

Coligny

Marcel Bertrand

Deformation tectonique de la terre

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXXX,
séance du 19 février 1900.

Déformation tétraédrique de la Terre et déplacement du pôle;

PAR M. MARCEL BERTRAND.

« Lowthian Green ⁽¹⁾ a le premier signalé, dans les traits de la géographie actuelle, les éléments d'une symétrie tétraédrique.

» Il y a, suivant trois fuseaux méridiens, trois Océans qui séparent (en admettant une continuation virtuelle de la mer Rouge vers le nord) trois masses continentales d'importance à peu près équivalente. Chacun des continents a sa pointe tournée vers le sud, où elle se perd dans une mer circumpolaire, entourant un continent antarctique; les pointes sont déviées vers l'est et, vers le milieu de chaque masse continentale, il y a une coupure, une grande dépression presque équatoriale : la Méditerranée entre l'Europe et l'Afrique, les détroits de la Sonde entre l'Asie et l'Océanie, l'isthme de Panama, entre les deux Amériques. C'est cette dépression qui, prolongée par la pensée à travers les Océans, forme au globe une ceinture continue et a reçu par extension le nom de *dépression méditerranéenne*.

» Lowthian Green a, je crois, le premier appliqué le principe d'isostasie, en expliquant que le soulèvement des continents au nord et leur abaissement progressif au sud suffisait, par suite de la rotation de la Terre (les points arrivant à leur nouvelle

⁽¹⁾ *Vestiges of the molten globe*, London, 1873.

position avec une vitesse ou trop grande ou trop faible), à produire la déviation vers l'est des pointes méridionales. Il a été plus loin et a suggéré que le mouvement inverse des parties nord et sud avait pu, par torsion, produire la dépression méditerranéenne. Pour lui, la Terre serait assimilable à un tétraèdre presque régulier, à faces et arêtes assez courbes pour s'écarter très peu de la sphère terrestre; le sommet du tétraèdre serait au pôle Sud et la base serait formée par un plan passant par les centres de gravité des trois masses continentales.

» Lowthian Green a poussé très loin les conséquences de cette assimilation, jusqu'à en déduire, par la discussion de l'attraction du Soleil sur les saillies tétraédriques (comparables comme masse au bourrelet équatorial), l'angle de l'équateur avec l'écliptique.

» Mais un tétraèdre fixe ne peut rendre compte de l'incessante variation des formes du globe, et la brillante conception de Lowthian Green est restée stérile pour la géologie, jusqu'au jour où M. Michel-Lévy eut l'idée, simple et féconde ⁽¹⁾, d'appliquer la même notion à l'étude des roches volcaniques. M. Michel-Lévy considéra l'ensemble des roches tertiaires et montra que la plupart d'entre elles se coordonnent suivant les arêtes d'un tétraèdre presque régulier. Ce tétraèdre n'est plus celui de Lowthian Green; il n'a plus son sommet au pôle Sud, mais à un point qui en est distant d'une vingtaine de degrés.

» Les roches volcaniques sont sorties par des lignes de fractures; M. Michel-Lévy substituait donc à la notion un peu arbitraire des formes géographiques, un phénomène précis et bien défini; il a pu en conclure, non plus que la Terre tend vers une figure tétraédrique, mais qu'elle se fend suivant les arêtes d'un tétraèdre. De plus, en ne faisant plus passer au pôle l'axe de ce tétraèdre, il suggérait implicitement ⁽²⁾ l'idée de son déplacement probable dans les temps géologiques.

» M. Michel-Lévy, en appliquant son étude à l'ensemble des roches tertiaires, se donnait un certain jeu, et il en a naturellement profité pour choisir, entre toutes les figures possibles, celle qui se rapprochait le plus d'un tétraèdre régulier. Il a fort heureusement ainsi remis en faveur l'idée de la déformation tétraédrique, conforme au fond à ce que donnent les expériences de Fairbairn, sur l'écrasement des tubes à section circulaire. Cette première approximation était presque nécessaire pour que la notion de l'importance théorique du tétraèdre pût se dégager et se répandre. Une fois cette importance admise, au lieu de négliger, comme on en aurait été tenté, le tétraèdre vrai et dissymétrique, on se dit que, s'il n'est plus régulier, il l'a été et qu'il ne l'est plus, *parce qu'il a été déformé*.

» Il n'en est pas moins vrai que la conception du tétraèdre ne pouvait porter tous ses fruits, tant que l'idée de symétrie primait celle de variabilité, et tant que l'on ne s'attachait pas à ne considérer que le tétraèdre relatif à une époque bien déterminée. C'est ce que j'ai essayé de faire en ne

⁽¹⁾ *Sur la coordination et la répartition des fractures et des effondrements de l'écorce terrestre (Bull. Soc. Géol., 3^e série, t. XXVI, p. 105).*

⁽²⁾ M. Michel-Lévy conclut à la fixité probable des arêtes méridiennes, et à une variabilité des arêtes de base autour de leur position moyenne.

m'occupant que des éruptions actuelles. J'ai pris simplement une carte des volcans actuels ou historiques, et je les ai joints par des lignes continues. Là où les intervalles étaient trop grands, je me suis servi du principe que les éruptions ont lieu suivant les lignes de dépression, et j'ai trouvé ainsi que toutes les éruptions actuelles, *sans exception*, s'ordonnent suivant six lignes légèrement sinueuses que, pour simplifier le langage, j'appellerai des grands cercles déformés. Trois d'entre eux dessinent la zone méditerranéenne et se coupent deux à deux aux points de rencontre des lignes méridiennes. Les trois autres vont converger non loin des pôles. Pour que les six lignes comprennent réellement tous les points volcaniques, il faut admettre en outre que localement elles s'épaississent en quelque sorte ou plutôt se dédoublent pour embrasser des aires de dépression ou d'activité volcanique (*fig. 1*). Le fait est notamment marqué pour quatre des sommets (¹), comme si les pointes tétraédriques y étaient remplacées par quatre tronçatures.

