

RAPPORT
SUR LE PROJET DE REVISION
DE
L'ARC MÉRIDIEN DE QUITO

Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. 131, p. 215-236 (16 juillet 1900).

Par une Lettre en date du 21 juin 1900, M. le Ministre de l'Instruction publique a invité l'Académie à lui donner son avis sur le projet de revision de l'arc méridien de Quito et lui a demandé d'examiner le programme scientifique proposé, de le discuter et de lui transmettre ses observations. L'Académie a renvoyé la question à une Commission composée des sections de Géométrie, d'Astronomie et de Géographie et Navigation. Cette Commission a étudié le projet en détail, et c'est le résultat de cette étude que je dois résumer dans le présent Rapport.

Il est nécessaire d'abord de rappeler en quelques mots l'histoire de la question. Au commencement du siècle dernier, la théorie de Newton qui concluait à l'aplatissement du globe terrestre, fut soumise à de vives controverses, auxquelles l'observation directe pouvait seule mettre fin. Il fallait mesurer deux arcs de méridien à des latitudes différentes. C'est à la France, et en particulier à l'ancienne Académie des Sciences, que revient l'honneur d'avoir mené à bien cette difficile opération. En 1735 et dans les années suivantes, un

arc fut mesuré au Pérou par Godin, Lacondamine et Bouguer, et un autre en Laponie par Maupertuis et Clairaut

La méridienne de France, revisée une première fois en 1739 par Cassini de Thury et Lacaille, le fut de nouveau en 1790 par Delambre et Méchain au moment de l'établissement du système métrique. Cette opération, entreprise dans des conditions de précision inconnues jusque-là, fut prolongée jusque sur le territoire espagnol.

C'est la comparaison de ces trois arcs, mesurés l'un près de l'Équateur, l'autre près du cercle polaire, le troisième sous des latitudes moyennes, qui a fourni la première valeur suffisamment approchée de l'aplatissement.

Jusque-là la Géodésie était restée pour ainsi dire une science exclusivement française; mais dans la première moitié du XIX^e siècle au contraire, ce fut surtout à l'étranger qu'elle se développa. Non seulement de nombreuses mesures furent entreprises, mais les méthodes furent perfectionnées par les travaux de Gauss, Bessel, Airy et Clarke.

C'est notre regretté Confrère le Général Perrier qui a rendu à la France le rang qu'elle avait paru perdre un instant. On sait au prix de quels efforts il est parvenu à joindre l'Espagne et l'Algérie; par les méthodes ingénieuses et précises qu'il avait créées, il a procédé à une nouvelle revision de la méridienne de France qui, se raccordant d'un côté aux travaux anglais, de l'autre aux travaux espagnols et par eux aux mesures faites en Algérie, nous donne maintenant un réseau qui s'étend sans interruption du nord de l'Écosse au Sahara.

Les travaux étrangers et ceux du Général Perrier ont conduit les géodésiens à modifier la valeur adoptée pour l'aplatissement. Ils disposent pour cela d'un grand nombre de données nouvelles dont les principales sont :

- L'arc anglo-français, qui a 28°, de Laghouat (32° N) aux Shetland (60° N);
- L'arc russe, qui a 25°, du Danube (45° N) à l'Océan Glacial (70° N);
- L'arc indien, qui a 24°, entre les latitudes 8° et 32° N;
- L'arc américain de l'Atlantique, entre les latitudes 32° et 45° environ;
- L'arc américain du Pacifique, entre les latitudes 30° et 40° environ;
- Plusieurs arcs de parallèles dont les plus importants sont :
- L'arc européen de Valentia à Omsk par 52° de latitude;
- L'arc américain, entre les deux Océans par 38° de latitude ;
- L'arc qui traverse l'Hindoustan à la latitude 24°;

On remarquera que presque tous ces arcs se trouvent placés sous des lati-

tudes moyennes. Non seulement nous n'avons dans l'hémisphère sud qu'un arc de 7° dans la colonie du Cap, mais sous les latitudes équatoriales et polaires, on n'a presque rien ajouté aux travaux du siècle dernier.

