

III

LE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉODÉSIE DE SES ORIGINES À NOS JOURS¹

JE ne vous ferai pas une *Conférence* technique parsemée de nombres et de formules. Prévenu au dernier moment que je ferais partie de la Mission Cavalier de La Salle, j'ai un peu inconsidérément accepté de vous parler de Géodésie et c'est seulement sur le paquebot m'amenant vers vous que j'ai pu rassembler, grâce à quelques documents emportés à la hâte et à mes propres souvenirs, les éléments de cette causerie. Vous m'excuserez donc du décousu qui la signalera peut-être et me pardonnerez de ne pas l'agrémenter de projections de diapositives, ce qui en eût diminué l'aridité.

J'essaierai de vous présenter, dans un aperçu très condensé, un historique des développements successifs de la Géodésie, en insistant sur les applications de cette science, car elle a toujours présenté ce double caractère de comporter à la fois des spéculations théoriques de l'ordre le plus élevé et des déterminations d'ordre pratique, utilitaire, très précieuses pour l'humanité.

Ce double caractère, nous le trouvons dès les plus lointaines origines, au temps des géomètres grecs. Le problème théorique fondamental de la Géodésie, déterminer la forme et les dimensions de la terre, attira l'attention de ceux d'entre ces derniers qui, très en avance sur leur temps, assignaient à la terre la forme sphérique; pour eux ce problème se ré-

¹A lecture delivered in French by General Perrier, of the French Army, the Paris Academy of Sciences, and the Ecole Polytechnique, at the Physics Laboratory of the Rice Institute, April 2, 1937.

Le développement de la géodésie 169

duisait alors à déterminer le rayon terrestre: ce fut l'objet, vous le savez, de la première opération géodésique dont le souvenir nous a été consacré celle d'Eratosthènes, vers 150 av. J. C.

Mais nous avons des preuves certaines que vers la même époque les Grecs n'ignoraient déjà pas une autre Géodésie plus utilitaire, la science de l'arpentage, des délimitations, du Cadastre, un peu ce que les Allemands appellent aujourd'hui "niedere Geodäsie," Géodésie inférieure, par opposition à la "höhere Geodäsie," ou Géodésie supérieure.

Franchissant des siècles au cours desquels rien de spécialement remarquable ne peut être noté, nous constatons d'abord, à l'aube des temps modernes, les progrès accomplis dans une science intimement liée à la Géodésie, la Navigation, lors des grands voyages maritimes de découvertes qui, grâce d'abord aux Espagnols et aux Portugais, mais aussi ensuite aux Français et aux Anglais, révélèrent aux Européens des continents et des mers jusqu'alors inconnus d'eux.

A cette époque on croit encore la terre sphérique et en 1615 le Hollandais Snellius reprend et met au point sous sa forme définitive l'antique procédé d'Eratosthènes. Pour avoir le rayon terrestre, il suffit de déterminer deux éléments: la longueur d'un arc de grand cercle sur la sphère et l'angle au centre correspondant. Une simple règle de trois donne ensuite le rayon. La longueur de l'arc s'obtient par des observations géodésiques proprement dites; l'angle au centre, s'il s'agit d'un arc de méridien, par des observations d'astronomie géodésique, car il n'est autre que la différence de latitude des deux extrémités de l'arc.

Ce qui fait l'originalité de Snellius et sauve son nom de l'oubli, c'est que pour avoir la longueur de l'arc, il n'emploie pas un procédé direct, comme par exemple Fernel, médecin de Henri II, qui avait compté le nombre de

tours des roues de son carrosse entre Paris et Amiens, mais le procédé indirect des *triangulations*, susceptible d'une haute précision et qui est encore à la base de la Géodésie moderne : on établit le long de l'arc à mesurer une série de signaux formant une chaîne de triangles ; on mesure la longueur d'un seul côté de cette chaîne, appelé base, ainsi que tous les angles de la chaîne ; on en déduit par le calcul les longueurs de tous les côtés ; enfin, à condition d'avoir déterminé, par les procédés de l'astronomie géodésique, l'azimut ou orientation d'un côté de la triangulation, on peut calculer la longueur de l'arc.

Quelques années plus tard, un Français, l'abbé Picard, augmente singulièrement la précision des mesures angulaires en Géodésie et en Astronomie, en remplaçant les anciennes *alidades* des cercles divisés par des lunettes munies de *micromètres*, organes qui venaient d'être inventés par un autre Français, Auzout. Picard exécute, toujours dans l'hypothèse d'une terre sphérique, la première mesure d'un arc de la *Méridienne de Paris* entre Paris et Amiens et obtient une valeur à peu près exacte du rayon terrestre (1669).