» En réalité, si l'on remplace les trois cercles de la zone méditerranéenne par les trois côtés d'un triangle moyen, on voit que les lignes de la figure dessinent deux tétraèdres opposés par la base, avec six de leurs arêtes médianes.

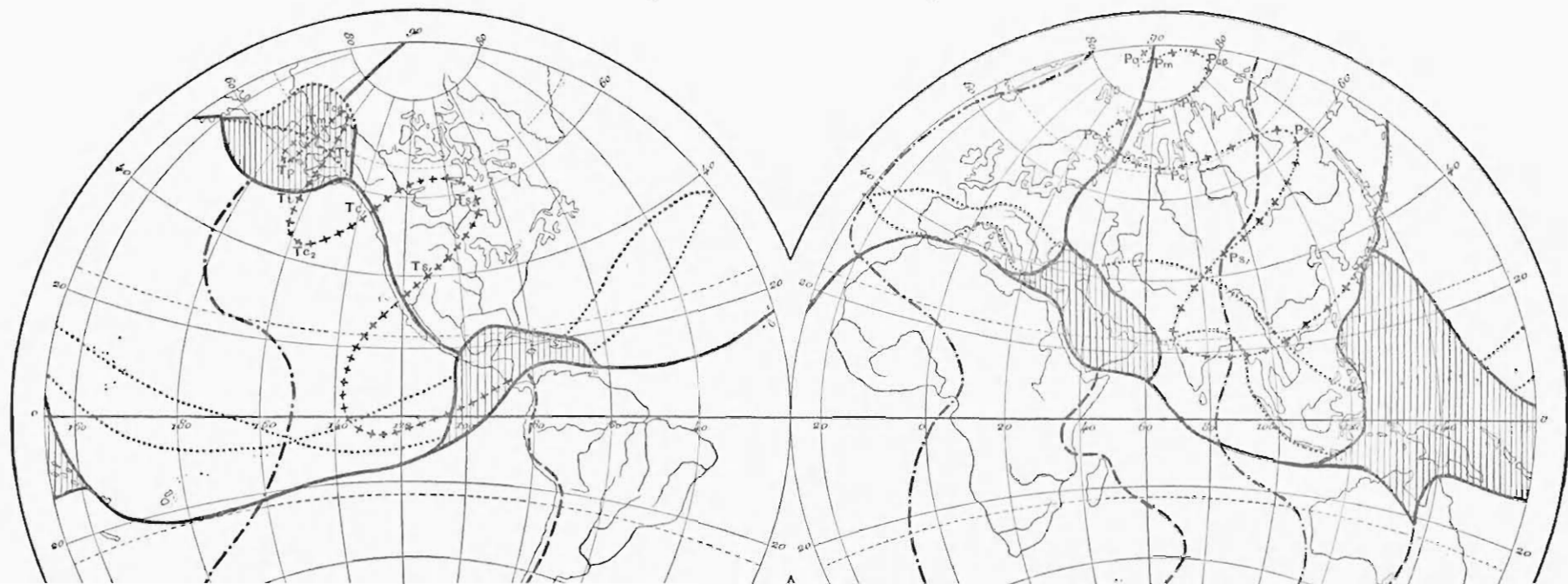
» Entre ces deux tétraèdres, la répartition des événements volcaniques se fait à peu près également; il n'y aurait donc pas lieu, d'après la figure, d'attacher plus d'importance à l'un qu'à l'autre; mais la spécialisation des éruptions suivant les six grands cercles indique avec évidence que ce sont les lignes suivant lesquelles les matières lourdes et fondues de l'intérieur sont les plus rapprochées de la surface. Ce sont donc précisément les lignes dont j'ai parlé dans ma Note précédente et le long desquelles, par suite de l'augmentation de la pesanteur, se forment les géosynclinaux qui précèdent les chaînes de montagnes. Or, quand nous suivrons le déplacement de la figure dans les temps géologiques, nous verrons que toutes les chaînes, à l'exception des Andes, se sont formées suivant les arêtes du tétraèdre nord; c'est donc celui qu'il importe de considérer; c'est celui dont les arêtes ont été marquées en traits pleins sur la figure.

» Ce tétraèdre est très loin d'être régulier, plus même que ne l'est le tétraèdre sud; mais tel qu'il est, et par cela seul qu'il est vrai, il devient un merveilleux instrument de recherches, qui conduit sans effort à des conséquences capitales.

(¹) Il en serait probablement de même, si l'on avait plus de documents, pour le cinquième sommet, près du pôle Sud.

Fig. 1

TÉTRAÈDRE DES FRACTURES VOLCANIQUES et ligne de déplacement du pôle



$T_m, T_{ce}, T_t, T_{cs}, T_{cs}, T_{s_2}, T_{s_1}$, courbe de déplacement du sommet du tétraèdre.

$T_m, T_{ce}, T_t, T_{cs}, T_{cs}, T_{s_2}, T_{s_1}$, positions du sommet du tétraèdre, aux époques actuelle, quaternaire, miocène, cénomanienne, triasique et à celles du carbonifère supérieur (c_2), du carbonifère inférieur (c_1), du silurien supérieur (s_2) et du silurien inférieur ou cambrien (s_1).

$PP_a, P_m, P_t, P_{cs}, P_s$, courbe auxiliaire de déplacement relatif du pôle.

Nota. — Les deux lignes pointillées, dans le sud de l'Asie ont été mal reproduites et devraient se couper sur l'arête médiane.

» Et d'abord, un des sommets est, auprès du détroit de Behring, *sur le cercle polaire*. Or, dans l'origine, par raison de symétrie, un axe du tétraèdre devait coïncider avec l'axe de rotation. De plus, du moment que l'axe des pôles est variable, qu'on ne peut plus le considérer comme ayant une position fixe déterminée par une impulsion initiale, il a dû certainement au début coïncider avec l'axe de l'écliptique. A l'origine de l'histoire de la Terre, l'axe de l'écliptique, l'axe des pôles et l'axe du tétraèdre ne faisaient qu'une seule et même droite. L'axe des pôles ne coïncide plus avec l'axe, sensiblement invariable, du système solaire; il s'est donc déplacé. Le sommet du tétraèdre est sur le cercle polaire; l'axe des pôles s'est donc déplacé par rapport à lui du même angle qu'il s'est déplacé par rapport à l'écliptique.