Il y a là une lacune infiniment regrettable, car les déterminations anciennes, quelque remarquables qu'elles aient été dans leur temps, ne peuvent évidemment être comparées aux travaux plus récents.

Cette situation a frappé depuis longtemps l'Association géodésique; la nécessité de mesures nouvelles, destinées à vérifier et à corriger celles de Lacondamine et de Maupertuis, paraissait évidente à tout le monde.

Une expédition russo-suédoise est partie pour le Spitzberg et a commencé la détermination d'un arc de 4 ou 5 degrés destiné à remplacer celui de Maupertuis.

Il restait à s'occuper de la revision de l'arc du Pérou. A la réunion de l'Association internationale géodésique en 1889, M. Davidson, délégué des États-Unis, appela sur cette question l'attention de ses collègues. Reconnaisant les droits que donnent à la France les glorieux souvenirs du XVIII^e siècle, il ajoutait que, si notre Gouvernement ne voulait pas les revendiquer, le Geodetic Survey des États-Unis pourrait se charger de l'opération.

Le Gouvernement français d'alors ne crut pas devoir décliner cette invitation. Il reçut d'ailleurs un concours empressé de la part de l'Académie des Sciences et du Gouvernement équatorien. En effet, par suite du démembrement de l'ancienne colonie espagnole du Pérou, c'est sur le territoire de la République de l'Équateur que se trouve situé l'arc dit *du Pérou*. Des négociations furent donc entamées par l'intermédiaire de M. Antonio Flores, Ministre de l'Équateur à Paris. Elles étaient sur le point d'aboutir et le Gouvernement allait déposer une demande de crédits, quand de graves événements politiques se produisirent à l'Équateur. La situation ne paraissant plus favorable à une opération scientifique de cette nature, le projet fut provisoirement ajourné.

En 1898, les circonstances politiques s'étaient de nouveau modifiées à Quito. Le Général Alfaro avait été appelé à la Présidence et l'on était assuré de trouver auprès du nouveau Président un appui sans réserve. Ce fut encore un délégué américain, M. Preston, qui, à la Conférence de Stuttgart, porta de nouveau la question devant l'Association géodésique. Il reconnut d'ailleurs encore une fois les droits de la France.

Le Gouvernement français comprit qu'une prompt solution était désirable; en effet, il était à craindre que, si la France hésitait à faire valoir ses droits,

la mesure ne fût entreprise par le Geodetic Survey américain, ou par l'Association internationale, de sorte que l'honneur en serait ravi à notre pays. D'autre part, l'opération devait prendre un certain temps, et il était à désirer qu'elle fût terminée avant l'expiration des pouvoirs du Président Alfaro, afin de profiter des excellentes dispositions du Gouvernement actuel.

Sur l'avis de la Commission géodésique française, M. le Ministre de l'Instruction publique entra en pourparlers avec le Ministère de la Guerre en vue d'étudier les moyens d'exécution. Il sembla que la mission principale ne pouvait s'embarquer avec son matériel encombrant, pour un pays aussi mal connu, avant qu'une première reconnaissance eût montré la possibilité de l'entreprise et déterminé les moyens de la mener à bonne fin.

Cette reconnaissance ne pouvait être effectuée que dans le pays même; M. le Ministre de l'Instruction publique y affecta une somme de 20 000 francs prise sur le crédit des Missions, et il confia cette mission à MM. les Capitaines Maurain et Lacombe du Service géographique de l'armée, mis à sa disposition par le Ministère de la Guerre.

