements qui peuvent d'abord se manifester par une ou plusieurs cordillères.

Les distensions corrélatives qui se produisent alors sur les aires continentales situées de part et d'autre du géosynclinal en voie d'écrasement y favorisent le volcanisme, généralement basique.

4. *Phase paroxysmale*, due à l'augmentation des pressions et à l'accroissement de vitesse des bords de la boucle géosynclinale qui finissent par s'affronter plus ou moins complètement, en accentuant vers le haut le plissement des sédiments y contenus d'une part, d'autre part en déterminant vers le bas la plongée de la boucle sialique dans le sima (les anomalies négatives de l'isostasie sont alors maxima) (fig. 14, 2). A ce stade du synclinal de sial, dans le sima vitreux, doit se produire une fusion plus ou moins totale du sial d'où l'accroissement de l'affaissement de la boucle et la formation d'un magma granitique (magma palingénétique) dont la montée peut, dans certains cas, et par le mécanisme des granites d'anatexie et de migmatitisation, favoriser la surrection de l'ensemble des masses sédimentaires su-

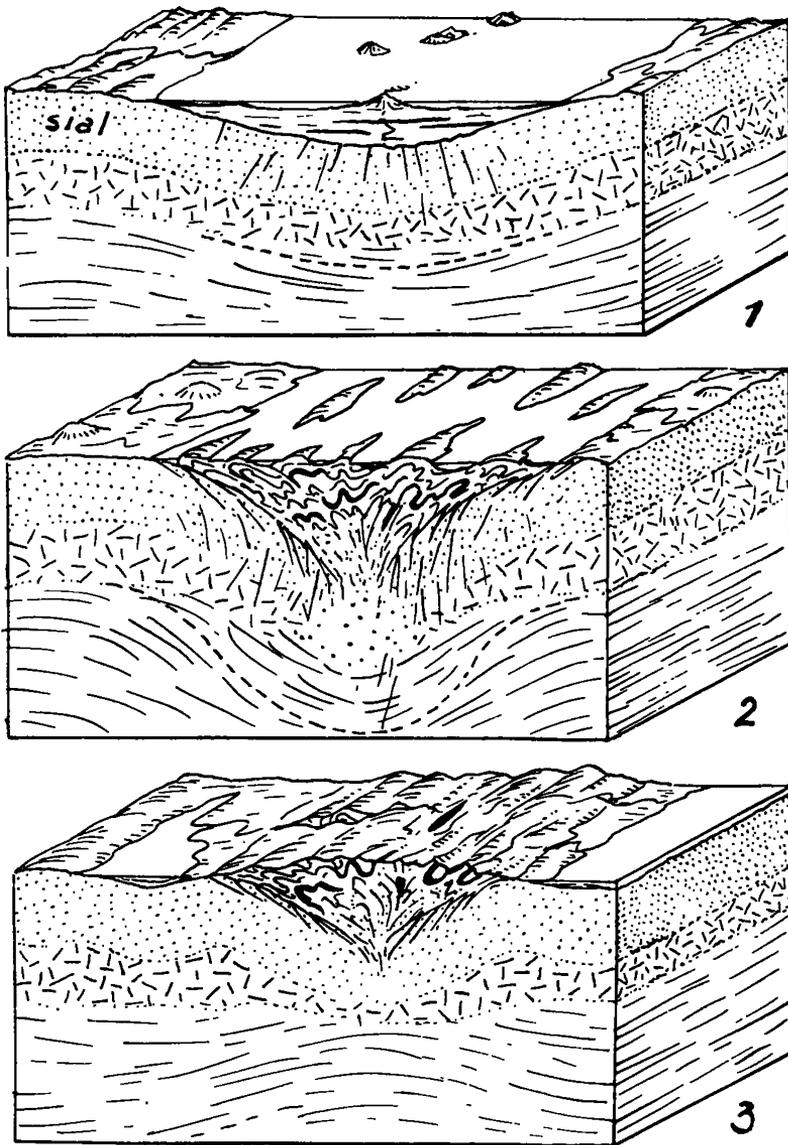


Fig. 14. — Trois stades de la formation d'une chaîne de montagne symétrique (d'après Umbgrove). 1, fléchissement de la croûte et formation d'un géosynclinal (en noir, venues simiques). 2, formation de la boucle et plongée de la croûte sialique dans le sima; début du plissement (cordillères) et fusion des parties profondes. 3, montée des magmas palingénétiques et cicatrisation de la croûte profonde; la chaîne est formée et la mer est refoulée dans des sillons latéraux. Ces schémas illustrent la théorie de Daly.

perficielles plissées dans lesquelles prennent alors naissance les grandes fractures plates disposées en éventail plus ou moins symétrique. La mer est refoulée (régression) dans des sillons latéraux.

5. *La croûte profonde commence à se reformer* par cicatrisation de la zone de *succion* originelle (fig. 14-3).

L'intumescence montagnaise (géotumeur) est en place et, sur ses deux versants, commence à intervenir *la tectonique d'écoulement par gravité* qui détermine les zones plissées bordières et les systèmes de plis-couchés et de nappes de charriage.

L'érosion qui est entrée en jeu dès que les cordillères et les chaînes montagneuses ont émergé, burine ces massifs et en accumule sans arrêt les débris dans les fosses latérales. A peine née, la chaîne de montagne est donc la proie de multiples agents de destruction.

6. *Ultimes soubresauts.* — Les fosses latérales se vident, la chaîne avec ses plis pressés, verticaux, et souvent disposés en éventail dans la zone axiale, plus réguliers et déversés symétriquement sur ses bords, est cette fois bien individualisée. Par suite de la diminution des pressions due à un ralentissement ou d'un arrêt des courants de convection, la compensation isostatique, qui obéit au principe d'Archimède, va commencer à jouer. L'équilibre isostatique va donc se rétablir progressivement, souvent irrégulièrement, et *en accentuant* l'élévation de certains compartiments longitudinaux. Mais, soulignant l'origine de la chaîne, vont y subsister encore longtemps des traces de déficit gravitationnel, et cela jusqu'à ce qu'à la suite du lent travail de l'érosion atteignant enfin la pénélplanation totale, l'équilibre isostatique soit de nouveau acquis.

#### Application à la chaîne alpine.

C'est là un sujet qui commence à préoccuper les spécialistes de l'histoire de la Terre et il est indispensable que les géologues alpins en particulier fassent oraison sur les conditions d'un problème qui se pose inéluctablement à un moment donné de leurs travaux <sup>40</sup>.

Mais ils ne pourront édifier une synthèse solide sans la collabo-

---

<sup>40</sup> La chose a d'ailleurs été tentée récemment, pour les Alpes occidentales, par J. H. F. UMBROVE, *The root of the Alps* (*Konink. Nederlands Akad. van Wetenschappen*, vol. LI, n° 7, 1948), et par M. GIGNOUX, *La tectonique d'écoulement par gravité et la structure des Alpes* (*Bull. Soc. Géol. France*, 5<sup>e</sup> série, t. XVIII, 1948, p. 739). Il ne sera donc pas spécialement question ici des Alpes orientales.

ration des géophysiciens dont ils sont tenus de contrôler et d'interpréter les découvertes. Or, nous avons vu, dans l'exposé qui vient d'en être fait, que l'apport des sciences géophysiques est ici capital et qu'il est venu très heureusement compléter l'aspect cinématique du problème auquel les recherches géologiques ont si largement contribué, en permettant d'envisager ce même problème sous l'angle dynamique et même expérimental.