» On peut se demander, il est vrai, si ce n'est pas là un simple hasard, ou un fait accidentel, spécial à l'époque actuelle. D'autres coïncidences, plus singulières encore, m'ont empêché de m'arrêter à cette idée. J'ai montré autrefois que l'écorce terrestre se plisse suivant un système fixe de lignes orthogonales, figurant un réseau de méridiens et de parallèles; j'avais dès lors fait remarquer que le point de croisement des méridiens devait marquer la position originelle du pôle au début des temps géologiques. J'avais dit que le point de convergence était situé au-dessus de l'île Patrick (¹); mais, en reprenant mes anciens tracés, j'ai vu qu'on pouvait seulement répondre de l'existence d'un faisceau très aminci, et non d'un point géométrique de convergence. Or ce faisceau aminci, prolongé de quelques degrés, va passer au sommet du tétraèdre. D'autre part, Lowthian Green a indiqué que la dépression méditerranéenne, avec son prolongement par la région des détroits de la Sonde et de l'isthme de Panama, dessine assez exactement un petit cercle dont l'angle avec l'équateur est égal à l'angle de l'écliptique. Le pôle de ce petit cercle vient encore se placer au sommet du tétraèdre.

» Toutes ces coïncidences me semblent légitimer la conviction que le sommet du tétraèdre était le pôle primitif, et que l'axe qui lui correspond était l'axe primitif de rotation. Cet axe, par suite de la rotation actuelle, décrit journellement un cône, dont l'axe de l'écliptique est une des génératrices. Si l'on suppose la rotation de la Terre arrêtée, à quelque moment qu'on l'arrête et quelque mouvement propre qu'on prête à l'axe du tétraèdre par rapport à l'écliptique, l'axe des pôles doit prendre part soli-

(¹) *Bull. Soc. Géol.*, 3^e série, t. XX, p. 164.

dairement à ce mouvement, pour que la distance angulaire du sommet et du pôle reste celle qui est donnée par l'observation. Tant que nous n'aurons donc à parler que de mouvements relatifs à la Terre, nous pourrions raisonner comme si l'axe du tétraèdre restait fixe. En d'autres termes, l'axe du tétraèdre et, par conséquent, le tétraèdre ne participent pas au mouvement qui entraîne et fait varier de position l'axe des pôles.

» Il y a là une difficulté qui m'a longtemps arrêté. Comment concevoir un déplacement appréciable du pôle sans un déplacement d'ensemble des inégalités de la surface? Et comment ce déplacement n'entraîne-t-il pas le sommet du tétraèdre? Il faut se souvenir, pour expliquer la chose, que le tétraèdre de surface, comme je l'ai montré, se dessine sous l'influence des inégalités de pesanteur déterminées par l'existence d'un tétraèdre interne; c'est donc en quelque sorte un tétraèdre *réfléchi*. On peut se figurer l'écorce terrestre comme un miroir qui reflète, avec un certain retard, un état de choses existant à l'intérieur. Or si, dans un miroir mobile, l'image d'un point reste fixe, c'est que ce point ne participe pas au mouvement du miroir; l'intérieur de la Terre ne participe donc pas au mouvement de la surface, et ce mouvement se réduit à l'entraînement d'une mince couche superficielle. C'est le résultat que j'ai déjà indiqué et que j'ai traduit par la comparaison de la Terre avec une orange à écorce mobile.

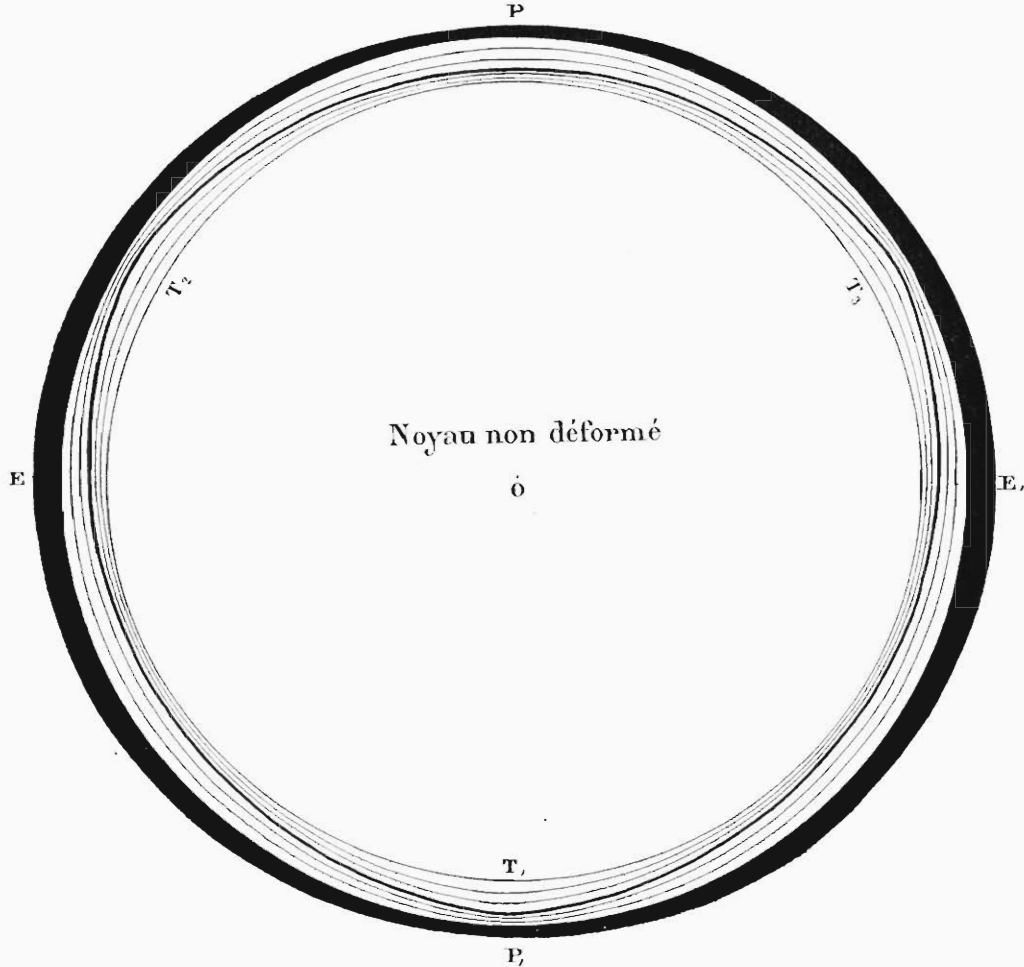
» Dans cette manière de voir, le tétraèdre ne représente que la forme des surfaces d'égale densité, déformées par le refroidissement. Pour comprendre la portée de cette conclusion, il faut se reporter à la théorie du refroidissement. Cette théorie, au point où l'ont menée les travaux des physiciens anglais ⁽¹⁾, nous montre (*fig. 2*) un noyau central, composant la masse principale de la Terre (plus des $\frac{9}{10}$ du volume), dans lequel la température n'a pas pratiquement varié; au-dessus vient une enveloppe de 600^{km} environ, où chaque couche se refroidit trop pour occuper la place que lui impose la condition de constante application sur le noyau, et est par conséquent comprimée verticalement, avec tendance à l'extension. Au-dessus se trouve une couche de *nulle tension*, puis une écorce mince qui ne se refroidit pas assez, qui par suite est soumise à des compressions tangentielles et doit se plisser. C'est le plissement de cette écorce que M. Fisher ⁽²⁾ juge avec raison insuffisant pour expliquer les inégalités de