Ici ouvrons une parenthèse pour montrer combien les diverses sciences se pénètrent, combien la Géodésie est intimement liée à l'Astronomie et à la Mécanique céleste et quelle application, théorique celle là, tout au moins inattendue, eut la mesure de l'Abbé Picard.

Les profondes méditations de Newton l'avaient à la même époque mis sur la voie du principe de *l'attraction universelle* et pour l'établir, il avait essayé de démontrer par une formule, d'ailleurs assez simple, contenant le rayon de la terre, que la force retenant la lune sur son orbite est identique à celle qui agit sur tous les corps terrestres, la *pesanteur*, mais Newton ne disposait encore que d'une valeur très erronée du rayon terrestre et la formule ne se vérifiait pas.

Le développement de la géodésie 171

C'est seulement en 1682 qu'il eut connaissance de la valeur de ce rayon obtenue par Picard en 1669 (il faut croire que les nouvelles scientifiques ne se propageaient pas bien rapidement à cette époque entre Paris et Londres). Ayant recommencé son calcul avec la nouvelle valeur, Newton s'aperçut que la formule était applicable et l'histoire—ou la légende—assurent qu'en proie à une vive émotion, il dut confier à un ami le soin de terminer le calcul.

Mais si la Géodésie était restée une science théorique, elle n'aurait pas acquis le développement que nous lui voyons aujourd'hui. Quel Gouvernement aurait consacré des crédits considérables, affecté un personnel technique nombreux et exercé à des mesures d'arc n'ayant pour objet que de déterminer la figure et les dimensions de notre planète, et bien indifférentes à la plupart des humains ?

Par bonheur pour la Géodésie, le procédé des triangulations utilisé pour obtenir la longueur d'un arc s'est révélé indispensable pour fournir le canevas exact des cartes topographiques régulières. Jusque dans le courant du 17^{ème} siècle, on s'était contenté, en fait de documents topographiques, de vues perspectives, à la facture souvent naïve, d'une exécution parfois remarquable. Mais la nécessité de documents précis se fit sentir chez les Etats dont l'unité était déjà faite, qui avaient à mettre en ligne dans les guerres des effectifs considérables ou à entreprendre d'importants travaux d'intérêt public, routes, canaux, etc. . . . Au premier rang de ces Etats était la France de Louis XIV et de Louis XV. On arrive alors à la conception de triangulations qui, au lieu de constituer des chaînes courant de long d'un arc, couvriront tout un vaste territoire fournissant des réseaux de points déterminés avec une haute précision. Dans les mailles de ces réseaux, les topographes pourront travailler

et asseoir leurs levées, sans que l'accumulation des erreurs fausse leurs résultats.

En même temps, Newton était arrivé à établir, mais sans le démontrer bien rigoureusement, que la terre, en vertu de son mouvement de rotation, a dû, par la combinaison de la force centrifuge et de la pesanteur, prendre la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati aux pôles et le problème théorique fondamental de la Géodésie changeait d'aspect. Au lieu d'une seule inconnue, le rayon terrestre, il fallait en déterminer deux (les deux demi-axes de l'ellipsoïde ou le demi-grand axe et l'aplatissement). Il est aisé de voir, sans que nous insistions, que pour obtenir *deux* équations fournissant les deux inconnues, il faut mesurer *deux* arcs de méridien, au lieu d'un seul comme dans l'hypothèse d'une terre sphérique.

Ainsi se précise à la fin du 17^{ème} siècle le problème théorique fondamental de la Géodésie, tandis que se révèle nécessaire la plus importante de ses applications pratiques, la construction des cartes.

Aussi au 18^{ème} siècle s'épanouit une magnifique floraison de travaux géodésiques de tous ordres exécutés par des Français en France ou dans des contrées lointaines, à une époque où la France était encore à peu près le seul pays dépositaire de la Science géodésique :

Prolongeant vers le Nord et vers le Sud l'opération de Picard, deux mesures successives de la Méridienne de Paris étendent celle-ci de Dunkerque à Perpignan, celle de Jean Dominique et Jacques Cassini (1683–1718), celle de Cassini de Thury et La Caille (1739–1740).

La première, dont les résultats étaient faussés par l'imprécision des observations astronomiques, parut donner tort à Newton, et les Cassini en déduisirent une théorie erronée d'après laquelle la terre serait un ellipsoïde de révolution

Le développement de la géodésie 173

allongé et non aplati dans le sens de la ligne des pôles. D'où la fameuse querelle entre Cassiniens et Newtoniens qui remplit les premières années du 18^{ème} siècle.