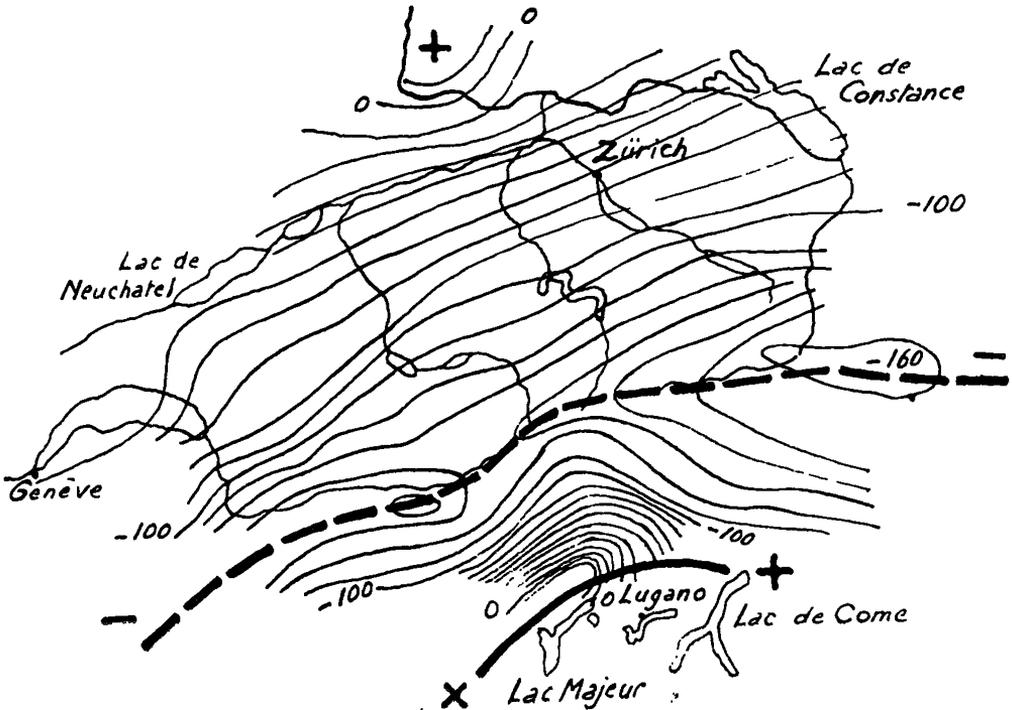


Fig. 15. — Carte des anomalies de Bouguer en Suisse (d'après Niethammer).

Les mesures des anomalies de la gravité et du magnétisme ainsi que l'étude de la propagation des séismes dans la chaîne alpine prouvent que les Alpes ont dû présenter à un moment de leur histoire géologique, un aspect analogue à celui qui se manifeste actuellement dans les Indes néerlandaises, dont les guirlandes insulaires ne sont d'ailleurs pas sans rappeler le trajet sinueux de la chaîne alpine (fig. 21).

En ce qui concerne la gravimétrie de la chaîne, les cartes qui ont déjà pu être établies des diverses anomalies y montrent en

effet une longue bande d'anomalies négatives encadrée de bandes positives (fig. 15 et 16).

La chose a été bien établie pour les Alpes suisses et les calculs sont sur le point d'être achevés pour les Alpes françaises.

En Suisse, la zone de déficit de masse est répartie autour d'un axe minimum avec des valeurs de  $-150$  et  $-170$  unités suivant le tracé des hautes crêtes. En largeur, cette zone négative s'étend du

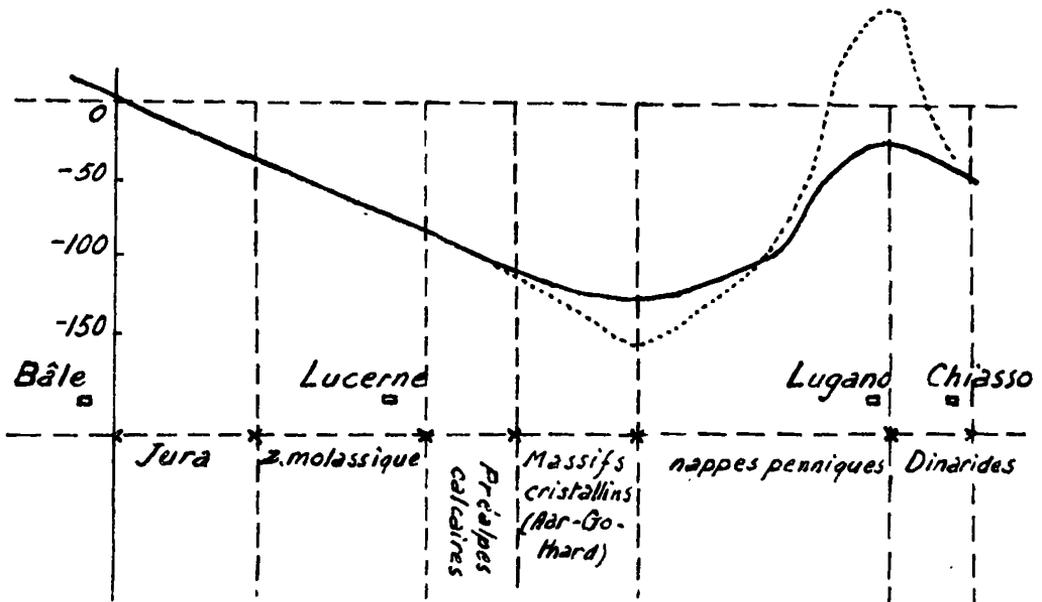


Fig. 16. — Courbe des anomalies de Bouguer emplacée sur une section des Alpes suisses (en pointillé, variations extrêmes de cette anomalie) (extrait de J. Jung, *loc. cit.*).

Jura au Piémont, mais au Sud et au droit des lacs Majeur et de Garde, apparaît une forte anomalie positive qui peut atteindre brusquement  $+50$ , puis va diminuant en direction de la plaine du Pô <sup>41</sup>.

<sup>41</sup> Nous utilisons surtout ici une suggestive étude de J. JUNG : La géologie profonde de la France d'après le nouveau réseau magnétique et les mesures de la pesanteur (*Annales Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris*, t. XI, 1933).

Pour les Alpes, cette étude est fondée sur les travaux, déjà anciens, de NIETHAMMER (*Die Schwerebestimmungen der Schweiz. Geodet. Kommission, Verh. Naturforsch. Gesellsch. Schaffhausen*, 1921) et de MESSERSCHMIDT. Grâce à une méthode nouvelle proposée par F. GASSMANN et D. PROSEN pour la dé-

En France, les quelques résultats gravimétriques que l'on possède déjà, portent à penser que, au moins jusqu'à la latitude de Grenoble, les Alpes françaises possèdent une structure analogue à celle des Alpes suisses, mais l'étude des anomalies magnétiques, due surtout à W. BRUCKMANN, permet d'y suivre, jusqu'à la mer, les zones identifiées en Suisse.

En effet, d'après J. JUNG, ces anomalies magnétiques, dont la base est fixée à —15 km. à cause de l'augmentation de température avec la profondeur, permettent de suivre en surface ces zones et de montrer leurs rapports avec la Géologie, tandis que la gravimétrie renseigne au contraire sur la nature des régions profondes non accessibles. Il faut reconnaître que, pour bien des régions, les résultats de la gravimétrie et du magnétisme sont concordants, et cela dans les zones penniques, mais surtout dans l'avant-pays (zones molassique et insubrienne).