(¹) *Distribution of strain in the earth's crust*, by Ch. Davison, *with a note*, by G.-H. Darwin, *Phil. transactions of the Royal Society*, vol. CLXXVIII (1887).

(²) *Physics of the earth's crust*, by the Rev. Osmond Fisher, 2^e édit., Londres, 1889.

la surface; j'ai montré, en effet, que ces inégalités sont surtout dues à la répercussion des changements internes qui correspondent, dans la couche

Fig. 2.



Coupe à l'échelle de la déformation tétraédrique de la Terre, dans l'hypothèse d'un tétraèdre régulier.

Échelle $\frac{1}{100000000}$.

L'épaisseur de l'écorce mobile (trait noir) est plus que décuplée.

de 600^{km} soumise à des efforts d'extension, à des différences de volume trois cents fois plus considérables. Le plissement de l'écorce n'est qu'un phénomène qui se superpose à des changements d'un ordre beaucoup plus grand.

» Les changements dont le tétraèdre superficiel nous reflète l'existence

se passent donc dans la couche de 600^{km}, et nous pouvons dire quels sont ces changements : chaque couche sphérique est comprimée pour aller occuper sans discontinuité sa nouvelle position, et, sous l'influence de ces compressions normales, elle se transforme en un tétraèdre à angles émoussés. En se fondant sur la courbe donnée par M. Davison, on trouve que la forme tétraédrique doit être surtout accusée à la profondeur de 100^{km}; puis elle va s'atténuant de part et d'autre, à la fois du côté du noyau et du côté de la couche de nulle tension (*fig. 2*).

» Il est clair maintenant que c'est suivant la couche de nulle tension, entre la zone qui se contracte et celle qui se distend, que doit avoir lieu le *décollage*, et que c'est sur cette surface, avec de nouvelles couches sans cesse entraînées par le frottement, que doit se produire le glissement de l'écorce mobile. M. Darwin évalue l'épaisseur de cette écorce à moins de 4^{km} (2 milles). Ce nombre s'accorde bien avec les données géologiques, pourvu que cette épaisseur soit prise, non au-dessous de la surface actuelle, mais au-dessous d'une sphère de comparaison passant par les pôles et ne tenant pas compte des inégalités de la surface, y compris le bourrelet équatorial (1). Il convient aussi de rappeler que l'épaisseur de cette écorce croît proportionnellement au temps. La *fig. 2* représente la déformation tétraédrique théorique; les *fig. 3* et *4* représentent approximativement, avec un peu d'exagération, deux coupes de la déformation actuelle. En combinant ces deux coupes avec la Carte, on voit que le tétraèdre s'est aplati, que deux de ses arêtes se sont rapprochées et que les prolongements des arêtes tendent à jouer un rôle équivalent à celui des arêtes elles-mêmes.

