

# LES MOUVEMENTS DE L'ÉCORCE TERRESTRE

PAR

**J. LE CONTE**

Président de la Société géologique des États-Unis.

(Discours annuel prononcé le 29 décembre 1896. Traduction d'après CIEL ET TERRE  
des 16 septembre et 1<sup>er</sup> octobre 1897.)

---

*Introduction. — Sources d'énergie.*

Presque toutes les manifestations de la nature qu'il nous est donné de contempler, tirent leur force du Soleil. L'air et l'eau sont animés de courants dont la circulation est déterminée par cet astre. Il donne la vie aux plantes et, par elles, aux animaux. Tous les produits de notre industrie, qu'ils aient pour moteurs l'eau, le vent, la vapeur ou l'électricité, n'ont pas d'autre source, et les phénomènes de l'activité humaine, intellectuelle, sociale ou morale, relèvent de cette même cause. Une seule exception à cette loi presque universelle se rencontre parmi les phénomènes que les géologues ont réunis en un seul groupe sous le nom de *forces ignées*, et qui comprennent les volcans, les tremblements de terre et les mouvements moins violents de la croûte terrestre.

Les éléments de l'action géologique ont été primitivement divisés en deux groupes. L'un comprend les agents atmosphériques, aqueux et organiques, avec les phénomènes terrestres qui en sont la conséquence; l'autre ne se compose que des éléments ignés et des phénomènes qui

en dépendent. Les forces, dans le premier groupe, sont extérieures; celles du second sont intérieures. Elles dérivent, dans l'un, du Soleil; dans l'autre, de la Terre. L'un dégrossit, l'autre détaille les traits de la Terre; l'un taille dans la masse, le second lui donne une forme. L'effet général du premier est d'augmenter les inégalités de la surface terrestre, celui du second d'aplanir et enfin de détruire ces inégalités. La configuration de la surface terrestre, la distribution des terres et des eaux, en un mot tout ce qui constitue la géographie physique à n'importe quelle époque géologique, dépend de l'état d'équilibre entre ces deux forces éternellement antagonistes.

### *Phénomènes à étudier.*

Les phénomènes du premier groupe, avec leurs lois et leurs causes, sont relativement aisés à comprendre, parce que, se manifestant à la surface, ils s'offrent d'eux-mêmes à l'observation; les causes des phénomènes du second groupe, au contraire, étant cachées dans les profondeurs de la Terre, échappent à l'observation directe et sont pour nous encore fort obscures.

Or, l'obscurité où l'on est encore à leur égard, jointe à leur extrême importance, stimule d'autant plus le zèle investigateur des géologues. L'intérêt excité par le premier groupe, dont les manifestations toutes terrestres sont dues au Soleil, est attiré en même temps vers d'autres branches des sciences : la physique, la chimie et la biologie; tandis que les phénomènes du second groupe appartiennent exclusivement au domaine de la géologie.

Si l'on compare la Terre à un organisme, ces forces intérieures constitueront son énergie vitale; l'autre groupe peut alors être assimilé à un entourage de faits physiques en lutte avec ces forces, et le résultat de la lutte détermine les diverses phases de l'évolution de l'ensemble. Or, presque tous les progrès opérés par la biologie ont été obtenus par l'étude des phénomènes extérieurs, qui sont les plus aisés à comprendre; elle a ainsi déblayé le terrain et réuni des matériaux pour attaquer les objets jusqu'ici restés obscurs, et les progrès qu'elle est destinée à faire encore devront avoir pour objectif une connaissance plus approfondie des forces vitales elles-mêmes. Cela n'est pas moins vrai pour la géologie. L'étude des phénomènes extérieurs, tels que l'érosion, le transport des matériaux, la sédimentation, la stratification, la distribution des formes organiques dans le temps et dans l'espace, a

été l'origine des premiers progrès de cette science. On a maintenant des données générales assez exactes sur les lois de ces phénomènes, et le progrès futur consistera à parfaire et à compléter ces données. Toutefois, ce qui sera aussi et avant tout le point principal à obtenir, est une connaissance plus parfaite des forces intérieures. C'est à cela que vise la géologie de notre époque. Pour y arriver, il faut d'abord établir clairement les questions à résoudre.