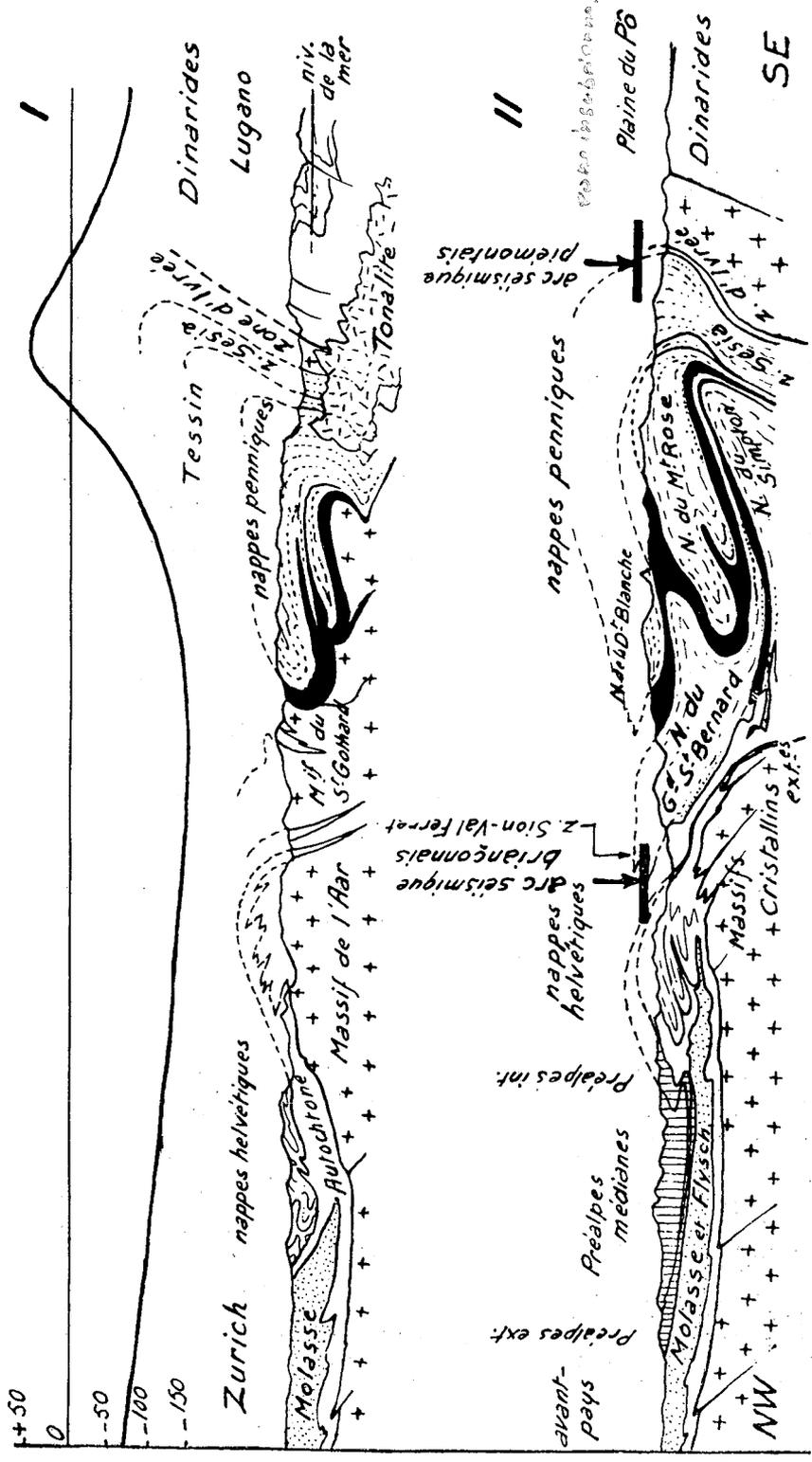
L'interprétation géologique des premiers résultats de ces études géophysiques ne tarda pas à être dégagée. KOSSMAT, dès 1920, remarqua en effet que l'axe des minima coïncidait avec le chevauchement pennique frontal (c'est-à-dire avec la zone Sion-Val Ferret, en France notre front subbriançonnais), tandis que la zone d'anomalie positive du Piémont correspondait à la zone dinarique et à la zone d'Ivrée (racines supposées des Préalpes médianes).

De son côté et la même année, Albert HEIM émit l'avis que l'anomalie négative alpine était probablement due au fait que les couches sédimentaires ou gneisso-granitiques devaient s'enfoncer en coin dans le magma basique.

Toutes les coupes transversales des Alpes, établies tant en Suisse qu'en France, montrent que l'axe pennique de la chaîne est en forme d'éventail <sup>42</sup>, laissant en effet supposer une zone de racine profonde

termination des anomalies de la gravité, E. NIGGLI a pu donner une interprétation géologique plus précise des résultats de ces travaux (Über den Zusammenhang zwischen der positiven Schwereanomalie am Südfuss der Westalpen und der Gesteinszone von Ivrea. *Eclogae geol. Helv.*, vol. 39, 1947).

<sup>42</sup> Mais l'accord n'est pas encore fait sur la vraie structure de cet éventail, dû aux replis de la portion dorsale d'une nappe (Grand Saint-Bernard) pour les uns (Argand, Termier, Staub), enraciné sur place pour les autres (W. Kilian, M. Gignoux). On admet, depuis Argand, que cette zone pennique est constituée par plusieurs énormes nappes empilées et refoulées vers l'extérieur de la chaîne : de bas en haut, nappes simploniques, nappe du Grand Saint-Bernard, nappe du Mont Rose, nappe de la Dent Blanche. Mais, on discute actuellement sur l'ordre et l'individualité de certaines de ces entités tectoniques : ainsi, la nappe du Mont Rose serait, pour P. Bearth, le noyau migmatique (anté-carbonifère) de la nappe du Saint-Bernard (enveloppe partiellement métamorphique permo-carbonifère de ce noyau).



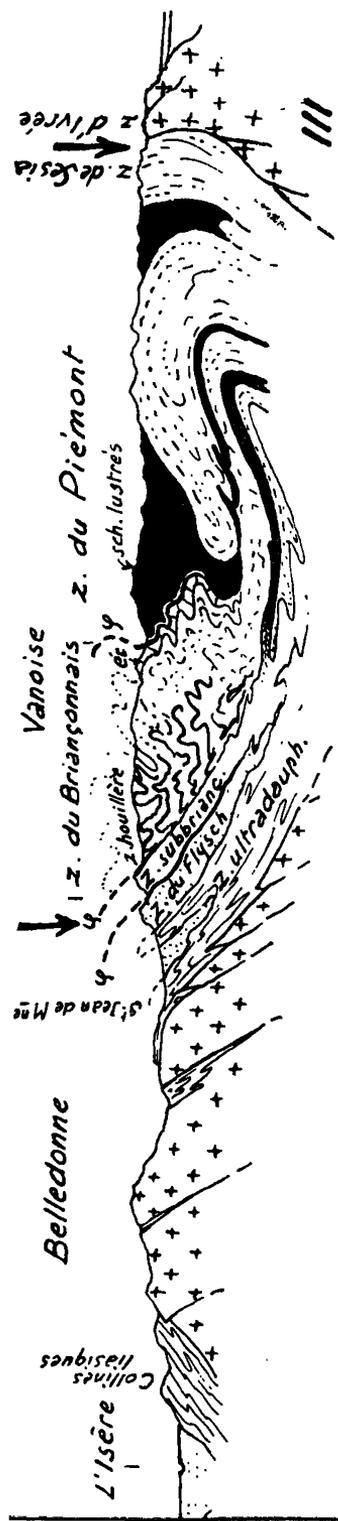


Fig. 17. — Trois coupes géologiques des Alpes: I, passant par le Saint-Gothard et montrant la variation correspondante de l'anomalie de Bouguer (J. Jung). — II, passant par Fribourg et le Mont Rose (Argand), montrant la position des arcs séismiques Briançonnais et piémontais (J. P. Rothé). — III, passant par la Vanoise avec indication du passage de ces deux arcs plus au Sud, dans les Alpes françaises. On a conservé dans ces figures, pour les nappes penniques, les rapports proposés par Argand. Rappelons en outre que pour ce géologue, les nappes préalpines (Préalpes médianes) sont issues de la zone d'Ivrée; ce n'est pas l'hypothèse adoptée ici où ces unités sont considérées comme originaires de la zone subbriançonnaise et du Briançonnais externe.

où les couches deviennent verticales et très pressées, et au-dessus de laquelle ces couches donnent au contraire l'impression de jaillir en gerbe; c'est également dans cette zone qu'apparaît le métamorphisme (massifs cristallins internes et schistes lustrés; injections récentes de roches granitoïdes du type tonalite) (fig. 17).