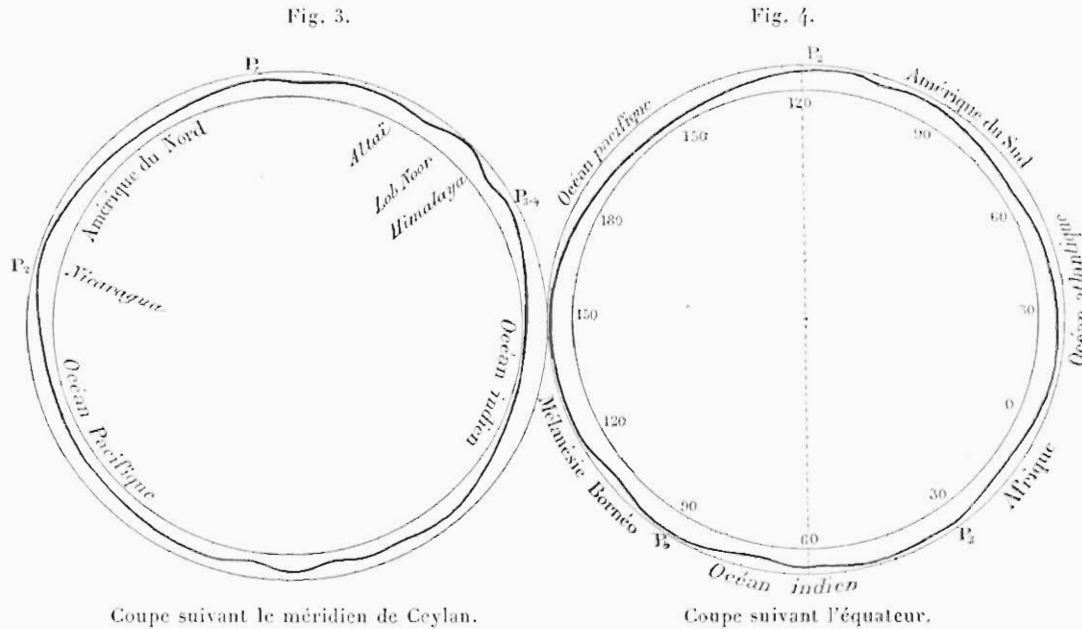
» Revenons maintenant au tétraèdre de surface; il résulte, comme je l'ai expliqué, des différences de pesanteur déterminées par l'existence du tétraèdre interne. Les chaînes de montagnes se forment au-dessus des arêtes, et les chaînes méditerranéennes en particulier, au-dessus des arêtes de base. Ces chaînes méditerranéennes, au moment de leur formation, faisaient donc en moyenne avec l'équateur terrestre un angle égal à celui de l'écliptique (2). Mais on peut préciser : on connaît plusieurs phases dans la

(1) En effet, le calcul de M. Darwin ne fait pas entrer en ligne de compte la température de chaque couche, mais seulement sa dérivée $\frac{dv}{dx}$, qui n'est pas sensiblement modifiée par l'adjonction à une sphère théorique des inégalités de la surface, puisque théoriquement elle est actuellement constante jusqu'à une profondeur de 30^{km}.

(2) Cette proposition et les suivantes concernent évidemment l'équateur ancien; mais, si étrange que cela puisse paraître, *elles s'appliquent aussi à l'équateur actuel*. Nous verrons, en effet, que le déplacement du pôle se décompose en deux mouvements,

formation d'une chaîne, et en particulier celles qui sont mises en évidence par les grandes transgressions. La transgression du début de la chaîne (dévonien supérieur, permien supérieur, helvétien) nous fait connaître la ride formée au début au nord de la cuvette géosynclinale; la transgression

Coupe approximative, un peu exagérée, de la déformation tétraédrique actuelle.



Coupe suivant le méridien de Ceylan.

Coupe suivant l'équateur.

Nota. — La ligne de déformation aurait dû, sous les Océans, être marquée voisine du cercle extérieur.

du milieu de la chaîne (silurien supérieur, stéphanien, cénomaniens) nous fait connaître une nouvelle ride formée au centre de la chaîne.

» Chacune de ces deux rides permet de déterminer la position du sommet du tétraèdre à l'époque correspondante. Mais, de plus, à chaque instant, le fond de la cuvette géosynclinale marque la ligne où s'accumule la plus grande épaisseur de sédiments. On peut donc énoncer ce théorème :

» *Si pour une couche quelconque, dans la région méditerranéenne, on déter-*

dont l'un est un déplacement d'ensemble, qui ne change pas la position du pôle (ni, par suite, de l'équateur) par rapport à la géographie terrestre, et dont l'autre est une rotation autour de l'axe du tétraèdre, qui ne déplace pas le petit cercle situé dans le plan de base. Les chaînes méditerranéennes, par l'angle de leurs lignes directrices avec l'équateur actuel, nous font donc connaître l'ouverture du cercle polaire au moment des différentes phases de leur formation.

mine la zone de plus grande épaisseur (l'axe commun des courbes d'égale épaisseur), on trouvera une ligne voisine d'un petit cercle, dont l'angle avec l'équateur est égal à l'angle de l'écliptique au moment du dépôt; le pôle du petit cercle est le sommet du tétraèdre. C'est pour la même raison que le petit cercle méditerranéen est incliné de 23° sur l'équateur.

» On conçoit ainsi que la géologie nous donne le moyen de déterminer à chaque instant la position de l'axe du tétraèdre. La courbe que je donne (*fig. 1*) n'est qu'une première approximation; mais je suis sûr d'un nombre suffisant de points pour affirmer que l'allure générale est bien exacte, ainsi que le déplacement moyen le long de la côte américaine du Pacifique. La forme de cette courbe correspond d'une manière remarquable à ce qu'avait fait prévoir la théorie des chaînes de montagnes; pour essayer d'en déduire le déplacement du pôle, il faut revenir sur l'étude géologique de la formation des chaînes simultanées et chercher leur influence sur le déplacement du pôle d'inertie.

» Quand une chaîne de montagnes se forme suivant une arête du tétraèdre, d'autres chaînes se forment simultanément suivant d'autres arêtes.

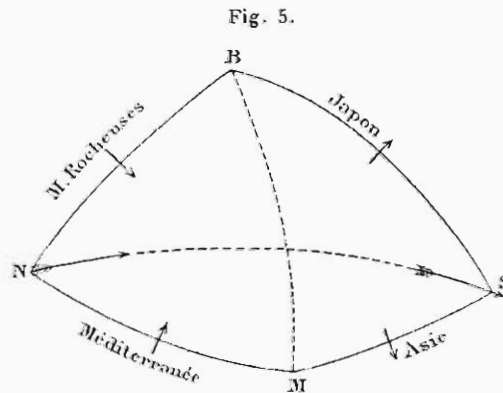


Schéma des chaînes de montagnes tertiaires.