Or la seconde mesure, plus précise, celle de Cassini de Thury et La Caille, donna raison à Newton, ainsi que deux autres expéditions célèbres envoyées par l'ancienne Académie royale des Sciences de Paris (dont l'Académie actuelle est l'héritière) : l'expédition de Laponie (1736-1737), sous les Académiciens Maupertuis, Clairaut, Camus et Le Monnier, l'expédition du Pérou (1735-1744) sous les Académiciens Godin, Bouguer, et La Condamine. Chaque mission mesura un arc de méridien sous ces latitudes extrêmes, et la comparaison des résultats établit définitivement l'exactitude de la conception de Newton.

Enfin une nouvelle mesure de la Méridienne de Paris entre Dunkerque et Barcelone par Delambre et Mechain, en pleine révolution (1792-1798), combinée avec l'arc mesuré un demi-siècle plus tôt au Pérou par Bouguer, donna de nouveaux éléments numériques définissant l'ellipsoïde terrestre. La nouvelle unité de longueur *le mètre* que l'Assemblée Constituante avait, en 1791, décidé de fixer, pour faire cesser *l'étonnante et scandaleuse diversité* des Poids et Mesures, par l'adoption d'un étalon à la fois national et universel, fut définie comme égale à la dix-millionième partie du quart du méridien de cet ellipsoïde. En partant de cette unité, un admirable système de Poids et Mesures, ordonné et cohérent, fut établi et depuis lors s'est imposé par sa clarté, sa simplicité, dans presque tous les pays du monde. Le *Système métrique* tire donc son origine des mesures des deux Méridiennes, celle du Pérou et celle de la France. De même, un vœu unanime des Géodésiens, formulé en 1867 à une Conférence de l'ancienne *Association géodésique internationale* tenue à Saint-Petersbourg (pouvoir exprimer toutes

les bases et par suite tous les côtés des triangulations en fonction d'un même étalon) a abouti à la création en 1875, à Sèvres, près Paris, du *Bureau international des Poids et Mesures*, dirigé à présent par un Français, M. Pérard auquel nous devons déjà tant d'importants travaux en métrologie et dans les sciences connexes.

Dans le domaine des applications pratiques, la première carte topographique régulière d'un grand pays fut entreprise en 1750. C'est la carte de France, dite de Cassini, au 86.400ème, qui, après bien des vicissitudes, fut terminée en 1815 et presque aussitôt remplacée par notre carte actuelle dite d'Etat-Major, au 80.000ème exécutée de 1817 à 1880. Ce sont ces deux œuvres, ayant l'une et l'autre exigé un immense effort, qui ont servi de modèles aux premiers travaux topographiques de grande envergure effectués dans d'autres pays.

A part les spéculations théoriques de Newton, tous les travaux dont nous venons de donner un rapide aperçu, sont en somme ce que nous appelons aujourd'hui des travaux de *Géodésie mathématique*. Aucune considération dynamique de force n'est invoquée.

Toutefois, vers la fin du 18ème siècle, ces considérations se sont imposées peu à peu à l'attention du géodésien. Tout point matériel terrestre est soumis à deux forces: *l'attraction newtonienne* de la terre et la *force centrifuge* due au mouvement de rotation de celle-ci; leur résultante est la force que nous appelons *pesanteur*. En 1743, à 29 ans, un génial géomètre français, Clairaut, dans son *Traité de la Figure de la Terre*, confirma, cette fois avec toute la rigueur mathématique, la théorie de Newton et établit deux célèbres formules valables pour un ellipsoïde de révolution composé de couches concentriques de densités variables suivant une loi donnée: la première permet de calculer l'intensité de la

Le développement de la géodésie 175

pesanteur ou accélération qu'elle imprime à l'unité de masse, en un point déterminé, en fonction de la latitude de ce point; la seconde de calculer l'aplatissement terrestre en fonction des coefficients de la première.

Une nouvelle branche de la Géodésie est ainsi née dont l'intérêt alors paraissait uniquement théorique: la *Géodésie physique ou dynamique*. L'intensité de la pesanteur sera obtenue par une formule classique en observant la durée des oscillations d'un pendule; un grand nombre d'observations semblables permettra de déterminer les coefficients de la première formule de Clairaut; la seconde formule donnera enfin l'aplatissement terrestre, $\frac{a-b}{a}$ rapport de la différence des deux demi-axes de l'ellipsoïde à son demi-grand axe. Par le pendule, on n'obtiendra plus à la fois la forme et les dimensions de la terre, comme en Géodésie mathématique, mais sa forme seulement. Il sera possible de comparer les aplatissements obtenus par les deux méthodes. C'est ce que fit pour la première fois le célèbre Laplace dans son *Traité de Mécanique Céleste* en utilisant 15 observations du pendule. Nous en avons actuellement 4000 environ!