Les partisans des idées modernes peuvent évidemment interpréter une telle structure comme une zone de bouillonnement de plis (KRAUS) limitée par des surfaces listriques s'enfonçant très profondément dans l'écorce; autrement dit, les zones que nous prenions pour des racines de nappes deviennent maintenant les bords des zones de suction.

Précisément, l'étude de la propagation des séismes alpins montre que c'est sur les deux bords de cette zone radicale, tant à l'Ouest (chevauchement pennique en Suisse, chevauchement briançonnais en France) qu'à l'Est (zone d'Ivrée et bord alpino-dinarique), que viennent s'aligner les épïcêtres de ces phénomènes. J. P. ROTHÉ a nettement dégagé la situation et la signification de ces faits<sup>43</sup> en parlant, d'une part d'arc séismique briançonnais, d'autre part d'arc séismique piémontais (fig. 17, II et III; et fig. 18).

De ces épïcêtres, dus à des séismes profonds mais de faible intensité, se propagent des ondes de compression au départ, dénotant ainsi au foyer un mouvement de soulèvement « comme si une explosion était le moteur du mouvement orogénique »<sup>44</sup>. On peut en conclure que nos Alpes en sont encore à la phase de soulèvement de l'ensemble qui n'est donc pas encore terminé. Ces mouvements sont particulièrement actifs dans les Apennins, région qui se trouve être en effet la partie la plus jeune de la chaîne.

On voit donc que les résultats de la gravimétrie, du magnétisme et de la séismologie sont, dans l'ensemble, assez concordants, et que le point crucial mis ici en évidence est l'axe de l'anomalie négative de la zone pennique.

Mais tout cela, il faut bien le reconnaître, ne se trouve guère en accord avec l'hypothèse classique d'E. ARGAND sur la structure d'en-

<sup>43</sup> J. P. ROTHÉ, Quelques aspects de la structure terrestre éclairés par la Sismologie (*Rev. scient.*, 15 avril 1947, p. 407).

<sup>44</sup> Le mouvement est une sorte de glissement dû à des chocs successifs le long de grandes surfaces listriques s'enfonçant loin dans l'écorce. Cette tectonique de compression ou de chocs s'oppose donc à la tectonique d'écoulements superficiels non quantifiés. Dans ce dernier cas, les séismes sont superficiels, de grande intensité mais de faible extension (séismes de La Sône, du Tricastin, d'Aix, de la Provence, etc.) et marquent le front des écoulements subalpins.

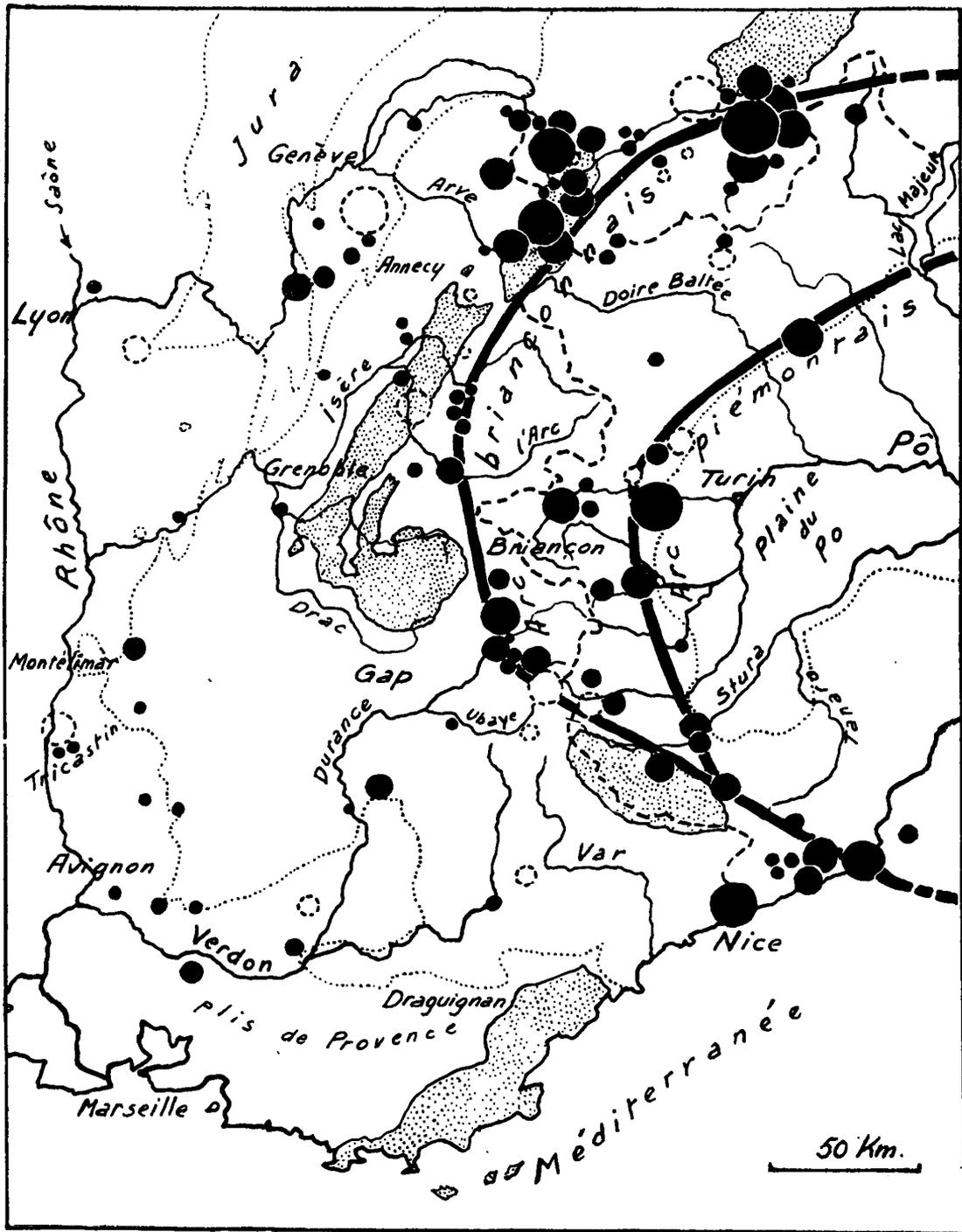


Fig. 18. — Séismicité des Alpes occidentales (d'après J. P. Rothé, *Annales Inst. Phys. Globe, Strasbourg, III, 1938*).

semble des Alpes franco-suisse, ainsi que l'a nettement indiqué J. JUNG dès 1933, mais cadre au contraire singulièrement avec les nouvelles idées qui se propagent depuis les travaux de VENING-MEINESZ.

On se rappelle que, pour ARGAND, la chaîne alpine résulte du laminage du géosynclinal alpin par l'avancée du continent africain, en dérive vers l'aire continentale eurasiatique (fig. 19).