### *Effets des forces intérieures.*

L'intérieur de la Terre étant inaccessible à l'observation directe, on ne peut raisonner sur les forces intérieures que d'après les effets produits par elles. Or ces effets sont de trois ordres : 1° les volcans et toutes les éruptions de matières venant de l'intérieur ; 2° les tremblements de terre, y compris tous les mouvements, forts ou faibles ; 3° les petits mouvements successifs, agissant sur de grandes surfaces, imperceptibles à nos sens, mais s'accumulant pendant un temps indéfini. Il est hors de doute que, de ces trois genres, le dernier est le plus important, le plus fondamental, puisqu'il est l'origine des deux autres. En effet, les volcans et les tremblements de terre, tout frappants et ostensibles qu'ils soient, ne sont probablement que des accidents occasionnels, se produisant au cours de la marche lente et progressive de ces mouvements plus durables, plus continus. C'est donc de ces derniers que nous allons nous occuper.

Les mouvements déterminés dans la croûte terrestre par des forces intérieures peuvent être classés en quatre catégories, d'après leur importance relative : 1° les plus violents, les plus étendus et sans doute les plus anciens, qui ont séparé les masses continentales et formé les bassins océaniques ; 2° les mouvements par poussées latérales, auxquels on doit le soulèvement des chaînes de montagnes ; 3° certains mouvements vastes, mais sans direction continue, oscillatoires et, par conséquent, sans effet d'accumulation ; 4° des mouvements déterminés par un rétablissement d'équilibre, que des déplacements de masses avaient rompu. Peut-être ces derniers ne doivent-ils pas être attribués seulement aux forces intérieures terrestres, puisque les déplacements de masses dépendent probablement plutôt de forces extérieures à la Terre ou dérivées du Soleil. Ils sont pourtant si importants par les modifications qu'ils apportent dans les effets des autres mouvements et par l'influence qu'ils exercent sur les conditions intérieures de la Terre,

qu'on ne saurait les passer sous silence ou en faire abstraction.

De ces quatre espèces de mouvements, deux sont de premier ordre; ils agissent toujours dans une direction déterminée et leurs effets vont en s'accumulant jusqu'à ce que survienne un élément nouveau qui en contrarie la marche. Les deux autres, au contraire, sont secondaires, ils n'opèrent pas constamment dans la même direction, mais sont oscillatoires; ils modifient et rendent parfois complètement nuls les effets des mouvements primaires.

Considérons ces divers mouvements suivant l'ordre qui vient d'être indiqué.

#### *Formation des bassins océaniques.*

On peut admettre qu'à une certaine époque, la Terre a été un sphéroïde incandescent, en fusion, de dimensions beaucoup plus considérables qu'aujourd'hui, et que sa forme et sa grandeur actuelles sont le résultat du refroidissement, de la solidification et de la contraction. Or, si au moment de la solidification elle eût formé un tout homogène, le refroidissement et la contraction auraient été les mêmes sur tous ses points et sa forme sphéroïdale fût restée intacte. Mais il paraît peu vraisemblable qu'une homogénéité complète ait pu exister dans un corps aussi volumineux. Si donc la matière terrestre a été plus dense et plus conductrice sur certains points que sur d'autres, les premiers ont dû, rien qu'en raison de leur plus forte densité, tomber au-dessous du niveau moyen et former des creux; car, même dans un solide (et à *fortiori* dans un semi-liquide, tel que la Terre l'était alors), un équilibre statique (*isostasie*) doit s'établir entre des espaces aussi étendus. Telle aurait été l'origine des bassins océaniques. Les inégalités que je viens de signaler seraient pourtant peu de chose si une cause plus considérable ne venait s'y ajouter : la plus forte conductibilité de ces mêmes espaces ou régions. La conductibilité n'est, il est vrai, pas proportionnelle à la densité, mais, en thèse générale, elle l'est; et les surfaces les plus denses doivent être aussi les plus conductrices et, par conséquent, se refroidir et se contracter plus promptement que les autres; cette condition doit aussi augmenter progressivement la dépression sur ces espaces.