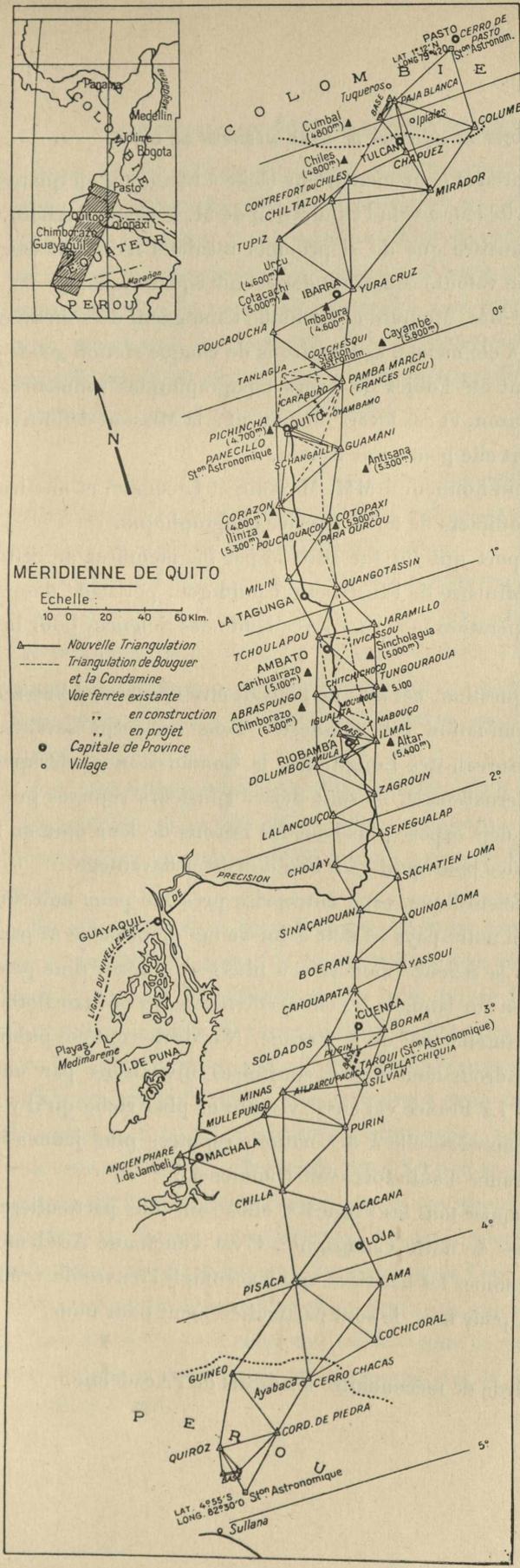
Partis de Bordeaux le 26 mai, ces deux officiers arrivèrent à Quito le 13 juillet. Ils furent extrêmement bien accueillis par M. le Président de la République et par tous les membres du Gouvernement qui s'efforcèrent de faciliter leur tâche par tous les moyens en leur pouvoir. En trente jours, MM. Maurain et Lacombe poussèrent jusqu'au Cerro de Pasto, sur le territoire colombien, et déterminèrent l'emplacement de dix nouvelles stations géodésiques, d'une station astronomique et d'une base. Ils explorèrent ensuite la contrée au sud de Quito, reconnurent deux bases nouvelles dont la dernière est située sur le territoire péruvien, et déterminèrent quinze nouvelles stations géodésiques.

L'ancienne méridienne va se trouver ainsi prolongée vers le Nord de 1° et vers le Sud de 2° environ.

La Mission s'embarquait de nouveau à Gayaquil le 25 novembre pour retourner en France.

Les dépenses se sont élevées au chiffre total de 35 000^{fr}, dont 15 000^{fr} environ ont été supportés par le Gouvernement de l'Équateur.

On sera frappé de la rapidité avec laquelle cette reconnaissance a été accomplie. Si l'on songe que ces deux officiers ont eu à parcourir environ 3500^{km} dans un pays des plus difficiles, et à faire une trentaine d'ascensions dans une des chaînes les plus élevées du Globe, on se rendra compte du zèle et de l'endu-



Reproduit
d'après une figure du
Bulletin de la
Société de Géographie
(Paris, Masson et C^{ie}).

rance dont ils ont dû faire preuve pour mener leur tâche à bonne fin en quatre mois. Cette infatigable activité leur a valu l'admiration de M. le Général Alfaro. Il n'est que juste de reconnaître que de si prompts résultats n'ont pu être atteints que grâce à la bonne volonté constante des agents équatoriens.