Mais au temps même où la Géodésie avait pris, surtout en France, vers la fin du 18^{ème} et la première moitié du 19^{ème} siècle, la place qui lui est dûe, avec son double caractère spéculatif et pratique, deux séries de faits troublants s'imposaient à l'attention des géodésiens, l'un en Géodésie mathématique, les *déviations de la verticale*, l'autre en Géodésie dynamique, les *anomalies de la pesanteur*. Nous tâcherons, ce qui n'est pas très facile, d'en donner, sans appareil mathématique, une idée, au moins approchée, assez grossière en réalité.

Rappelons qu'on appelle *géoïde* la surface dite mathématique de la terre, définie comme étant la surface de niveau

zéro, celle des océans prolongés sous les continents. C'est la surface qu'étudie le géodésien en faisant abstraction des irrégularités de la surface géographique terrestre.

Supposons que le géoïde soit une ellipsoïde de révolution et que la terre se compose de couches concentriques homogènes et de densités obéissant à une loi déterminée. On conçoit que nous puissions, *à priori*, en un point déterminé du géoïde, fixer par le calcul :

1. la direction de la normale à cette surface (verticale *théorique*),

2. l'intensité de la pesanteur *théorique*, par la première formule de Clairaut par exemple; dont les coefficients ont été préalablement bien déterminés par de longues séries d'observations pendulaires.

A présent considérons le point de la surface géographique terrestre correspondant au point que nous avons choisi sur le géoïde, c'est-à-dire, situé sur la normale à celui-ci en ce point. On conçoit qu'*expérimentalement* et non plus *à priori*, nous puissions y fixer :

1. la direction de la verticale *vraie*, qui est celle d'un fil à plomb (disons incidemment qu'on l'obtient par la comparaison des données géodésiques et des observations astronomiques);

2. l'intensité de la pesanteur *vraie* (par l'observation du pendule). On peut transporter ces deux éléments, par des corrections appropriées au point considéré du géoïde pour avoir en ce point la direction de la verticale vraie et l'intensité de la pesanteur vraie.

La comparaison en un même point du géoïde des éléments observés expérimentalement avec les mêmes éléments calculés *a priori* révèle presque toujours des discordances entre les directions de la verticale, appelées *déviations de la verticale*; les discordances entre les intensités de la

Le développement de la géodésie 177

pesanteur sont appelées *anomalies de la pesanteur*. Ces expressions ne sont peut-être pas très bien choisies. En réalité, il vaudrait mieux dire anomalies dans la direction et dans l'intensité de la pesanteur.

Que conclure de leur existence? Evidemment d'abord que le géoïde n'est pas un ellipsoïde parfait: les irrégularités de la surface, montagnes ou dépressions océaniques, font sentir leur effet. Ensuite que la répartition des masses à l'intérieur de la terre n'obéit pas à une loi aussi simple que nous l'avons supposé.

La terre ne se compose pas de couches concentriques au géoïde, homogènes et de densités obéissant à une loi déterminée; à une même profondeur au-dessous de la surface, il peut exister des matériaux de densités très variables, plus lourds ou plus légers que la moyenne. En un point déterminé la résultante des attractions des masses terrestres sur le fil à plomb dépend donc, en direction et en intensité de circonstances extrêmement complexes.

Voici dès lors un fait d'importance capitale. Le géodésien n'avait jamais fait porter ses investigations que sur la surface de la terre. Il s'aperçoit à présent que d'observations exécutées sur cette surface, il pourra déduire des conséquences intéressantes l'intérieur de notre globe et particulièrement cette partie de la terre, d'une épaisseur limitée, que nous appelons *l'écorce terrestre*. Les déviations de la verticale et les anomalies de la pesanteur lui donneront de précieuses indications sur la répartition et les densités des masses intérieures; l'idée des prospections géodésiques et géophysiques, si développées aujourd'hui se fait jour.

Il a fallu bien des années aux géodésiens pour démêler la véritable nature des déviations de la verticale connues bien avant les anomalies de la pesanteur. Le premier, l'Académicien français Bouguer, pendant l'expédition du Pérou,

institua en 1738 des expériences sur les flancs du Chimborazo (6300m.) dans la Cordillère des Andes, pour mesurer l'attraction exercée sur le fil à plomb par un massif montagneux.

Mais la notion des déviations de la verticale resta pendant longtemps si peu familière aux géodésiens que l'illustre Mechain, le collaborateur de Delambre dans la mesure de la Méridienne de France, d'où est issu le mètre, eut ses derniers jours assombris par une différence de 3' entre la latitude calculée et la latitude observée de Monjuich près Barcelone, différence qu'il ne s'expliquait pas et attribuait à de mauvaises observations; au point qu'il en fut désespéré jusqu'à l'heure de sa mort.