Les deux causes — densité et conductibilité — isostasie et contraction — marchent de pair, mais la dernière est de beaucoup la plus forte à cause de sa faculté infinie d'accumulation. Ainsi, la lithosphère sphéroïdale primitive devait donc être déformée et sa distorsion, fixée par

la solidification, a été en augmentant jusqu'à nos jours. Lorsque le refroidissement est devenu suffisant pour précipiter la vapeur atmosphérique, l'enveloppe aqueuse formée ainsi a dû s'accumuler dans les bassins de la lithosphère et constituer les océans. Il est possible et même probable que les dépressions ont été d'abord si peu sensibles que l'océan primitif ait pu être universel; mais à mesure que la contraction a augmenté vers le centre de la Terre, les bassins sont devenus plus profonds et les parties les moins contractées de la lithosphère ont paru sous forme continentale. Cette marche continuant, les terres se sont élevées et développées en étendue, tandis que les bassins océaniques devenaient plus profonds et plus resserrés. En résumé, malgré les alternatives de diminution et d'augmentation des terres, malgré les obstacles apportés par des agents extérieurs, tels que l'érosion et la sédimentation, ainsi ont dû se passer les faits, à mon avis, au cours de l'histoire géologique du monde.

Partant de ce point de vue, il est évident que puisque les causes qui ont formé primitivement les bassins océaniques ont continué à agir aux mêmes points, la position de ces grandes inégalités de la lithosphère n'a point changé. C'est le principe de la permanence des bassins océaniques et des masses continentales, indiqué d'abord par Dana.

Une objection a été faite à cette manière de voir : c'est que l'hétérogénéité supposée ici dans une masse passée de l'état de fusion à l'état solide, est fort improbable, sinon tout à fait impossible. Je crois que cette objection ne tient pas si l'on considère les très faibles différences de conductibilité et de contraction auxquelles nous avons affaire; je dis « faibles » par comparaison avec la grandeur de la Terre. L'examen des inégalités de la surface terrestre rendra cette assertion évidente. Les océans ont une profondeur moyenne de 4,000 mètres; la hauteur moyenne des continents est d'environ 500 mètres. Par conséquent, l'inégalité moyenne de la lithosphère est moindre que 5,000 mètres. C'est  $1/1500$  du rayon de la Terre, moins de  $1/4$  de millimètre sur un globe de 60 centimètres de diamètre. Je crois qu'une balle sphéroïdale de terre plastique, en se séchant, ou une balle sphéroïdale de cuivre rougi, en se refroidissant, seraient plus déformées par la contraction que la lithosphère de la Terre telle qu'elle se présente actuellement. Il est vrai que les inégalités sont plus accentuées en certains points, spécialement sur la limite des surfaces continentales, mais ce fait est dû à une autre cause, la formation des montagnes, dont nous parlerons plus tard.

Une seconde objection est présentée par les géologues. Le point de

vue exposé précédemment étant adopté, il semble d'abord que les bassins océaniques, se refroidissant rapidement, ont dû être les premiers à former une croûte solide et que cette croûte (s'il y reste quelque liquide intérieur) doit y être plus épaisse qu'ailleurs, et par suite moins soumise à une action volcanique; or on remarque que c'est justement sur ces espaces que les volcans sont les plus nombreux et les plus actifs. C'est là ce qui a fait penser à Dana que les espaces terrestres ont été plus prompts que les espaces océaniques à se solidifier. Il est probable qu'il en est ainsi; mais après un instant de réflexion on verra que ces deux faits, à savoir : la plus ancienne solidification des surfaces terrestres et les refroidissements et contractions plus prompts des espaces océaniques ne sont pas en contradiction l'un avec l'autre; les surfaces plus conductrices de la chaleur et par conséquent plus vite refroidies, ont dû en réalité être les dernières à se solidifier, parce que la solidification à la surface devait être retardée par le passage de la chaleur venant d'en bas, tandis que les espaces terrestres moins conductifs ont dû certainement être les premiers solidifiés. Les laves les plus vésiculaires et non conductrices sont les premières à se solidifier et, par la même raison, les dernières à se refroidir à de grandes profondeurs.

On pourra soulever encore d'autres objections, surtout si l'on entre dans le détail; les principes physiques sur lesquels la théorie repose et les conditions dans lesquelles ils agissent sont de beaucoup trop complexes et trop imparfaitement connus pour admettre une discussion de détail. Il conviendra donc de se borner aux considérations générales.

Arrêtons-nous un moment pour comparer à l'hypothèse ci-dessus celle de Dana, telle que Gilbert l'a interprétée et fait connaître en 1895.