Les croquis rapportés par MM. Maurain et Lacombe témoignent du soin avec lequel cette reconnaissance a été menée. Les environs de chaque station géodésique et de chaque base ont été l'objet de levés topographiques sommaires accompagnés de tours d'horizon, et ces levés fourniront à la Mission définitive tous les renseignements dont elle peut avoir besoin.

Ce travail fait le plus grand honneur à MM. Maurain et Lacombe, et montre ce qu'on peut attendre des officiers de notre Service géographique.

C'est à la suite du Rapport qui lui fut adressé par les membres de cette reconnaissance que M. le Ministre de l'Instruction publique, persuadé désormais de la possibilité de l'opération, a écrit à l'Académie des Sciences pour lui demander son avis.

Sur le fond même de la question, cet avis ne pouvait être douteux. L'intérêt scientifique de cette détermination est manifeste. Tous les corps savants, l'Académie elle-même, le Bureau des Longitudes, la Commission géodésique française, l'Association internationale, se sont déjà à plusieurs reprises prononcés sur ce point, et j'ai déjà exposé plus haut les raisons de leur opinion ; ces raisons sont trop évidentes pour qu'il y ait lieu d'insister davantage.

Mais, outre cet intérêt scientifique, cette entreprise présente pour nous un véritable intérêt national. Si notre pays se doit à lui-même de prendre sa part des conquêtes nouvelles de la Science moderne, à plus forte raison il ne peut pas abandonner une position sur laquelle les efforts de nos pères ont fait flotter pour ainsi dire le drapeau intellectuel de la France. Nos droits ont été publiquement reconnus. Répondrons-nous à ces courtoises invitations par une déclaration d'impuissance ? La France est aussi vivante et plus riche qu'il y a cinquante ans. Pourquoi laisserait-elle à des nations réputées plus jeunes le soin d'achever ce que la France d'autrefois avait commencé ?

Si ces raisons doivent frapper tous les Français, elles sont plus particulièrement sensibles aux membres de notre Compagnie. C'est l'ancienne Académie des Sciences, dont nous sommes les héritiers, qui a accompli l'œuvre de 1735, et ces souvenirs, glorieux, pour tous, le sont particulièrement pour nous.

M. le Ministre n'a eu garde de méconnaître les droits de l'Académie.

Je ne saurais oublier, dit-il dans sa Lettre, que l'œuvre qu'il s'agit de réaliser est la continuation de celle qu'accomplirent au siècle dernier les membres de l'ancienne Académie. Je ne saurais oublier davantage l'initiative prise en 1889 par l'Académie des Sciences. La présente Communication n'a donc pas simplement pour objet de vous transmettre des renseignements au sujet d'une entreprise qui ne peut pas manquer de vous intéresser. Je voudrais, en plaçant la nouvelle opération sous le haut patronage scientifique de votre Compagnie, lui demander le concours de ses lumières. »

De quelle manière devra s'exercer le haut patronage dont parle la Lettre ministérielle ? Il va sans dire qu'il ne doit pas être purement nominal et qu'il implique un contrôle effectif des opérations.

Convient-il d'aller plus loin ? Quelques personnes l'avaient proposé en 1889. D'après elles, l'Académie devrait accepter tout entier l'héritage de Bouguer et Lacondamine, et envoyer un de ses membres à l'Équateur pour diriger lui-même les opérations, comme l'avaient fait les Académiciens du siècle dernier. Votre Commission a pensé qu'on ne devait pas donner suite à cette proposition.

Les circonstances ont, en effet, complètement changé depuis le temps de Lacondamine ; alors tout était à créer ; aujourd'hui, tout est organisé, et l'on ne comprendrait pas qu'on hésitât à se servir de l'admirable organisation qui existe.