Le bloc africain a même pu chevaucher le bloc eurasiatique sur lequel il aurait çà et là laissé des vestiges-témoins, tandis que le contenu du géosynclinal, laminé ou poussé vers l'avant-pays, s'y

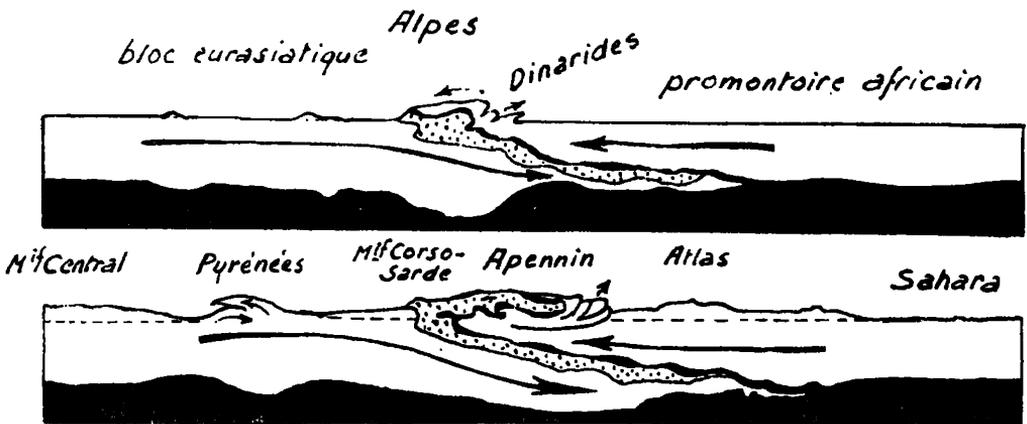


Fig. 19. — La formation des Alpes d'après Em. Argand. Le géosynclinal alpin (pointillé) est laminé entre le bloc africain en mouvement vers le Nord et le bloc eurasiatique à peu près stable.

déversait en nappes de charriage à long cheminement. La position redressée et même renversée des racines les plus internes des nappes pennines (ex., zone du Canavese, d'Ivrée et de Sésia) serait due à l'effondrement insubrien d'ARGAND, phénomène qui, d'autre part, aurait fait disparaître une bonne partie de la chaîne alpine, justifiant ainsi son apparence dissymétrique. On voit donc que pour ARGAND, ainsi que pour STAUB, la racine des Alpes, après le crochet pennique, doit s'enfiler presque horizontalement sous la plaine du Pô.

Or, nous avons suffisamment insisté sur l'allure verticale de la partie plongeante, axiale, de ce que l'on appelle maintenant la racine des Alpes, déduite de tous les travaux des géophysiciens.

D'autre part, cette zone d'Ivrée qui, pour ARGAND, constitue la racine des Préalpes médianes, n'est probablement pas autre chose

qu'un massif hercynien anté-carbonifère, analogue et symétrique de notre arc cristallin externe (Aar, Mont-Blanc, Belledonne, Pelvoux, Mercantour), ainsi que cela avait été déjà mis en évidence par les recherches des pétrographes italiens, en particulier de NOVARESE <sup>45</sup>. Et, depuis longtemps, les géologues alpins français n'admettent plus l'origine lointaine des Médiannes qui, pour eux, sont d'origine briançonnaise, donc relativement proche, opinion qui est de plus en plus adoptée par nos voisins les géologues suisses.

Par conséquent, la structure profonde des Alpes doit présenter un style bien différent de celui que l'on était tenu d'adopter depuis les travaux d'ARGAND. Et tout d'abord, les calculs indiquent que la

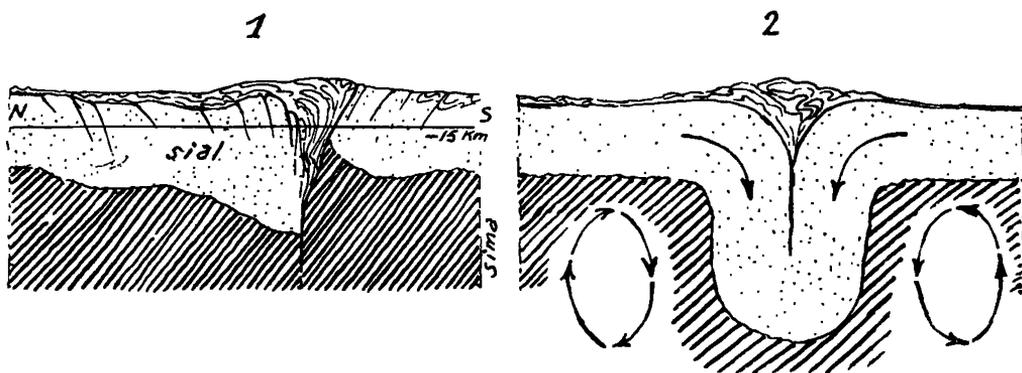


Fig. 20. — Schéma de la structure profonde des Alpes:  
1, d'après J. Jung; 2, d'après Vening Meinesz.

racine verticale plongeante (croûte sialique) de la chaîne (cause de l'anomalie négative), doit pénétrer à une profondeur de l'ordre de 50 à 100 kilomètres dans le tréfonds basique.

Quant à l'axe positif des lacs italiens, il représente, sans aucun doute pour JUNG, « une montée du magma basique dont l'allure verticale est bien montrée par la forme des anomalies ainsi que par la superposition exacte des venues basiques et magmatiques variées de la zone d'Ivrée, avec ses roches vertes laminées, ses intrusions post-tectoniques du groupe de la tonalite et ses épanchements volcaniques. » Il y aurait là une sorte de cicatrice superficielle des phénomènes suggérés par la Géophysique. En résumé, le géosynclinal alpin serait pour JUNG un synclinal de fond sialique (gneiss et granites) dont le flanc Sud, plus mince que le flanc Nord, aurait déter-

<sup>45</sup> Résultats confirmés récemment par E. NIGGLI (*loc. cit.*).

miné la montée du bord méridional du synclinal, cause du foirage des nappes en surface et vers le Nord (fig. 20).

La dissymétrie si caractéristique de la chaîne actuelle ne serait donc pas secondaire, et due à une tectonique insubrienne, mais deviendrait un trait essentiellement alpin, originel et permanent. en rapport avec la structure profonde et aussi, d'après BUCKER, avec la forme arquée du géosynclinal. Dans l'ensemble, cette conception, qui date de 1933, rejoint donc remarquablement celle que nous suggèrent les idées nouvelles, et il n'y aurait qu'à remplacer l'idée argandienne des serres, qui s'y trouve encore, par la notion des courants de convection et de succion consécutive, et à expliquer la

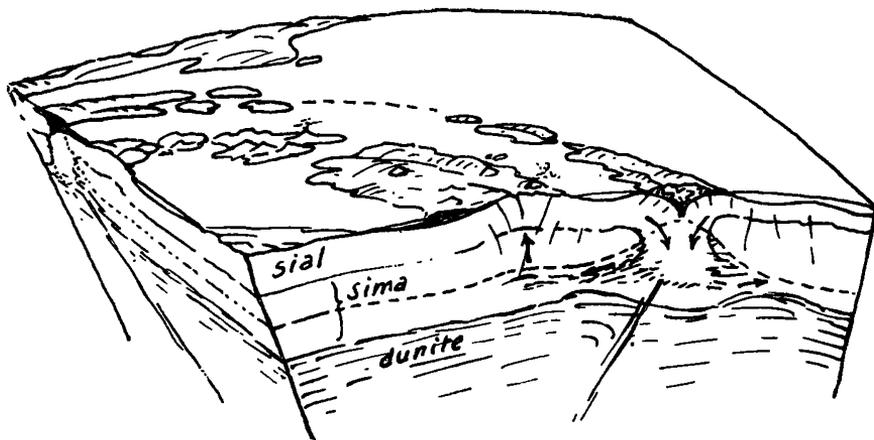


Fig. 21. — Bloc-diagramme schématique des doubles guirlandes insulaires des Indes orientales (d'après Umbgrove) et structure profonde correspondante probable. Comparer à fig. 14.

forte anomalie positive du Piémont par la remontée de la croûte sialique de la zone d'Ivrée, pour aboutir au schéma proposé quinze ans plus tard par UMBGROVE (fig. 23).

Mais laissons de côté la structure profonde de la chaîne et voyons maintenant si l'étude géologique de la surface peut nous donner des arguments en faveur de ces idées et faire cadrer l'histoire alpine avec le schéma que nous avons esquissé dans les pages précédentes.