1° D'après Dana, la solidification de la Terre a dû d'abord s'opérer au centre; ce qui, en fait, paraît le plus probable; 2° On peut supposer que le liquide surnageant, disons de 80 à 160 kilomètres d'épaisseur, s'est disposé par couches de densités progressives, allant de la surface jusqu'au noyau solide. Supposons maintenant que, par une cause quelconque, — faible conductibilité par exemple, — certaines régions se solidifient à la surface. Ces croûtes formeront, sans doute, les parties superficielles les plus légères; mais puisque les roches, en se solidifiant, se contractent, ces croûtes solidifiées seront précipitées sur le noyau et remplacées par des matériaux légers de même nature, venant de la surface avoisinante, qui à son tour se solidifiera et coulera à fond.

Ainsi se construirait, à partir du noyau intérieur, une masse solide contenant seulement en matériaux superficiels légers, propres à former un sol solide, tandis que les matériaux plus denses et moins prompts à se solidifier formeraient les espaces océaniques. De même que dans mon système, les espaces océaniques proviennent des matériaux les plus denses et les espaces terrestres des plus légers.

Il est clair que, d'après l'un ou l'autre de ces systèmes (et spécialement d'après le mien), la densité des matériaux qui constituent le bassin des océans, depuis leur surface jusqu'au centre de la Terre, et celle des matériaux qui forment de même les continents, sont dans un rapport inverse à la longueur des rayons terrestres sub-océaniques et sub-continentaux. Par conséquent, les espaces sous-marins et continentaux se trouvent dans un parfait état d'équilibre statique. Ainsi, dans la formation des continents, les principes de l'*isostasie* sont complètement satisfaits. Je dis « complètement », parce qu'il ne s'agit pas d'un équilibre partiel dû à la rigidité, mais d'un équilibre renforcé par la pression, lequel existe sans effort et par lui-même.

#### *Formation des montagnes.*

Les chaînes de montagnes se classent suivant deux types : l'*antyclinal* ou fondamental; le *monoclinal* ou exceptionnel. Le premier comprend les montagnes de structure tourmentée, déterminée par refoulement latéral; le second, les montagnes de structure plus simple, formées par le tassement inégal de grandes portions de la croûte terrestre. Je ne m'occuperai, pour le moment, que de la première espèce.

On ne saurait mettre en question que les chaînes de montagnes du premier type n'aient pour origine une pression latérale, quelle que soit d'ailleurs la cause de cette pression; et on ne discutera pas davantage que cette action ne soit permanente et suive une direction continue, quelles que soient d'ailleurs les modifications apportées par l'érosion ou d'autres agents de destruction. Pour ces motifs, j'ai considéré ces montagnes comme résultant des effets provoqués par les mouvements primaires, c'est-à-dire comme dues aux mouvements dont les causes affectent le globe entier.

Une autre raison de cette classification est que, jusqu'à preuve du contraire, je tiens que ces effets résultent d'une contraction intérieure concentrée sur certains points faibles de la croûte, lesquels, par suite, doivent céder sous la pression latérale ainsi produite. Les raisons pour

et contre ont déjà été discutées ailleurs; je ne veux ici que rencontrer certaines critiques au sujet de la théorie de la contraction, et, notamment, celle qui concerne la position supposée du niveau de nulle tension (*level of no strain*).

Cette critique tire sa force de l'extrême *superficialité* de ce niveau; et celle-ci, à son tour, dépend de la température initiale du noyau incandescent et du temps écoulé depuis qu'il a commencé à se refroidir. Ces deux conditions sont très incertaines, mais, ainsi que Davison l'a indiqué récemment, il existe d'autres éléments, laissés de côté dans les premiers calculs, et dont l'influence sur les résultats doit être considérable. Ces éléments nouveaux concourent pour placer le *niveau de nulle tension* à une profondeur beaucoup plus grande que les premiers calculs ne l'admettaient.

Ces éléments jusqu'ici négligés sont les suivants : 1° la température de la Terre augmente à mesure qu'on y pénètre plus profondément; or le coefficient de contraction s'accroît avec la température, ce qui doit augmenter la profondeur du *niveau de nulle tension*, et également, par suite, le degré de la contraction intérieure, d'où augmentation dans la force de poussée latérale; 2° la conductibilité augmente avec la température, ce qui doit précipiter le refroidissement et, par suite, la rapidité de la contraction intérieure; 3° l'intérieur de la Terre est plus conducteur, non seulement à cause de sa plus haute température, mais aussi à cause de sa plus grande densité; ceci est exact, soit que la plus grande densité provienne de l'augmentation de la pression, soit de l'inégalité des matériaux (par exemple, une surabondance de métaux non oxydés); 4° les matières de l'intérieur, en dehors de la plus haute température et de la densité, ont un plus fort coefficient de contraction; 5° les calculs ordinaires partent de l'idée que la température initiale était la même à toutes les profondeurs, tandis qu'il est vraisemblable qu'elle allait en augmentant avec la profondeur, comme on le constate encore de nos jours; il en résulterait une forte augmentation de la profondeur du *level of no strain* et de la puissance de la compression latérale.