Depuis un siècle et demi, les idées, un peu confuses à l'origine, sur les déviations et les anomalies, se sont précisées d'autant mieux que le 19ème siècle et le début du 20ème ont été signalés par un développement considérable des travaux géodésiques de toute nature, d'ordre théorique et pratique. La plupart des nations, suivant l'exemple de la France, entreprennent de grandes opérations, mesures d'arc, triangulations pour l'établissement de cartes topographiques régulières, toutes accompagnées d'observations astronomiques précises, observations de l'intensité de la pesanteur etc. . . . Il ne peut être question d'en fournir ici même une simple liste. Pour donner une idée exacte de l'évolution rapide des instruments et des méthodes, en permettant des comparaisons, il faudrait que le temps ne nous ait pas manqué tout à l'heure pour dire ce que les uns et les autres étaient au début du 19ème siècle. Nous croyons toutefois qu'une sèche énumération rapide rappellera vos souvenirs et vous montrera le chemin parcouru.

Dans les triangulations de premier ordre: Perfectionnements apportés aux signaux de jour (signaux en acier démontables par exemple, du type Bilby du "Coast and Geodetic

Le développement de la géodésie 179

Survey" etc. . . . et aux signaux de nuit.—Emploi des fils ou rubans métalliques en acier *invar* pour la mesure des bases.

Dans les triangulations de détail: Types nouveaux de théodolites, commodes, précis, légers, peu encombrants, comme les instruments Wild.—Emploi de plus en plus répandu de procédés graphiques de calcul des triangulations en coordonnées rectangulaires, avec usage des tables de valeurs naturelles des lignes trigonométriques.

En Astronomie géodésique: Perfectionnements multiples des instruments méridiens, notamment facilité du retournement, suppression, par l'emploi du micromètre impersonnel, des erreurs redoutables, dites *d'équation personnelle* propre à chaque observateur.—Emploi de la télégraphie sans fil pour la détermination des différences de longitudes précises, au moyen de signaux horaires émis par de puissantes stations radiotélégraphiques. Les premiers de ces signaux ont été émis par la Tour Eiffel le 23 mai 1910 sur l'initiative du Bureau des Longitudes de France et, à la suite des Conférences internationales de l'Heure à Paris en 1912 et 1913, un *Bureau international de l'Heure* a été créé à l'Observatoire de Paris. Importants perfectionnements accomplis dans les horloges et les chronomètres (emploi du métal *invar*, horloges à pression et température constantes etc. . . .).

En reconnaissance ou exploration: Possibilité à l'observateur muni d'un récepteur de T.S.F. et d'un instrument léger approprié à la pratique de la méthode des *hauteurs égales*, comme *l'astrolabe à prisme* inventé il y a 35 ans par les Français Claude et Driencourt, de déterminer rapidement les coordonnées géographiques précises de son point de station, d'où des facilités inespérées pour l'établissement des cartes coloniales à petite échelle.

En Géodésie physique: Facilité et rapidité apportées dans les observations gravimétriques par la généralisation des

déterminations *d'intensité relative* de la pesanteur au moyen de pendules courts aisément transportables du type Sternek. —Création d'appareils basés sur d'autres principes que la pendule ordinaire, comme l'admirable appareil français Holweck Lejay, léger et précis, qui permettant de multiplier rapidement les observations gravimétriques, est actuellement employé à l'établissement des cartes gravimétriques de la France, de l'Afrique du Nord, du Levant et de l'Extrême-Orient. Enfin et surtout, découverte capitale du Savant Hollandais, le Professeur Vening Meinesz, qui est arrivé à déterminer l'intensité de la pesanteur en mer à bord d'un sous-marin immergé à l'aide d'une méthode et d'un appareil de pendule spéciaux. Jamais on n'avait pu encore obtenir ce résultat et de ce fait les trois quarts de la surface terrestre échappaient aux investigations gravimétriques. Pratiquée depuis une quinzaine d'années, d'abord par la Marine Hollandaise, puis successivement par les Marines des Etats-Unis, de l'Italie et de la France, la méthode Vening-Meinesz restera attachée à la plus grande découverte faite en Géodésie depuis longtemps.

Nous avons souvent signalé, dans ce qui précède, la part qui revient à la France dans le développement de la Géodésie depuis l'origine des temps modernes. Nous devons aussi rendre justice aux Etats-Unis et indiquer les beaux travaux de toute sorte accomplis sur leur territoire, presque depuis leur constitution en République indépendante. Ce sont les Etats-Unis qui nous donnent à présent l'exemple des opérations poursuivies avec les moyens d'action les plus puissants. Les travaux du *Coast and Geodetic Survey*, dépendant du Ministère du Commerce, méritent une particulière mention. Ce Service concentre dans ses attributions de Géodésie, le Nivellement de Précision, la Topographie, l'Hydrographie, les Marées, le Magnétisme et

Le développement de la géodésie 181

poursuit ses opérations non seulement sur le territoire des Etats-Unis proprement dit, mais encore à Porto-Rico, en Alaska, aux Iles Hawaii et Philippines. Une très exacte compréhension des buts à atteindre lui permet d'obtenir rapidement et économiquement un rendement considérable. Depuis 1933, afin d'activer l'exécution de la carte d'immenses territoires encore non topographiquement levés, les crédits mis à la disposition du Coast and Geodetic Survey ont été formidablement augmentés. Son champ d'action aux Etats-Unis seulement, a une ampleur inusitée, 58 degrés de longitude sur 23 de latitude.