Dans les opérations de cette nature, la haute compétence scientifique, l'habileté technique elle-même et les habitudes de scrupuleuse régularité sont des qualités qui restent indispensables, mais qui ne sauraient suffire. Il faut être en état de supporter de grandes fatigues, dans des pays sans ressources et sous tous les climats ; il faut savoir conduire les hommes, obtenir l'obéissance de ses collaborateurs et l'imposer aux serviteurs à demi civilisés que l'on est bien forcé d'employer. Toutes ces qualités intellectuelles, morales et physiques se trouvent réunies chez les officiers de notre Service géographique. Qu'on puisse les trouver également dans d'autres corps constitués ou même chez de simples hommes de Science n'appartenant à aucun corps, nous n'avons garde d'y contredire. Les Académiciens du XVIII^e siècle l'ont bien prouvé, dans un temps où les difficultés étaient bien plus grandes qu'aujourd'hui.

Mais enfin il y a un corps qui est fait pour ce travail ; nous ne sommes pas sûrs de trouver aussi bien, nous sommes sûrs de ne pas trouver mieux. Et ce

que nous n'aurions pas ailleurs, c'est la cohésion, l'habitude de travailler ensemble et d'appliquer les mêmes méthodes, la discipline, enfin, qui permettra de faire vite et sans tâtonnement.

Nous n'insisterons pas sur l'économie considérable que l'on réalisera en se servant d'un personnel militaire, mais il convient de faire remarquer que l'opération à entreprendre n'est pas isolée, qu'elle n'est qu'un détail dans un grand ensemble; que cet ensemble doit rester homogène pour que les éléments en soient comparables et qu'il importe, par conséquent, que le nouveau travail soit exécuté par le même corps, par les mêmes méthodes et avec les mêmes instruments que la grande méridienne de France.

D'ailleurs, en laissant cette tâche au Service géographique, l'Académie n'abdiquera pas. Les méthodes dont ce corps conserve les traditions sont sorties de l'œuvre de nos prédécesseurs; comme gardien de cet héritage, il n'est pas pour nous un étranger; l'Académie l'a toujours compris et elle a toujours cherché à faire entrer dans son sein le chef de ce service. Le directeur actuel, M. le Général Bassot, est un de nos Confrères.

Si, l'Académie, pendant une phase quelconque des opérations, le jugeait nécessaire, le Général Bassot serait prêt à se rendre à Quito et nous apprécierons certainement beaucoup les services qu'il pourrait nous rendre ainsi; mais, si même il ne faisait pas ce voyage, ce serait toujours notre Confrère qui dirigerait de loin les officiers placés sous ses ordres.

L'Académie devrait, en outre, avoir un rôle de contrôle scientifique; les carnets d'observations et de calculs devraient lui être soumis et il y aurait lieu, sans doute, de nommer une Commission chargée de les examiner.

Arrivons à l'examen des détails de l'avant-projet.

Mesure des bases.

Trois bases seront mesurées; chacune d'elles aura environ 8500^m. La base principale sera située vers le milieu de l'arc, près de Riobamba, à une latitude d'à peu près 1° 5 Sud et à une altitude d'environ 2500^m.

En outre, deux bases de vérification seront établies près des deux extrémités de l'arc, l'une au Nord, près de Cumbal, sur le territoire colombien; l'autre au Sud, entre Quiroz et Sullana, sur le territoire péruvien.

Il importe que les mesures soient faites avec le même instrument qui a servi pour la méridienne de France. Non seulement cet appareil a fait ses preuves,

mais les résultats doivent être comparables, et ils ne sauraient l'être si l'on n'opère avec l'instrument qui a été employé dans les mesures précédentes (quitte à se munir d'appareils de réserve pour le cas d'accident).