Le résultat final auquel est arrivé Davison est que, tandis que d'après les calculs ordinaires, le *level of no strain* ne peut être placé qu'à un peu plus de 3,000 mètres (3,500 mètres) au-dessous de la surface, cependant si l'on met en ligne de compte le premier élément indiqué plus haut, la profondeur de ce niveau augmentera jusqu'à près de 13 kilomètres (12,500 mètres), et que si l'on ajoute tous les éléments, elle deviendra encore beaucoup plus considérable. La conclusion générale est que les objections faites à la théorie contractionnelle, en se



basant sur la profondeur du *level of no strain*, doivent être regardées comme non avenues.

### *Mouvements oscillatoires.*

Les mouvements dont je viens de parler ont une direction continue pendant tout le temps de leur durée ; aussi les effets résultants sont-ils les mêmes tant que d'autres mouvements ou des influences perturbatrices ne viennent interrompre leur progrès. Mais il est certain qu'à côté de ces mouvements de marche fixe, il s'en présente d'autres d'un caractère oscillatoire, c'est-à-dire se produisant tantôt en haut, tantôt en bas, occupant des espaces tantôt grands, tantôt resserrés, et se répétant plusieurs fois. Ces mouvements se remarquent fréquemment sur la croûte terrestre ; on les retrouve à toutes les époques de l'histoire de la Terre et ils sont révélés par les irrégularités des couches stratifiées ; on y voit des espaces érodés, anciens ; d'autres couches uniformes sont les indices d'un fond marin rempli de sédiments.

Voici deux exemples d'oscillations de ce genre :

Le plateau du Colorado était primitivement un fond marin et a continué à l'être depuis le commencement de l'époque carbonifère jusqu'à la fin de l'époque crétacée ; pendant ce laps de temps, il a reçu 3,500 ou 4,500 mètres d'épaisseur de sédiments. Pendant ce temps aussi, la surface de la croûte terrestre s'affaissait lentement, tout en se recouvrant de sédiments nouveaux. Pourquoi cette marche s'est-elle arrêtée ? A la fin de l'époque crétacée, cette même surface a commencé à s'élever. Quelles ont été les causes de cette transformation ? Cette région a continué à s'élever jusqu'à nos jours et elle s'élève encore. La masse ainsi accumulée ne peut être moindre que 6,000 mètres, car si toutes les couches qui ont été éliminées par érosion étaient reconstituées, la partie culminante formant fond marin à la fin de l'époque crétacée serait à présent haute de 6,000 mètres. Cette oscillation sera pourtant la dernière de cette partie du globe, car au-dessous de la couche carbonifère se remarquent plusieurs irrégularités prouvant que plusieurs oscillations du même genre ont eu lieu à des époques antérieures. Pendant l'époque dévonienne, l'espace était continental, puisque le terrain carbonifère repose, avec des inégalités, sur le terrain silurien. Il a été fond marin pendant l'époque silurienne et en a reçu les sédiments. Au-dessous de la couche silurienne, deux autres inégalités témoignent d'oscillations semblables. Ces anciennes oscillations étaient probablement aussi fortes que celle qui a lieu actuellement, mais il nous est impossible de les

Un autre exemple, plus étendu et plus récent, est donné par les énormes oscillations de la période glaciaire. Il ne saurait être mis en doute que sur de très grandes surfaces (plusieurs millions de kilomètres carrés) il n'y ait eu en ce temps des mouvements de haut en bas de plusieurs milliers de mètres, lesquels ont produit des changements considérables dans le climat et dans toute la géographie physique. Quelle cause a amené ces mouvements? Ils ont certainement été modifiés par d'autres mouvements superposés, mais les origines des uns et des autres ne doivent pas être confondues.