Tandis que d'autres services d'Etat, absorbés par l'établissement des cartes, application pratique de la Géodésie, négligent trop souvent le point de vue théorique; le Coast and Geodetic Survey, tout en faisant marcher de pair la description géométrique du pays avec son prodigieux développement économique, n'a jamais sacrifié les études purement scientifiques de haute Geodésie. Non content d'avoir donné à ses travaux une rare homogénéité en prenant un seul point central, Mades Ranch dans le Kansas, comme origine du calcul de toutes les coordonnées sur un seul et même ellipsoïde, le Coast and Geodetic Survey a réussi à réaliser, pour ainsi dire, l'unité géodésique de tout le continent Nord-Américain. Le Mexique et le Canada ont adopté la même origine et le même ellipsoïde, de sorte que toutes les triangulations de l'Amérique du Nord, calculées dans un système unique, se prêtent avec autrement de facilité que les réseaux européens, si variés et si disparates; à des discussions d'ensemble.

Les travaux de Hayford et de William Bowie sur *l'isostasie* sont le plus bel exemple de celles-ci.

L'isostasie est un mot relativement nouveau, créé par Dutton en 1889, mais la chose n'est pas nouvelle. Au

Chimborazo en 1738, Bouguer, après avoir calculé théoriquement la déviation de la verticale à une de ses stations, en fonction de la masse de la montagne et trouvé la valeur observée inférieure à la valeur calculée, soupçonna l'existence sous la montagne de cavités ou de masses de densité anormalement faibles. A ce titre il est le précurseur des théories modernes de l'isostasie qui, grâce pour une bonne partie aux géodésiens des Etats-Unis, ont pris à présent un si grand développement.

Les théories de l'isostasie sont nées du besoin d'expliquer les déviations de la verticale et les anomalies de la pesanteur. Deux d'entre elles, esquissées à peu près à la même époque, vers 1855 par l'astronome anglais Airy, directeur de l'Observatoire de Greenwich et l'Anglais Pratt, géodésien aux Indes, se partagent la faveur des géodésiens d'aujourd'hui.

Pour Airy, l'écorce terrestre se compose de blocs flottant sur un magma de densité plus forte; il en déduit que l'écorce terrestre est moins dense, mais plus épaisse, sous les continents que sous les mers.

Pour Pratt, l'excès de masse constitué par une chaîne de montagnes est compensé par un défaut de masse intérieur, les montagnes ont en quelque sorte aspiré les matières de l'écorce terrestre situées au-dessous d'elles et la densité de celles-ci a été diminuée. Sur une *surface* dite de *compensation* située à une centaine de kilomètres au dessous du géoïde, tous les éléments d'une certaine étendue supportent la même pression du fait des masses situées au-dessus. En d'autres termes, il y a la même quantité de matière, la même masse, dans tous les cylindres droits élémentaires de même section, entre la surface de compensation et la surface du sol.

Aux Etats-Unis deux hommes ont considérablement développé la théorie de Pratt et l'ont défendue contre des

Le développement de la géodésie 183

adversaires nombreux et souvent passionnés, ce sont John Filmore Hayford, Chef de la Division des Calculs au *Coast and Geodetic Survey* de 1900 à 1909, puis Directeur du Collège des Ingénieurs d'Evanston, mort en 1925, ensuite son successeur immédiat William Bowie qui devient plus tard Chef de la Division de Géodésie au *Coast and Geodetic Survey*. Les premiers mémoires de Hayford parus en 1909 et 1910 dans lequel il appuyait sa théorie sur les nombreuses déviations de la verticale observée aux États-Unis, et qui témoignaient, chez leur auteur, d'un véritable génie du calcul, causèrent dans le monde géodésique une impression profonde; les dimensions de l'ellipsoïde terrestre calculées par Hayford, ont été adoptées en 1924 par l'Union géodésique et géophysique internationale à son Assemblée générale de Madrid.

En 1912 un nouveau Mémoire, signé à la fois par Hayford et par Bowie, confirma encore la théorie, mais cette fois par la considération des anomalies de la pesanteur observées aux États-Unis.