Depuis quelque temps, on a commencé à étudier les alliages de fer et de nickel dont la dilatation est extrêmement faible. Il est possible que ces alliages, que nous devons à M. Guillaume, rendent dans l'avenir les plus grands services pour la mesure des bases. Jusqu'ici, toutefois, leurs propriétés sont assez mal connues. Elles ne peuvent l'être qu'à la suite d'expériences longues et difficiles.

On a proposé, non de substituer les règles en métal Guillaume aux règles bimétalliques, mais d'emporter à l'Équateur les appareils des deux systèmes afin de pouvoir faire pour chaque base des mesures comparatives. La Commission n'a pas cru devoir adopter cette proposition; cela serait en réalité greffer sur la mesure de l'arc de Quito les expériences sur la valeur de la nouvelle règle. Ces expériences sont nécessaires et elles se feront; mais il vaut mieux qu'elles se fassent indépendamment. Faites en France, elles coûteront moins cher et l'on pourra plus facilement y consacrer le temps nécessaire.

Mesure des angles.

Le territoire de la République de l'Équateur sur lequel on doit opérer se divise en une série de zones d'altitudes très différentes qui sont, en partant de l'Océan Pacifique : 1° une plaine basse; 2° la chaîne des Cordillères occidentales; 3° le plateau de Quito; 4° la chaîne des Cordillères orientales; 5° la plaine des hauts affluents de l'Amazone.

Les deux chaînes ont une altitude générale d'environ 4000^m ou 4500^m, mais au-dessus de laquelle s'élèvent un certain nombre de pics généralement volcaniques qui atteignent ou même dépassent 6000^m. L'altitude moyenne du plateau est de 2500^m.

Toutefois, les deux chaînes et le plateau s'abaissent notablement dans la partie Sud.

La plaine du Pacifique reste à une basse altitude (300^m à 400^m) jusqu'aux premières pentes des Cordillères; de même la plaine de l'Amazone commence assez brusquement au pied des Cordillères orientales, avec des altitudes moyennes d'environ 500^m.

La largeur de ces différentes zones est naturellement assez variable.

A la latitude de la base principale, la plaine du Pacifique a une largeur d'à

peu près 180^{km} , le versant occidental (des premiers escarpements au faite) 45^{km} ; le plateau (entre les deux faîtes) 50^{km} , le versant oriental (du faite à la plaine) 25^{km} .

Plus au Sud, les deux chaînes se rapprochent de l'Océan; d'autre part, la côte présente une échancrure profonde qui est le golfe de Gayaquil.

Pour ces deux raisons la largeur de la plaine occidentale est considérablement diminuée. C'est cette circonstance qui permettra, comme nous le verrons plus loin, de pousser la triangulation jusqu'à la mer.

Cette configuration du terrain imposait pour ainsi dire le plan général de la triangulation.

On construira deux séries de stations, les unes sur la chaîne occidentale, soit sur les sommets, soit sur les flancs des montagnes, les autres sur la chaîne orientale.

Ces stations seront au nombre de cinquante-deux, dont vingt-huit seront empruntées à l'ancienne chaîne de Bouguer et Lacondamine.

Leur altitude sera souvent de 4000^{m} . Les côtés des triangles auront de 30^{km} à 40^{km} .

La chaîne des triangles suivra donc la direction générale des Cordillères, et comme cette direction n'est pas exactement Nord-Sud, cette chaîne devra elle-même être légèrement inclinée sur le méridien de telle sorte que la différence de longitude des deux extrémités sera un peu moins de 3° .

Dans la partie Sud du golfe de Gayaquil, les hauteurs se rapprochent assez de la côte pour qu'on puisse joindre à la triangulation générale un point situé sur le bord de la mer et où se trouve un ancien phare.

Les opérations seront dirigées de la façon suivante : les officiers composant la Mission se partageront en deux brigades dont l'une se portera de station en station sur la chaîne occidentale, pendant que l'autre fera de même sur la chaîne orientale. Bien entendu, la marche des deux brigades devra se poursuivre parallèlement de telle façon que les stations où elles opéreront en même temps soient toujours en vue l'une de l'autre.