Nous avons donné deux exemples comme particulièrement frappants, mais, en réalité, ces mouvements se présentent communément sur la croûte terrestre. Ils sont indiqués partout par l'irrégularité des couches et partout aussi ils existent actuellement. Sur certains points, la mer s'avance et la terre se retire; sur d'autres, la terre empiète sur la mer. Ces mouvements sont surtout apparents le long des côtes, parce que la mer a un niveau donné auquel on peut les rapporter; mais ils affectent également l'intérieur des continents, ce qu'on voit aux allures des rivières, dont le niveau s'établit par érosion sur des terres qui s'élèvent, et par sédimentation sur une contrée qui s'affaisse.

Diverses hypothèses ont été émises pour expliquer ces mouvements, et spécialement ceux, parfois locaux, des lignes de côtes. Dans les régions volcaniques, ils ont été attribués à l'augmentation ou à la diminution de la chaleur et à l'expansion ou à la contraction qui en résultent. Sur les lignes des côtes à sédiments non volcaniques, l'élévation a été attribuée par quelques-uns à l'augmentation de la chaleur intérieure de la Terre et à l'expansion de la croûte due aux recouvrements par les dépôts sédimentaires qui en sont la conséquence. D'autres pensent, avec plus de raison, que les régions à sédiments épais s'affaissent sous le poids des dépôts accumulés; mais il est évident que si ces théories peuvent rendre compte de quelques faits locaux propres aux régions volcaniques et aux lignes de côtes, elles ne sauraient expliquer les affaissements de l'intérieur des continents et surtout les énormes mouvements dont il a été question ci-dessus. Il faut donc chercher une cause plus générale. Quelle est-elle?

Il est certain que de tous les problèmes de la géologie, celui des mouvements oscillatoires est resté le moins explicable. Pas la moindre lueur n'a encore été jetée sur cet objet. Si j'en parle ici, ce n'est pas pour le résoudre (car j'avoue mon incapacité à le faire), mais pour bien le différencier d'autres questions et attirer l'attention sur les modifications que ces mouvements apportent aux mouvements de la première

espèce, ces modifications étant de nature à mettre en doute le principe de la permanence des bassins océaniques et des surfaces continentales, sinon à le faire même nier absolument par quelques-uns. Presque tous les changements opérés depuis les temps géologiques dans la géographie physique, avec leurs conséquences sur le climat et la distribution des formes organiques, ont été déterminés par les mouvements oscillatoires; mais on a lieu de penser pourtant que, quelque violents et étendus qu'ils aient pu être, la position des bassins océaniques et celle des masses continentales a été déterminée par des causes plus anciennes et est demeurée la même.

#### *Mouvements résultant de la pesanteur.*

L'hypothèse des mouvements dus à un rétablissement d'équilibre sous l'action de la pesanteur, émise d'abord en partie par Herschel, a été clairement définie pour la première fois par le major Dutton, sous le nom d'*isostasie*. On peut la formuler comme suit : Dans une masse aussi grande que celle de la Terre, qu'elle contienne des liquides ou soit complètement solide, un excès ou un défaut de poids ne peut exister d'une façon permanente sur de grands espaces. Le sol doit céder graduellement jusqu'à ce qu'un équilibre statique s'établisse. Il s'ensuit qu'un transport continu de matière, d'un lieu à un autre, par érosion ou sédimentation, doit être accompagné d'un abaissement de la croûte dans la zone surchargée et par une surélévation de la croûte dans les régions non chargées. C'est ce qui explique l'affaissement de l'écorce terrestre à l'embouchure des grandes rivières et l'élévation correspondante des plateaux intérieurs et de presque toutes les régions montagneuses que nous connaissons. Il semble qu'il en a été de même à toutes les époques géologiques, car il est évidemment impossible que 12,000 mètres de sédiments se soient accumulés dans la région des Appalaches pour former la chaîne de ce nom, sans qu'il y ait eu un tassement correspondant avec renouvellement de la sédimentation.

Or, si l'importance du principe est hors de discussion, le point jusqu'où peut s'étendre son application offre quelque matière au doute. L'action des causes extérieures, telles que le transport de la surcharge par érosion et sédimentation, est comparativement si simple et si aisée à comprendre, qu'on est presque tenté de négliger ces éléments, puisqu'ils ne doivent servir qu'à modifier et compléter les mouvements fondamentaux dus à des causes intérieures. On est ainsi porté à généra-

liser et à conclure que tout affaissement résulte d'une augmentation et toute élévation d'une diminution de poids. Cette cause des mouvements est probablement réelle, mais elle n'est pas la principale. Si la proposition est vraie, la proposition contraire peut l'être tout autant. Il est certain que des sédiments épais peuvent causer le tassement, mais il ne l'est pas moins que ce tassement (quelle que soit sa raison) sera toujours accompagné d'une nouvelle sédimentation. Il est vrai que le déplacement de la matière par l'érosion donnera lieu à un surélévément correspondant, mais il ne l'est pas moins que le surélévément peut être, par érosion, la cause du déplacement des matériaux.