Depuis cette époque, innombrables sont les travaux et mémoires inspirés par la théorie de l'isostasie, la bibliographie de M. Knopf, de la Yale University, en mentionnait déjà 463 en 1924. Il n'est plus permis aujourd'hui au géodésien, au géophysicien, au géologue, d'en faire abstraction, elle a conquis son droit de cité en Géodésie.

Permettez-moi de rendre hommage ici, devant un auditoire américain, à l'homme qui non seulement est le représentant le plus éminent de cette théorie, mais qui a laissé une trace lumineuse dans tous les domaines de la Géodésie qu'il a parcourus. En janvier 1937, atteint par la limite d'âge, il a été à Washington à l'occasion de sa retraite l'objet de manifestations émouvantes de haute estime et de sympathie. Il a été porté depuis 1919 par ses collègues du monde entier

aux situations les plus enviées que puisse désirer un géodésien: d'abord pendant 14 ans (1919–1933) Président de l'Association Internationale de Géodésie, puis pendant 3 ans (1933–1936), Président de cette Union géodésique et géophysique internationale qui comprend, en plus de l'Association de Géodésie, six autres Associations relatives aux diverses sciences géophysiques. Je m'honore d'avoir, comme Secrétaire de l'Association de Géodésie, travaillé pendant 17 ans avec M. Bowie, dans une intime et amicale collaboration.

Les théories de l'isostasie ont amené une collaboration de plus en plus étroite entre le géologue et le géodésien et attiré l'attention de celui-ci sur tous les problèmes relatifs au sous-sol. Révéler par des observations géodésiques faites à la surface de la terre les richesses minières ou autres de ce sous-sol, en un mot le *prospector*, était dès lors un de ces problèmes d'importance pratique qui devaient tôt ou tard être abordés. C'est ainsi que la prospection *géodésique* est née (méthodes gravimétriques et de nivellement). Sitôt l'utilité des méthodes de ce genre reconnue, elle a été bientôt accompagnée d'autres méthodes relevant de la Géophysique, dont les principales sont les méthodes magnétique, sismique, électrique.

En France la Géodésie est nettement séparée de la Géophysique qui comprend la Séismologie, le Magnétisme et l'Electricité terrestre, la Météorologie, la Volcanologie, l'Océanographie physique, et l'Hydrologie scientifique. Il en est ainsi à l'Union géodésique et géophysique internationale. Aux Etats-Unis, au contraire le Comité National correspondant à cette Union est appelé "American Geophysical Union" tout court; figurant dans ce comité la Géodésie est donc considérée comme une des sciences géophysiques.

Le développement de la géodésie 185

Nous n'aurions pas l'audace de parler en connaisseur de ses dernières méthodes devant un auditoire sans doute plus averti que nous, dans une ville qui est un des centres de prospection les plus importants du monde. Mais nous ne pouvons passer sous silence une des applications pratiques les plus fécondes de la Géodésie et à cette occasion, dire quelques mots, en nous aventurant sur un terrain qui n'est pas strictement le nôtre, des moyens analogues que la Géophysique met à la disposition du prospecteur.

C'est vers 1900 que le Baron Roland Eotvos, géodésien hongrois, construisit son premier type de *balance de torsion*, suivi plus tard de plusieurs autres, il se servit de cette balance pour étudier, qu'on nous pardonne ces expressions techniques, la forme des surfaces de niveau du champ de la pesanteur, la direction de leurs sections principales. Des variations rapides de l'intensité de la pesanteur autour d'un point sont l'indice de densités anormales; la balance permet de déterminer dans quelle direction l'intensité varie le plus rapidement, ce qui donne à l'observateur la possibilité de se diriger vers la perturbation et de la trouver. C'est ainsi que pourront être étudiés les anticlinaux avec ou sans faille, révélés les dômes de sel, décelés et localisés les gisements de pétrole.

Il est remarquable qu'en créant sa balance Eotvos n'avait d'autre but que d'obtenir d'abord des réseaux de stations d'intensité de la pesanteur plus denses qu'il n'était possible d'en avoir par le procédé ordinaire du pendule et ensuite de comparer les valeurs observées en une même station par la balance et par le pendule (Observations au Lac Balaton en 1902 et 1903). L'utilité pratique de la balance pour les prospections ne s'est révélée que plus tard.

La méthode n'est pas sans offrir des difficultés et exige notamment l'apport de corrections aux observations qui

nécessitent des opérations de nivellement aux environs immédiats de la station. Elle a été utilisée pour l'étude de la forme des surfaces de niveau et des anomalies de la pesanteur dans nombre de régions, en particulier dans des régions méïsmiques (région de Kwanto au Japon), des régions présentant de fortes anomalies magnétiques (région de Kursk en URSS), pour l'étude des failles (travaux de M. Matuyama au Japon), pour la recherche de gisements de charbon, de pétrole etc. . . .