Ainsi, dans la période tertiaire (*fig. 5*), on peut distinguer quatre chaînes, correspondant à autant d'arêtes d'un tétraèdre peu éloigné du tétraèdre actuel; ce sont, d'une part, une chaîne européenne (Alpes) et une chaîne américaine (montagnes Rocheuses); d'autre part deux chaînes asiatiques (Himalaya et chaînes d'îles du Japon). Ces quatre arêtes forment une courbe fermée qui entoure toute la Terre. Or on sait que dans les deux premières les charriages ont eu lieu vers l'intérieur du tétraèdre; par conséquent, pour que les mouvements ne se compensent pas, et pour qu'il se produise l'entraînement dont témoigne la courbe décrite par le sommet T,

il faut que le charriage des deux chaînes asiatiques ait lieu vers l'extérieur du tétraèdre. En d'autres termes, le déplacement de la matière en Asie a eu lieu vers le sud et vers l'est; c'est ce qu'a montré, en effet, M. Suess (1).

» Il est clair, par raison de continuité, que la formation des chaînes ne peut pas sauter brusquement d'une arête à une autre. C'est donc toujours la même courbe, formée des quatre mêmes arêtes, qui, à de certains moments, par le mécanisme indiqué, déforme l'écorce au passage et détermine sur le globe une nouvelle ceinture de montagnes. Dans les tétraèdres successifs, ce sont donc toujours les mêmes arêtes qui restent inactives; pour le tétraèdre des temps secondaires et tertiaires, ces arêtes inactives ont été: l'arête méridienne qui passe en Russie et aboutirait à la mer Morte, arête qu'on peut appeler l'*arête moscovite*, et l'arête méditerranéenne qui traverse le Pacifique, entre le lac de Nicaragua et les îles de la Sonde.

» J'ai essayé de reconstruire les tétraèdres des chaînes carbonifères et siluriennes, en choisissant l'époque de début des chaînes, c'est-à-dire l'époque dinantienne et l'époque cambrienne (*fig. 6*). On retrouve bien pour chacun d'eux les quatre chaînes, formant au globe une ceinture complète, pourvu qu'on suppose au fond du Pacifique, en face des Andes, l'existence d'une chaîne disparue. Les arêtes inactives pour la première sont l'arête des montagnes Rocheuses et l'arête méditerranéenne asiatique; pour la seconde (2), ce seraient l'arête du Japon et l'arête méditerranéenne atlantique. On voit donc que, d'une chaîne à l'autre, il y a rotation de 120° environ autour de l'axe des tétraèdres (3), et que les arêtes méridiennes s'échangent d'une chaîne à l'autre; c'est ce qui explique comment elles semblent occuper toujours à peu près la même position à la surface du globe.

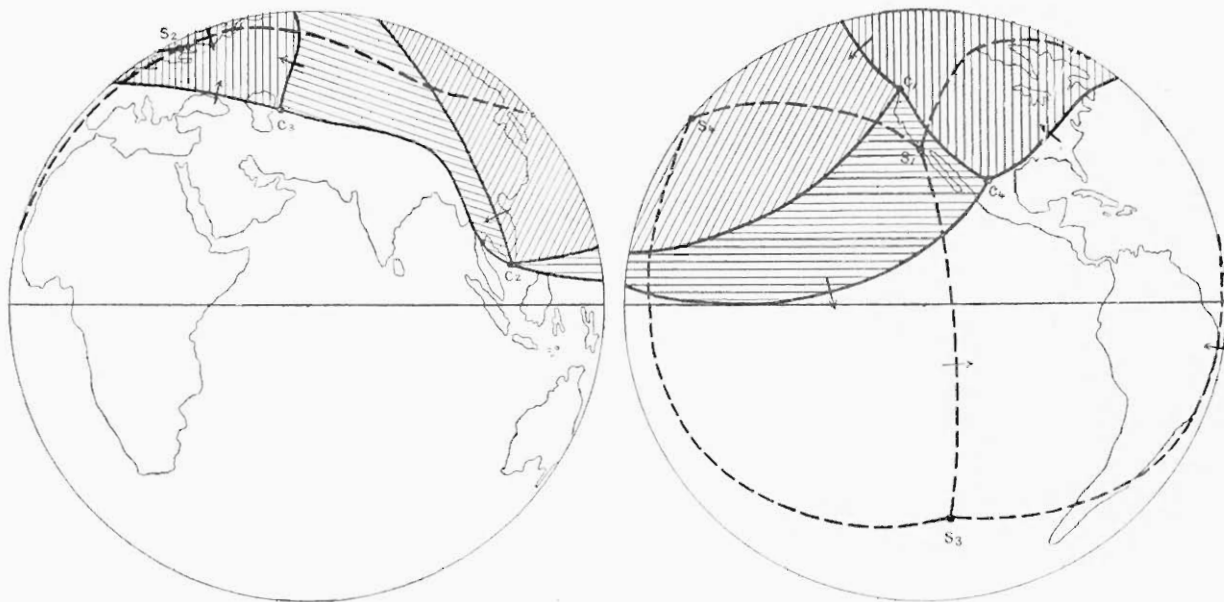
(1) C'est là le seul point, avec l'impossibilité des soulèvements en masse, sur lequel je n'étais pas arrivé à me laisser convaincre par les arguments de M. Suess. C'est avec une grande satisfaction que j'ai vu ici la théorie lui donner raison. On me permettra à cette occasion de rendre hommage au maître incomparable qui a transformé la Géologie, qui a poussé la synthèse au point de rendre possible un essai de théorie, et qui partout a si bien compris et deviné les conséquences des faits observés, que la théorie, pour ne pas s'égarer, n'a qu'à suivre ses indications.

(2) Le tétraèdre cambrien montre un point important. La chaîne scandinave fait à ce moment partie de l'arête asiatique; on s'expliquerait ainsi comment M. Törnebohm a trouvé dans cette chaîne des charriages dirigés vers le sud-est.

(3) En réalité, c'est seulement entre les deux tétraèdres carbonifère et triasique que l'angle est sensiblement de 120°; il est un peu plus grand entre les tétraèdres de la *fig. 6*, et un peu moindre entre les tétraèdres triasique et actuel. Cela peut tenir à la déformation du tétraèdre, mais cela peut aussi suggérer l'idée que le mouvement de rotation, comme tous les autres, s'amortit avec le temps.