Tout d'abord, l'histoire des plissements alpins s'étale sur plusieurs dizaines de millions d'années et il faut remonter jusqu'au début de l'époque jurassique pour assister à la constitution du géo-

synclinal alpin <sup>46</sup>. Ainsi que le fait remarquer M. GIGNOUX <sup>47</sup>, le trait le plus marquant de cette histoire, et qui est aussi le plus récent, est la progression continue, pendant le *Tertiaire*, et à l'intérieur de l'arc alpin, d'une *onde d'intumescence* qui est responsable de la physionomie actuelle de la chaîne, et dont nous reparlerons plus bas.

Mais, auparavant, et dès le Lias, le géosynclinal alpin accuse les traces de mouvements tectoniques; c'est le début de l'individualisation des cordillères penniques (ex. : Mont-Dolin) et surtout des cordillères Briançonnaises, ces dernières plus sûrement identifiées par l'étude stratigraphique des régions internes des Alpes françaises <sup>48</sup>. L'évolution de ces cordillères peut se suivre jusqu'au début de l'époque tertiaire, avec des phases variables de soubresauts (Crétacé supérieur) annonçant le grand tumulte de la fin de l'Eocène, qui verra le comblement du géosynclinal de l'avant-fosse alpine par une intense sédimentation détritique du type Flysch, et le déclenchement de la phase majeure de plissement (fig. 22).

Pendant la même période de temps, au-delà de la cordillère Briançonnaise, une autre grande fosse, symétrique de l'avant-fosse Briançonnaise, s'était individualisée, et des phénomènes bien différents vont s'y dérouler : il s'agit là en effet de la grande inconnue du métamorphisme qui va affecter une série sédimentaire épaisse, monotone, allant probablement du Trias au Crétacé (série compréhensive) et presque entièrement transformée en schistes cristallins (gneiss et micaschistes antétriasiques et schistes lustrés mésozoïques).

C'est sur ces zones du Briançonnais et des schistes lustrés que les plissements tertiaires se sont fait sentir avec le plus d'intensité, y provoquant même, pendant le paroxysme oligocène, un véritable bouillonnement de plis, souvent énormes, en majorité couchés vers l'Ouest (éventail Briançonnais, Mischabel, nappes penniques d'AR-

<sup>46</sup> C'est essentiellement cette histoire qui fait l'objet du film établi pour l'Exposition Universelle de 1937 (Palais de la Découverte) dont j'ai déjà parlé (fig. 22).

<sup>47</sup> *Loc. cit.* Tectonique d'écoulement par gravité et structure des Alpes, p. 755.

<sup>48</sup> Sur l'histoire du géosynclinal alpin et de ses différentes phases de plissement, cf. L. MORET, Présentation cinématographique d'un film en couleurs sur la formation géologique des Alpes Françaises (*Trav. Lab. Géol. Grenoble*, t. XXI, 1938); et M. GIGNOUX et L. MORET, Description géologique du Bassin supérieur de la Durance (*ibid.*, t. XXI, 1938).

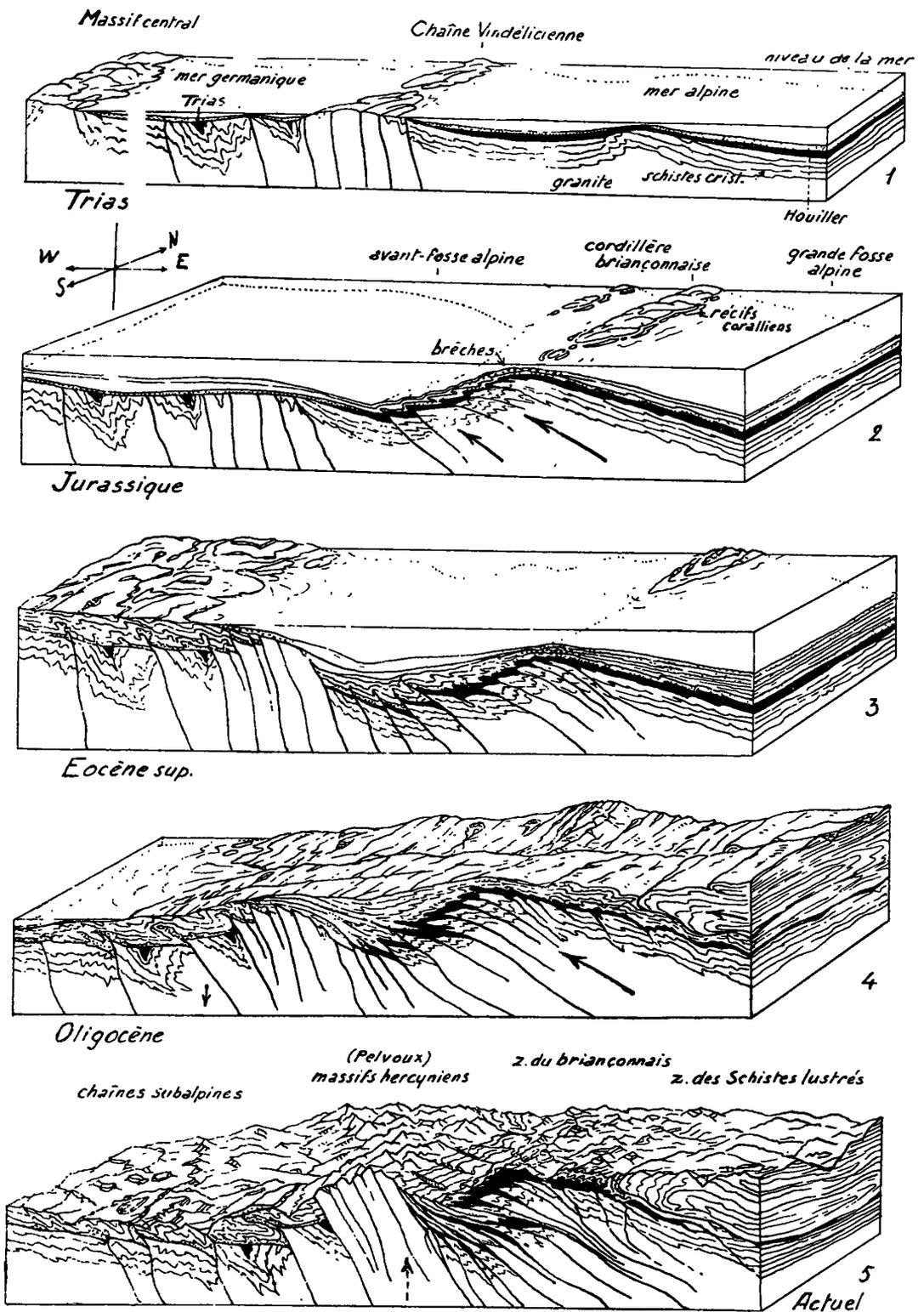


Fig. 22. — Histoire géologique post-triasique des Alpes françaises en cinq stades (fig. extraites du film cinématographique de l'auteur sur la formation des Alpes françaises).

GAND<sup>49</sup>. Si dans le Briançonnais et la Vanoise, les terrains sédimentaires encore reconnaissables peuvent être identifiés par des fossiles, par contre dans la zone des schistes lustrés la chose devient quasi impossible et les grandes unités tectoniques (les nappes penniques d'ARGAND) comportent toutes un noyau anticlinal gneissique, plus ou moins migmatisé, entouré d'une enveloppe de schistes lustrés. Pendant longtemps on a cru que les gneiss de cette zone pennique étaient d'anciens sédiments permo-carbonifères métamorphiques. Actuellement, on pense avec plus de raisons, que la partie centrale de ces noyaux est probablement plus ancienne et anté-carbonifère, de sorte que la discordance hercynienne y est peut-être représentée, mais plus ou moins voilée par le métamorphisme (CORNELIUS, J. B. DAL PIAZ).