Reprenons comme exemple la région des plateaux. Nous avons vu que pendant les époques carbonifère, permienne, triasique, jurassique et crétacée, cette région s'est affaissée jusqu'à ce que, à la fin de cette dernière époque, la croûte terrestre se trouvât abaissée de 3,500 à 4,500 mètres. Penserons-nous que cet abaissement soit dû au poids croissant des sédiments? Pourquoi sa situation se serait-elle changée ainsi? Et pourquoi, à la fin de l'époque crétacée et lorsque le poids était devenu le plus fort, a-t-elle commencé à s'élever? Car depuis lors jusqu'à présent, elle s'est élevée de 6,000 mètres. De cette épaisseur, environ 3,500 mètres ont été déplacés par érosion et 2,500 mètres d'élévation sont demeurés intacts. Or, si cette élévation est le résultat du déplacement du poids par érosion, comment se fait-il qu'un déplacement de 3,500 mètres ait produit une élévation de 6,000 mètres? Ce résultat s'explique si l'élévation a été la cause et l'érosion l'effet, car l'effet doit être en retard sur la cause. Il est donc évident qu'il faut chercher ailleurs, c'est-à-dire dans l'intérieur de la Terre, la cause fondamentale, bien que les effets de cette cause intérieure puissent être augmentés et continués par l'addition ou le déplacement de masses pesantes.

La meilleure preuve de la différence entre les deux causes des mouvements se trouve dans les oscillations de la période quaternaire. Je dis la meilleure, parce que, dans ce cas, les effets des deux peuvent être considérés séparément; ceci étant dû à ce que la charge ne provient pas d'un simple déplacement, et que, par conséquent, le déplacement ne dépend pas du plus ou moins de poids. Dans ce cas donc, l'élévation est en rapport avec la charge et se fait en dehors de lui. Nous savons que le surélévément a commencé pendant la dernière époque tertiaire et qu'il a été le plus fort pendant l'ancienne période glaciaire. Ce surélévément est une cause au moins, sinon la principale, de l'accumulation du froid et de la glace, mais il a continué malgré l'accroissement

du poids de la glace. Finalement cependant, le poids accumulé a dominé la force du surélévement et la surface qui s'élevait a commencé à baisser; mais ce fait ne s'est produit que parce que les forces intérieures qui y contribuaient commençaient à s'épuiser. L'affaissement a amené alors un adoucissement du climat, la fonte de la glace, un déplacement du poids et, par suite, le relèvement de la croûte telle que nous la voyons, mais à un niveau beaucoup moindre qu'il n'était antérieurement, parce que les forces d'exhaussement, quelles qu'elles fussent, s'étaient elles-mêmes épuisées. Si ce n'avait été la charge de glace, je suppose qu'au lieu de la double oscillation qui se produisit, il y aurait une simple courbure de relèvement, retombant ensuite à l'état actuel, mais s'élevant un peu plus haut et un peu plus tard que ce que nous connaissons.

Une autre question encore est de savoir combien d'espace il faut pour que s'opère l'*isostasie*. Quelle étendue et quel degré d'inégalité de surface peuvent être soutenus par la seule rigidité de la Terre?

Les observations récentes du pendule faites par Putnam à travers les continents, et discutées par Gilbert, indiquent un degré de rigidité plus grand qu'on ne l'ait encore supposé. Elles démontrent que l'arc continental est tout entier soutenu par l'*isostasie* (c'est-à-dire par le défaut de densité au-dessous du niveau de la mer — la surface continentale étant plus légère à mesure qu'elle s'élève) et que, cependant, les grandes chaînes comme les montagnes des Appalaches, du Colorado et de Wasatch n'indiquent aucun de ces moyens d'appui. Elles sont soutenues simplement par la rigidité de la Terre, et les grands plateaux eux-mêmes (par exemple celui du Colorado, qui a une étendue de 442 kilomètres) le sont presque uniquement de la même manière.