Il résulte de là que le tétraèdre tourne autour de son axe, d'un mouvement qui n'entraîne pas l'écorce, et dont il faut tenir compte si l'on veut déterminer la position du pôle, d'après la position à chaque époque du sommet du tétraèdre. Ce mouvement de rotation est très probablement, comme je

Fig. 6.



Tétraèdres des débuts des périodes carbonifère et silurienne.

Nota. — Le tétraèdre carbonifère a été mal reproduit. L'arête marquée dans le Pacifique n'existe pas; l'arête indo-chinoise devrait rejoindre le sommet en passant au-dessous du détroit de Behring.

l'expliquerai, le résultat de l'attraction différente du Soleil sur les saillies du tétraèdre interne et sur celles du tétraèdre de surface. Le mouvement apparent est dans le sens direct; le mouvement du tétraèdre est donc *rétrograde*.

» Pour arriver à construire les positions du pôle, il faut encore savoir s'il n'a pas un mouvement propre par rapport à la Terre. Or, en reprenant la *fig. 5*, on peut se rendre compte, d'après les formules auxquelles j'ai déjà renvoyé ⁽¹⁾, du déplacement du pôle d'inertie provoqué par la formation des quatre chaînes simultanées. On voit que les actions se compensent très sensiblement deux à deux, malgré les légères différences de latitude des centres de gravité des masses déplacées, d'une part dans

(1) TISSERAND, *Mécanique céleste*, t. II, p. 487.

les deux chaînes méditerranéennes, de l'autre dans les deux chaînes méridiennes. Le déplacement résultant est donc très petit ⁽¹⁾, se comptant pour la période correspondante plutôt par secondes que par minutes; il est, en tout cas, bien inférieur au degré actuel de précision des déterminations géologiques.

» Pour obtenir maintenant la position du pôle à chaque moment des périodes géologiques, il convient de considérer successivement les deux déplacements relatifs du pôle par rapport au tétraèdre; le premier, dû aux charriages, est un déplacement relatif par rapport au sommet; le second, dû à l'attraction solaire, est un déplacement par rapport aux arêtes. Le premier permet, à l'aide de deux rotations de 180° , l'une autour du point T_a , l'autre autour du milieu de l'axe T_aP (voir la carte, *fig. 1*), de construire une courbe auxiliaire, que j'ai marquée sur la figure avec des croix séparées par des points. Il faudra ensuite déduire chaque point du point correspondant P_c de cette courbe auxiliaire par une rotation convenable autour du pôle. Il faut opérer de proche en proche; si, entre deux positions successives, il y a l'intervalle d'une chaîne de montagnes, la rotation devra être de 120° ; si l'intervalle est moindre, la rotation devra être diminuée proportionnellement. On obtient ainsi une spirale (non tracée sur la carte) qui s'enroule autour du pôle actuel en s'en éloignant progressivement, et qui irait passer au point P_c de la courbe auxiliaire.

» La spirale donne la position du pôle à une époque quelconque; autant que j'ai pu voir, ces déterminations s'accordent bien avec le peu qu'on sait sur la distribution des anciens climats. A chaque moment, la position correspondante du point T donne, par sa distance au pôle actuel, l'ouverture du cercle polaire.

» Revenons à l'examen de la courbe des points T; elle décrit autour de l'arête (bord du Pacifique) une série de demi-ellipses, dont chacune correspond à la formation d'une chaîne. Le demi-axe de chaque ellipse va en augmentant à mesure qu'on s'éloigne de l'époque actuelle.

» Or, on trouve que les longueurs de ces axes sont égales aux nombres 1, 3, 5 et 7; la longueur totale est donc, à une constante près, proportion-

(1) M. Wallerant m'a fait remarquer que le moment des couples de rotation est facile à calculer, et égal à $2FR$, F étant la force d'entraînement correspondant à un des quatre charriages (supposés égaux) et R le rayon de la Terre. L'axe de rotation, si le tétraèdre était régulier, serait dans le plan de l'arête moscovite, à $35^\circ 16'$ au-dessous de la base méditerranéenne; cet axe serait donc (pour l'époque actuelle) à peu près dans le plan de l'équateur.

nelle au carré du temps, compté en nombre n de chaînes à partir de l'époque actuelle. Mais j'ai montré que la grandeur du déplacement pour chaque chaîne était déterminée par la quantité de mouvement correspondant au déplacement de la matière sédimentaire qui doit former la chaîne; elle est donc inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'écorce mobile, laquelle, d'un autre côté, comme je l'ai dit, est proportionnelle au temps (1). On peut donc écrire

$$(1) \quad e = \frac{K}{n^2 - A} = mt.$$

» Les constantes peuvent se déterminer en faisant des hypothèses sur la première chaîne (position initiale du sommet au pôle Nord, et entraînement d'une écorce d'épaisseur minima). Sans entrer dans le détail, et en ne tenant pas compte de la réserve faite dans la note, au bas de la page, on trouve en prenant pour unité de longueur le mètre, et pour unité de temps cent millions d'années : $m = 38$, $K = 5500$, $A = \frac{1}{100}$. On voit que la durée de formation d'une chaîne va toujours en augmentant, et qu'on peut déduire de là la durée relative à chaque chaîne.

» La formule (1) peut se mettre sous une forme plus commode, en numérotant les chaînes à partir de l'origine des temps; soient alors N le numéro d'ordre d'une chaîne, T le temps de formation de la première chaîne, t le temps total écoulé jusqu'à l'achèvement de la chaîne considérée; on aura $t = TN^2$. On voit ainsi que les durées des chaînes successives sont proportionnelles aux nombres 1, 3, 5, 7, 9, que la durée d'une chaîne d'ordre N est $(2N - 1)T$, et que le rapport des durées de deux chaînes successives est $\frac{2N + 1}{2N - 1}$, c'est-à-dire qu'il tend vers l'unité, en lui restant toujours supérieur.