Il en résulte que la grande fosse alpine des schistes lustrés est, comme l'avant-fosse briançonnaise, une dépression dont le fond est formé par la croûte sialique et que c'est cette croûte qui réapparaît dans la zone d'Ivrée, accompagnée d'injections récentes de tonalite, et d'une montée du sima où elle détermine l'anomalie positive, déjà signalée.

De l'autre côté de la chaîne, c'est ce fond sialique qui va lentement remonter pour former, après le buttoir des massifs hercyniens externes, le socle et les massifs anciens de l'avant-pays (Massif-Central, Vosges, Forêt-Noire, etc...).

Notre berceau sialique est, cette fois, bien déterminé et c'est dans les parties axiales de ce berceau que doit être recherchée la racine des Alpes, la zone en boucle plongeante dans le sima<sup>50</sup> qui, avec l'action du magma tonalitique, serait la cause essentielle du plissement, puis de la surrection d'ensemble des zones internes alpines au cours du Tertiaire.

Comme corollaire de ce mouvement, la mer va être progressivement rejetée dans les grands sillons de subsidence périalpins où va commencer à s'accumuler une épaisse sédimentation détritique du type molasse.

<sup>49</sup> L'hypothèse d'un enracinement de l'éventail briançonnais, de plus en plus en faveur chez certains géologues alpins français, cadrerait peut-être mieux avec les idées nouvelles (fig. 24).

<sup>50</sup> Cette plongée de la croûte sialique avait été depuis longtemps invoquée par quelques géologues alpins comme une nécessité. CADISCH remarquant que la zone alpine était passée de 630 à 150 km. par suite des plissements, pense qu'il est logique de supposer que le substratum cristallin de la région médiane a dû être englouti pour former une sorte de racine profonde de la chaîne.

C'est immédiatement après la fin de l'Eocène et pendant tout l'Oligocène que les plis vont se déverser sur l'extérieur de l'intumescence alpine et que se déclenchent les nappes préalpines, alimentées par les sédiments des zones subbriançonnaise et briançonnaise externe. La progression de ces nappes a pour conséquence d'entraîner en profondeur la couverture du socle cristallin externe située au-delà du bord de la zone de succion subbriançonnaise, et c'est ainsi que se forment, comme par un véritable sous-charriage (UMBROVE) (fig. 23), les plis plus souples et intracorticaux dysharmoniques des nappes helvétiques. Ailleurs, là où les festons préalpins n'ont pas recouvert la couverture sédimentaire des glacis cristallins c'est également la tectonique d'écoulement qui a travaillé cette couverture en une suite de plis réguliers, poussés vers l'avant-pays molassique, où elle constitue nos chaînes subalpines. Le mouvement a été activé par la surrection des blocs cristallins externes, conséquence de la compensation isostatique.

La mise en place des Préalpes est achevée au Stampien-Chattien et avec l'intervention d'écoulements différentiels en relation avec la nature plus ou moins plastique des roches (ex. : Médiannes plastiques, Médiannes rigides de M. LUGEON et E. GAGNEBIN). Par contre, dans les chaînes subalpines, les mouvements dus à la gravité ont continué après le Miocène et même pendant le Pliocène et rien ne dit qu'ils soient présentement achevés, ainsi que semblent le prouver les séismes externes à foyers peu profonds qui, précisément, paraissent marquer le front de l'écoulement.

Sur le versant oriental et méridional des Alpes, des phénomènes analogues ont dû se produire, mais avec une intensité nettement moindre. Par exemple, au droit de Briançon les plis briançonnais et des schistes lustrés sont déversés vers l'Italie, et au-delà de la limite alpino-dinarique (autre bord de la zone de succion) les déversements Sud des Alpes bergamasques se font dans le même sens.

Ajoutons qu'il est bien probable que le plissement du Jura soit une conséquence de la tectonique d'écoulement des nappes préalpines et helvétiques venant s'emboutir dans le culot molassique qui a comblé la dépression subsidente périalpine. C'est plus ou moins passivement que la molasse a transmis les efforts qui, décollant la couverture sédimentaire de l'extérieur au niveau des horizons marneux et salifères du Trias moyen, en a permis le froncement. Je ne crois pas que, seules les forces de la gravité aient été capables de produire les plissements jurassiens déversés comme ceux des Alpes, vers l'extérieur de la chaîne.

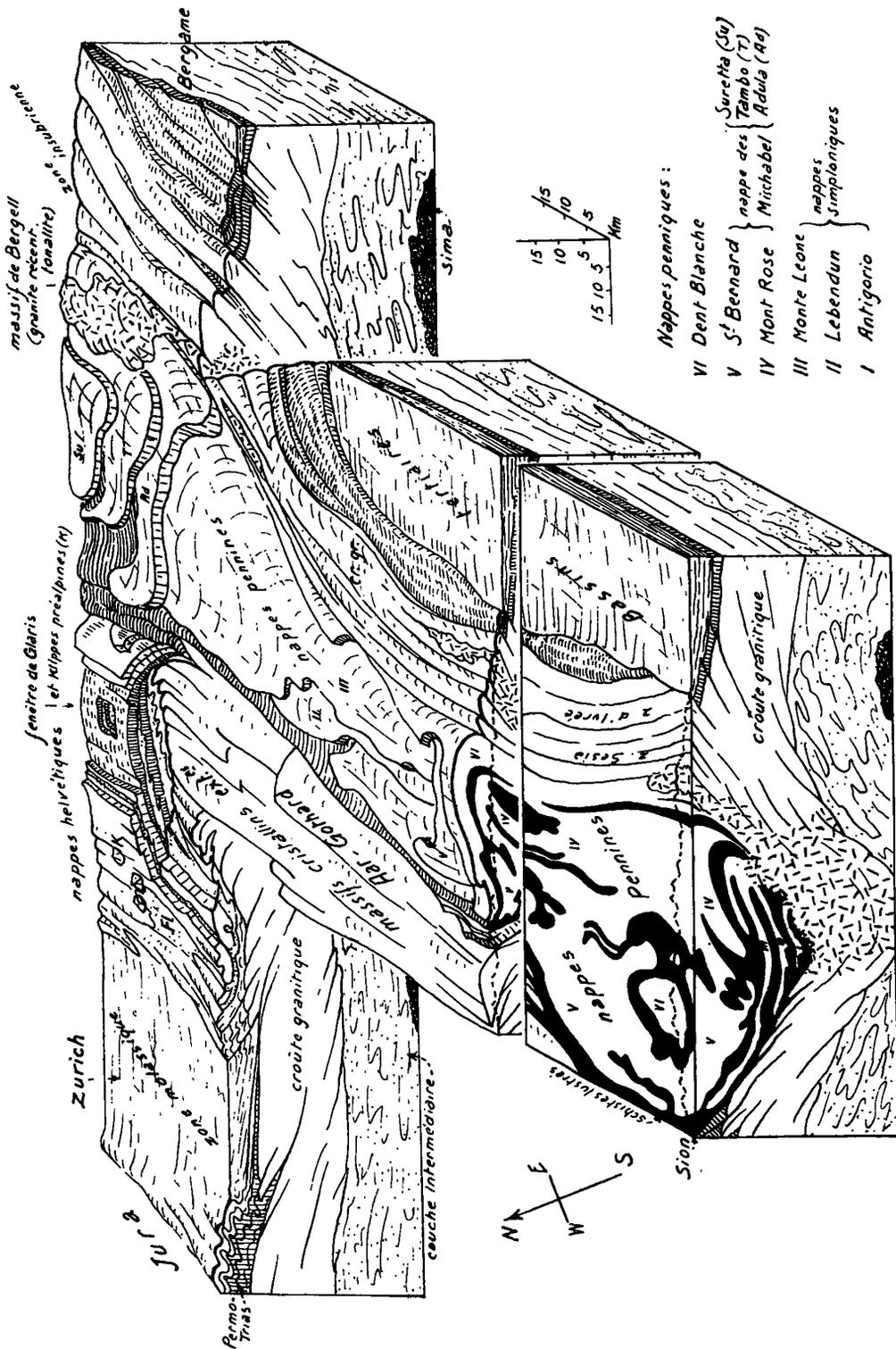


Fig. 23. — Tectonogramme des Alpes suisses dans l'hypothèse d'un engouffrement de la zone pennique suivi de plissement et de surrection de l'ensemble. Les plis penniques y sont dessinés d'après les coupes classiques d'Argand, modifiées par les travaux récents; de plus, la zone d'Ivrée est considérée comme l'équivalent oriental des massifs centraux externes (d'après Umbgrove, légèrement modifié).