D'un autre côté, l'expérience prouve qu'il est impossible dans ce pays de construire des signaux; ils seraient détruits par les indigènes; il sera donc nécessaire d'employer des héliostats. Chaque brigade devra, en conséquence, être accompagnée de deux postes comprenant des sous-officiers ou soldats français exercés à la télégraphie optique. Pendant que les observateurs s'installeront dans une station, l'un de ces postes occupera la station précédente de la

même chaîne, et l'autre la station suivante, de façon à pouvoir envoyer des signaux aux officiers.

Astronomie fondamentale.

Les trois éléments astronomiques fondamentaux, latitude, longitude et azimut, seront déterminés avec le plus grand soin dans trois stations, la première à Quito, vers le milieu de l'arc, et à 1°,5 environ au nord de la base principale; les deux autres à petite distance des deux bases extrêmes.

Quito possède un Observatoire muni de bons instruments. Le Gouvernement français a mis à la disposition du Gouvernement équatorien pour une période de cinq ans un de nos plus habiles astronomes, M. Gonessiat, de l'Observatoire de Lyon. Ce savant va prendre la direction de l'Observatoire de Quito.

Cette combinaison, si heureuse au point de vue de l'influence extérieure de la France, a été rendue possible par la munificence de deux donateurs anonymes, et je suis heureux d'avoir l'occasion de rendre ici hommage à leur généreuse pensée.

En tout cas, cette circonstance facilitera singulièrement les opérations de la Mission. Pendant que les officiers opéreront dans les stations extrêmes, M. Gonessiat fera des observations simultanées à Quito. Cette simultanéité, indispensable pour les observations de longitudes, sera aussi précieuse pour la mesure de la latitude et nous fera connaître les différences de latitude avec une très grande précision.

Longitudes.

Le télégraphe rejoint maintenant Quito à Gayaquil et à un point très voisin de la station astronomique Nord. Entre Quito et Gayaquil, il y a un relai; il y en a un également entre Quito et la station Nord. Mais il sera facile de supprimer ces relais en employant un nombre suffisant de piles.

Vers le Sud, le télégraphe est poussé moins loin et il s'arrête à une assez grande distance de la station astronomique; mais on travaille actuellement à le prolonger et il est certain qu'au moment du besoin il pourra être facilement relié à la station Sud.

Les différences de longitude entre Quito et les deux stations astronomiques principales, et entre Quito et Gayaquil pourront ainsi être déterminées sans relai télégraphique, c'est-à-dire avec une grande précision.

Gayaquil est relié par des câbles sous-marins au réseau télégraphique général; on pourra donc connaître sa différence de longitude avec l'Amérique du Nord. Mais ici l'emploi de relais sera inévitable et la précision sera moindre. Elle sera d'ailleurs beaucoup moins nécessaire.

Astronomie secondaire.

Outre les trois stations astronomiques principales, il sera établi six stations astronomiques secondaires où l'on mesurera des latitudes différentielles et des azimuts secondaires. Ces stations seront sensiblement espacées de degré en degré.

L'une d'elles, Chuyuj, est voisine de la base principale.

Nivellements.

Les bases devant être réduites au niveau de la mer, il importe de connaître leur altitude avec une assez grande exactitude.

L'altitude de la base centrale nous sera donnée par une opération de nivellement géométrique de précision, avec les méthodes créées par M. Lallemand et employées dans le nivellement général de la France. Ces méthodes sont familières aux officiers du Service géographique, qui en ont fait usage en Algérie.

Ce nivellement se fera le long du tracé du futur chemin de fer de Gayaquil à Quito.