Notons le ici, c'est la méthode gravimétrique de prospection qui a révélé chez vous le dôme Nash en 1924 et signalons que Donald C. Barton, avec la collaboration de Maude Hickey, nous a fait connaître dans les *Transactions, American Geophysical Union* de 1932 et 1933, les importants levés à la balance de torsion exécutés sur la "Gulf Coast," dans le Sud-Ouest de la Louisiane et le Sud-Est du Texas.

Comme méthode géodésique de prospection, citons en une encore, celle des nivellements à la surface du sol, propre à révéler des dômes et qui a été la première appliquée dans votre région.

Aujourd'hui les méthodes purement géophysiques semblent, pour la prospection du sous-sol, prendre de plus en plus d'importance et la méthode géodésique tend à n'être plus utilisée que dans des cas particuliers.

Rappelons simplement que de ces nouvelles méthodes les unes sont des méthodes de surface: méthode magnétique basée essentiellement sur l'observation des éléments magnétiques, déclinaison, inclinaison et composante horizontale, méthode séismique très employée aux Etats-Unis, basée essentiellement sur la mesure de la vitesse de propagation d'ondes séismiques produites par un ébranlement artificiel du sol. Ces deux méthodes permettent de déceler les points

Le développement de la géodésie 187

où un sondage pourrait donner des résultats intéressants. Au contraire la méthode électrique dans la forme sous laquelle elle est généralement pratiquée aujourd'hui consiste en une exploration électrique des sondages. La méthode du *carottage mécanique* consistait à extraire du forage, de distance en distance, des échantillons du sous-sol, procédé long, pénible et incertain. La nouvelle méthode électrique, appelée par analogie *carottage électrique*, est une exploration continue, fournissant des graphiques de *résistivité* et de *porosité* immédiatement exploitables. La méthode se prête également bien aux études techniques, à la détermination des couches traversées par un sondage, à l'étude spéciale des couches pétrolifères et à nombre d'études particulières. La méthode prend de plus en plus d'extension, comme l'indique le nombre des couches pétrolifères décelées par carottage électrique, introduit en Californie, Oklahoma, Texas et Louisiane.

Qu'il nous soit permis de rappeler que le créateur de la méthode est un ingénieur au corps des Mines français, au génie créateur, fondateur de la Compagnie Générale géophysique française, Conrad Schlumberger; prématurément enlevé à la science et à l'industrie le 9 mai 1936.

Car si la France n'est malheureusement pas un pays très producteur de pétrole, nous pouvons, nous Français, constater qu'elle tient une place de tout premier rang dans l'ordre des travaux de prospection géodésique et géophysique. Nos grandes compagnies géophysiques forment actuellement un groupement uni, une des plus puissantes organisations géophysiques du monde. Cent vingt ingénieurs de nos grandes Ecoles représentent ce groupe dans le monde entier et notamment sur 60% des champs pétrolifères. Leur activité n'est pas limitée aux recherches du pétrole, mais embrasse aussi toutes les recherches minières, les études hydrologiques et les travaux de Génie Civil.

Vous n'ignorez pas l'importance économique de la prospection géodésique et géophysique et quel précieux placement, combien rémunérateur, constituent les recherches de cette nature. Rappelons seulement qu'un unique dôme, découvert à Rabbs Ridge au Texas, représente actuellement une valeur marchande de 40 millions de dollars, soit près du total des frais de prospection en une année sur tout le continent Américain. En fait, le total des dépenses engagées pour ce seul continent, dans des recherches géodésiques et géophysiques, a été pour 1933 de l'ordre de 50 millions de dollars. Pour le monde entier et à l'heure actuelle le nombre de 100 millions de dollars est sans doute au dessous de la vérité. C'est grâce à ces recherches que la Gulf Coast, dépeinte par Cavelier de La Salle et ses contemporains comme marécageuse, inhospitalière et malsaine, où la prospection n'a commencé qu'en 1907, est aujourd'hui un des pays les plus fortunés du monde.

En terminant cet exposé, disons combien nous serons heureux si nous avons pu convaincre notre auditoire de l'intérêt et de la variété des multiples problèmes que la Géodésie a abordés depuis ses origines jusqu'à nos jours. Le champ d'action de cette science, limité d'abord à la surface des continents, s'est sans cesse étendu; elle porte à présent ses efforts sur la surface des Océans et sur les masses sous-jacentes de l'écorce terrestre, qui échappent à notre vue, mais non à nos recherches. Souvent les applications pratiques les plus inattendues et les plus importantes ont résulté de travaux qu'à l'origine on pouvait croire purement spéculatifs. Les Etats-Unis et la France ont joué et jouent encore en Géodésie un rôle de premier plan. Puissent-ils, pour le plus grand bien de la science, persévérer dans cette féconde et pacifique émulation.

GEORGES PERRIER.