### Conclusions.

Dans les pages précédentes, nous avons essayé d'exposer très simplement l'évolution récente des idées sur la tectonique profonde et la genèse des chaînes de montagnes. Ces idées, il faut bien le redire, ne modifieront pas les résultats importants déjà obtenus par les géologues de terrain qui scrutent la partie superficielle de l'écorce terrestre accessible à leurs investigations.

Mais pour une chaîne comme la chaîne alpine par exemple, elles peuvent sensiblement transformer la conception que nous nous faisons tous de sa structure profonde et de son origine depuis les synthèses d'ARGAND, de STAUB, de P. TERMIER.

Pour ma part, et en ce qui concerne le secteur français des Alpes occidentales que j'ai le plus parcouru, je conçois maintenant que l'on puisse adopter un schéma voisin de celui proposé par UMBGROVE, déjà entrevu par AMPFERER et par KRAUS. Autrement dit, l'engloutissement du substratum cristallin axial dans ce tronçon résulterait, non pas d'un effort de compression tangentiel dû à la dérive africaine vers le Nord, mais d'une sorte de suction consécutive à la naissance des courants convectifs dans la zone simique ayant entraîné la croûte entre les deux zones listriques subbriançonnaise et alpino-dinarique, et tout cela suivi du plissement, du « bouillonnement » des sédiments briançonnais et penniques. C'est ce bouillonnement qui, pour une grande part, a déterminé l'intumescence alpine, la « géotumeur », sur les versants de laquelle l'écoulement des sédiments de couverture, sous l'action de la gravité, a peu à peu ajouté, de l'intérieur vers l'extérieur de la jeune chaîne, les bourrelets des nappes préalpines et des chaînes helvétiques et subalpines.

Pendant longtemps, la chaîne alpine s'est présentée à nous comme un immense corps gisant qu'il s'agissait de disséquer pour en comprendre l'anatomie et, si j'ose dire, la physiologie. Ce double but n'a pu être totalement et correctement atteint que par la collaboration des géologues et des géophysiciens.

Si j'avais à refaire mon film sur l'histoire géologique des Alpes françaises (film établi à une époque où les forces tangentielles et la mécanique des serres de l'étau régnaient en maîtresses), bien des passages en seraient à modifier. La phase de suction de la boucle géosynclinale y est naturellement escamotée, mais l'on peut dire que le déroulement du film met essentiellement en évidence la phase de bouillonnement, origine de la géotumeur alpine, qui a suivi. Par contre la formation des nappes de l'Embrunais-Ubaye et des chaînes

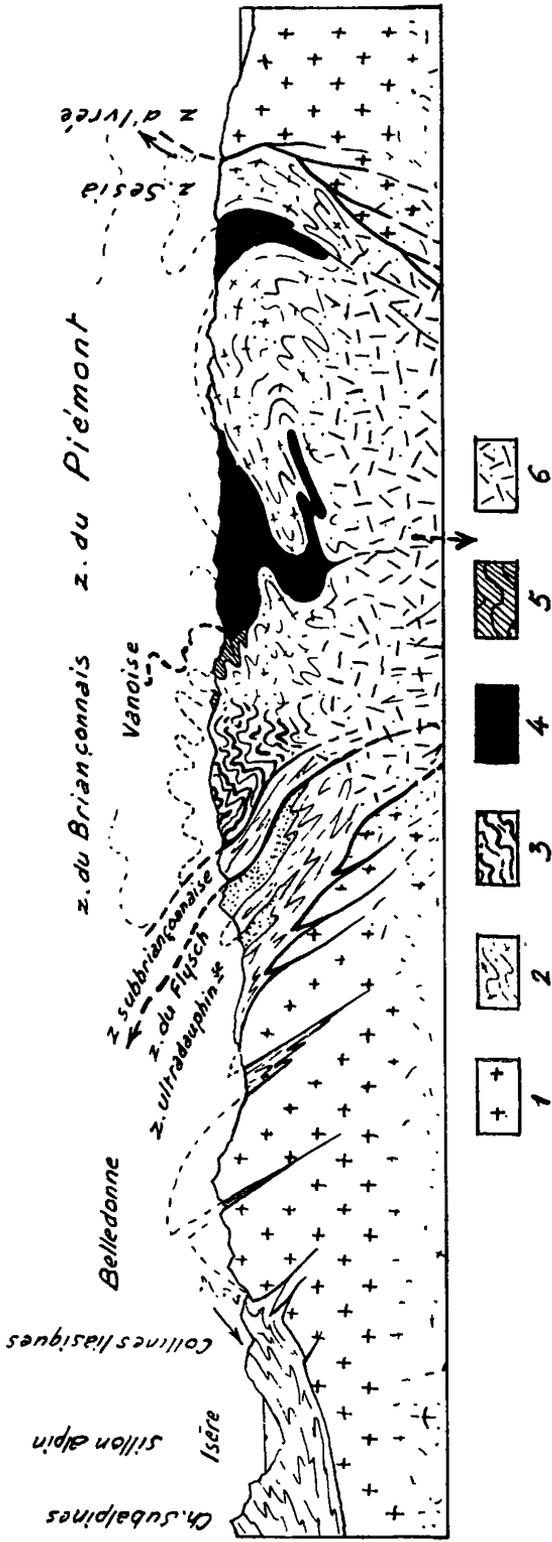


Fig. 24. — Coupe transversale schématique des Alpes françaises, passant par la Maurienne et la Vanoise. On a adopté l'hypothèse d'un engoulement de la zone pennique axiale (Briançonnais, Schistes lustrés) consécutif à l'affaissement en boudé de la croûte granitique, et suivi de plissement et de surrection générale suivant les deux zones soulignées par une flèche. On peut admettre que cette surrection est facilitée par la montée des jeunes magmas granitiques. De plus l'éventail briançonnais est supposé enraciné et les chaînes subalpines mises en place sous l'action de la seule gravité.

1, croûte cristalline anté-Carbonifère; 2, schistes cristallins de la zone pennique (permo-houillers et même anté-Carbonifères); 3, Houiller normal de la zone houillère axiale briançonnaise; 4, Schistes lustrés; 5, couverture mésozoïque (Trias-Flysch) de la Vanoise; 6, magmas granitiques des injections récentes (tonalite), visibles à l'affaissement plus au Nord.

subalpines sous l'action de la pesanteur y apparaît clairement et ne manque jamais de frapper le spectateur, et c'est pourquoi l'auteur peut se consoler en pensant que, dans l'ensemble, ce film, qui lui a demandé un si grand travail, n'a pas été inutile et conserve encore sa valeur pédagogique <sup>51</sup>.

---

<sup>51</sup> L'unique exemplaire de ce film, d'ailleurs en mauvais état, est conservé au Palais de la Découverte à Paris, et le négatif en a été perdu pendant la dernière guerre. A son sujet, M. GIGNOUX a pu dire, parlant de la tectonique d'écoulement par gravité : « Cette notion s'impose à tous ceux qui ont vu projeter le film cinématographique dessiné par L. MORET » (*Méditations sur la tectonique d'écoulement, loc. cit., p. 6*).