### *Chaînes de montagnes monoclinales.*

Il y a peu de temps encore, on pensait que les chaînes de montagnes avaient toutes été formées de la même façon, à savoir : par une poussée latérale qui, en repliant les couches, avait opéré un renflement de la masse le long de la ligne de moindre résistance. C'est à Gilbert que revient l'honneur d'avoir attiré l'attention sur un autre type, qu'on ne trouve nettement indiqué que dans la région des plateaux et des bassins, et spécialement dans cette dernière, à savoir : le type produit par la disposition irrégulière des blocs de la croûte terrestre entre de grandes fissures. Les deux types de montagnes forment un contraste

absolu sous tous les rapports : l'un est de structure anticlinale, l'autre de structure monoclinale ; le premier résulte d'une pression latérale et d'un plissement des couches, l'autre d'une projection des blocs latérale et irrégulière. Pour ce qui regarde leur origine, l'un prend naissance sur la limite des fonds marins, l'autre s'est formé dans la croûte continentale. Si on les classe d'après leur forme, les deux types possèdent des traits identiques : ce sont tous deux des chaînes de montagnes. Mais si on les classe d'après les forces qui les ont produits, ils appartiennent à des groupes entièrement différents des mouvements de la Terre. L'un appartient au second groupe mentionné ci-dessus ; l'autre au troisième et au quatrième groupe, puisque le surélévation des plateaux, le gonflement de la croûte et la tension qui en résulte font partie du troisième groupe, c'est-à-dire celui des mouvements oscillatoires ; tandis que la formation proprement dite des montagnes, c'est-à-dire le déplacement des roches et leur disposition irrégulière, appartiennent au quatrième groupe ou *isostasie*, lequel est un résultat absolu du rétablissement d'équilibre isostatique et constitue un des meilleurs exemples du principe. On voit par là que l'*isostasie* peut agir, dans des conditions favorables, sur une échelle comparativement petite. Les différences qui existent entre les deux types de montagnes sont donc évidentes ; ces types dérivent de catégories tout à fait distinctes des forces intérieures, et, dans le fait, tous deux ne sont pas des montagnes dans le même sens du mot. C'est pour cette raison que dans mon travail sur la conformation des montagnes, j'ai classé le second type parmi les crêtes plutôt que parmi les chaînes. Actuellement, j'en suis venu à penser qu'il vaut mieux diviser les chaînes en deux types, mais sans oublier la grande différence qui existe entre eux.

#### *Conclusions.*

Résumons-nous en quelques mots : Il existe deux espèces primitives et permanentes de mouvements de la croûte terrestre, à savoir : *a*) ceux qui produisent les grandes inégalités à la surface de la Terre, les bassins océaniques et les masses continentales ; *b*) ceux qui, par une contraction intérieure, déterminent les montagnes à structure plissée. Ces mouvements sont eux-mêmes dus à des forces intérieures qui affectent la Terre entière ; le premier provient d'une contraction radiale inégale, le second d'une contraction concentrique inégale, c'est-à-dire une contraction plus intérieure qu'extérieure. Il y a aussi deux espèces secon-

daires de mouvements, qui modifient et souvent cachent les effets des deux autres, de manière à faire mal interpréter ceux-ci ; ce sont *c*) les mouvements oscillatoires, affectant souvent de grandes surfaces, qui ont été les plus communs et les plus marquants de tous les mouvements à toutes les époques géologiques, et sont encore actuellement les seuls bien visibles et mesurables, mais auxquels aucune cause n'a été assignée et auxquels aucune théorie rationnelle n'a pu être appliquée ; et *d*) les mouvements isostatiques qui transportent la matière de place en place par érosion et par sédimentation, ou bien par l'accumulation et le retrait de la glace, et encore par l'équilibration de grandes portions de la croûte. Si les mouvements oscillatoires (*c*) masquent ou affaiblissent les effets de la formation des bassins et des continents, l'*isostasie* (*d*) cache et obscurcit l'interprétation de toutes les autres opérations et spécialement (*b* et *c*) celles des forces qui élèvent les montagnes, et les forces des mouvements oscillatoires. En réalité, l'*isostasie* passe, dans l'esprit de certains savants, pour avoir la haute main sur tout ce qui concerne les mouvements de la croûte terrestre. Aucun progrès ne pourra, du reste, être fait sur ce terrain tant que nous n'aurons pas établi nettement la distinction entre ces différents mouvements et leurs causes.