» On peut même peut-être arriver à faire une hypothèse plausible sur la position initiale du point T , et sur le nombre des chaînes qui ont précédé la période précambrienne, à l'aide des considérations suivantes : la courbe des sommets du tétraèdre serpente autour d'une arête, en se rapprochant manifestement d'un point final, assez voisin de la position actuelle. Or, l'arête du tétraèdre était primitivement un grand cercle méridien; le point d'aboutissement devrait, semble-t-il, par raison de symétrie, coïncider

(1) La formule approchée de Darwin (*loc. cit.*, p. 256) ne s'applique qu'au cas où l'écorce mobile n'est pas très mince, et par conséquent où le temps n'est pas très petit. Il restera donc toujours par cette méthode une inconnue indéterminée; c'est, si l'on veut, le temps de formation de la première chaîne.

avec le point de départ; *l'arête du tétraèdre devrait donc encore passer au pôle actuel*, qui devrait être voisin du point asymptote de la courbe. Il faut donc qu'une nouvelle action ait, en outre des mouvements déjà constatés, déplacé le tétraèdre dans l'espace. Cette action, Lowthian Green l'a indiquée, en analysant l'effet de l'attraction du Soleil sur les bourrelets tétraédriques; il a trouvé que le déplacement devait être précisément de 23° (1). Avec la nouvelle conception du tétraèdre, le problème resterait à peu près le même, si le tétraèdre de surface coïncidait comme position et comme importance relative avec le tétraèdre interne. La coïncidence n'a lieu qu'avec un retard, ce qui explique le mouvement différentiel du noyau et de l'écorce, dont j'ai déjà parlé.

» On se trouve donc ainsi amené à supposer que le sommet du tétraèdre est parti du pôle Nord, et qu'il revient maintenant près de son point de départ, après avoir décrit une révolution complète. Mais, si l'on admet, comme il est naturel, la constance de la loi trouvée plus haut, on obtiendra les positions successives du sommet du tétraèdre au début de chaque chaîne, en portant sur la même arête la longueur 9 pour la chaîne précambrienne ou huronienne, et les longueurs 11, 13, etc., pour les chaînes des temps anciens, qui ne sont représentés pour nous que par les gneiss. Il est assez curieux que les deux longueurs 11 et 13 mènent auprès du sommet austral; les longueurs 15, 17 et 19 ramèneraient à peu près au pôle boréal. Mais si l'on tient compte du refroidissement de la Terre, il n'est pas déraisonnable de supposer que la contraction du rayon a été des $\frac{21}{100}$ (2). Il faudrait donc ajouter une nouvelle chaîne, et le temps de formation des gneiss correspondrait à celle de six chaînes distinctes, c'est-à-dire à trente-six fois la durée de la première chaîne.

» On peut d'ailleurs indiquer le principe d'une autre méthode pour

(1) Je sais, sans avoir pu encore retrouver l'indication exacte, que le calcul de Lowthian Green a été repris et déclaré correct par un astronome anglais.

(2) M. de Lapparent a montré, par un raisonnement ingénieux, fondé sur la masse spécifique des gneiss, que cette contraction ne pouvait pas être supérieure à $\frac{22,5}{100}$.

Si la contraction a été réellement voisine de ce nombre, il faudrait en conclure que la différenciation des densités avec la profondeur était encore peu accusée au moment de la solidification de la première écorce, M. Munier-Chalmas pense au contraire que nous ne savons rien sur la masse spécifique de cette première écorce, et pour avoir, à son avis, le temps nécessaire à l'évolution des êtres animés, il faudrait plutôt admettre que le sommet du tétraèdre a fait au moins une double révolution.

calculer, et même pour calculer de deux manières, l'âge de la Terre. Si l'on admet que le tétraèdre devait, à l'origine, être régulier, sa figure actuelle montre combien il s'est déformé. Des constructions plus sévèrement discutées permettront de suivre sa déformation dans le cours des temps. Or cette déformation tient évidemment à l'augmentation de la vitesse de rotation, c'est-à-dire à la contraction de la Terre. L'augmentation de vitesse peut à chaque instant se décomposer en deux, l'une suivant l'axe de rotation primitif, l'autre suivant une droite perpendiculaire, située dans le plan d'une arête; la première composante aplatit le tétraèdre; la seconde rapproche les deux autres arêtes. On pourra calculer cette double déformation en fonction de la vitesse, c'est-à-dire en fonction de la diminution du rayon ⁽¹⁾, et celle-ci, par le calcul du refroidissement, donnera le temps écoulé pour chaque variation de vitesse.

» Dans la théorie que j'ai donnée de la formation des montagnes, je n'ai tenu compte que des traits principaux et essentiels, mais je suis convaincu qu'on pourra aller plus loin dans le détail; d'autres traits (ainsi les grandes transgressions) se reproduisent périodiquement avec une fidélité trop scrupuleuse pour ne pas avoir une explication commune et pour ne pas dépendre aussi de l'attraction tétraédrique. En résumé, le tétraèdre est le grand rouage, mis en jeu par le refroidissement, qui conduit et règle tous les mouvements de la surface; la transmission des mouvements se fait seulement par les inégalités de la pesanteur qui en sont la conséquence. Tout le mécanisme est réglé avec une précision si admirable, qu'il suffit de ces petites différences pour tout mettre en marche et tout engrener. Dans la période, heureusement encore éloignée, où le tétraèdre sera arrivé à sa position d'équilibre, le rouage central sera arrêté, les mouvements s'amortiront peu à peu, les dénudations nivelleront tout, sans que rien renouvelle leur action; la vie géologique de la Terre sera terminée. »

(1) Il faut encore, il est vrai, connaître la vitesse initiale. Mais, s'il n'y a pas eu d'impulsion de force extérieure, comme je n'hésite plus à l'admettre, la vitesse angulaire initiale était nécessairement égale à la vitesse angulaire de rotation autour du Soleil.