Le niveau de la mer sera déterminé par un médimarémètre. On n'a pas cru devoir établir cet instrument à Gayaquil. Ce port se trouve, en effet, au fond d'une baie longue et étroite qui débouche elle-même sur le golfe de Gayaquil. On pourrait donc craindre qu'il y eût de légères différences entre le niveau moyen du port et celui de la pleine mer. C'est pourquoi le médimarémètre sera placé à Playas, sur la côte du Pacifique proprement dit, un peu avant l'entrée du golfe et à 70^{km} de Gayaquil.

La ligne de nivellement du médimarémètre à la base présentera un développement total d'environ 280^{km}. Du médimarémètre à Gayaquil, puis de Gayaquil à Puente de Cimbo, c'est-à-dire sur 170^{km}, l'altitude s'élève lentement jusqu'à 345^m; de ce point jusqu'à Sibambe, où la ligne de nivellement rejoint la chaîne trigonométrique, on monte rapidement de 345^m à 2470^m sur 35^{km}; sur le reste

du tracé, de Sibambe à la base, l'altitude reste élevée, mais sensiblement constante.

On ne peut songer à relier les deux bases extrêmes à la mer par des lignes de nivellement analogues. On devra se contenter des données du nivellement géodésique. A cet effet on mesurera dans chaque station les distances zénithales. Toutes les fois que cela sera possible, on procédera par mesures réciproques et simultanées, ce qui permettra d'éliminer la réfraction géodésique et d'en étudier les lois.

On doit pourtant observer que l'une des brigades suivant toujours la chaîne occidentale et l'autre la chaîne orientale, le nivellement géodésique ne pourrait être prolongé d'une base à l'autre *par mesures réciproques et simultanées* que le long d'une ligne en zigzag passant alternativement d'une chaîne à l'autre.

Il n'est pas même certain que le long de ces lignes ces mesures simultanées puissent se faire sans difficulté et sans pertes de temps. En tout cas, les mesures de distances zénithales seront, sinon simultanées, du moins toujours réciproques et la précision restera suffisante.

En effet, d'après les comparaisons des mesures faites en France et en Algérie, l'incertitude ne serait que de quelques mètres, ce qui amènerait pour la base réduite au niveau de la mer une erreur de $1/1\,000\,000^{\circ}$ à peu près. Or la concordance des bases calculées et des bases mesurées ne se vérifie généralement qu'avec une précision beaucoup moindre, et si l'on a été parfois jusqu'au $1/500\,000^{\circ}$ peut-être par suite de compensations fortuites entre les erreurs, c'est sur le $1/100\,000^{\circ}$ seulement qu'il convient de compter.

Observations du pendule.

Les mesures de gravité sont partout le complément indispensable des opérations géodésiques; mais il y a une raison, sur laquelle d'ailleurs nous reviendrons plus loin, et qui les rend encore plus importantes dans le cas qui nous occupe.

La région où l'on doit opérer est une des plus élevées du Globe, et le relief considérable des Andes porterait à penser qu'il peut s'y produire des attractions supplémentaires capables de produire des anomalies de la gravité et un relèvement local du géoïde. Ce relèvement ainsi que les déviations de la verticale aux extrémités de l'arc seraient de nature à affecter gravement le résultat.

Ce serait là même une objection sérieuse contre le choix de cette méridienne si les observations pendulaires ne nous fournissaient pas précisément un moyen de reconnaître l'existence de ces anomalies, d'évaluer les erreurs qui en résultent et au besoin de les corriger.

Le projet prévoit sept ou huit mesures de pesanteur disposées suivant une coupe partant de la côte vers Gayaquil, passant au pied du Chimborazo, à Quito, et aboutissant au versant oriental du massif Cotopaxi-Antisana.

Il en résultera évidemment les indications les plus précieuses, puisqu'on verra ainsi comment varie la pesanteur depuis la côte jusqu'au pied des Cordillères, puis jusqu'au faite de la chaîne occidentale et jusqu'au plateau; on se rendra compte de plus des anomalies qui résultent de la présence des deux massifs les plus élevés, ceux du Chimborazo et du Cotopaxi.

Ce n'est pas assez, toutefois, et nous pensons qu'il serait désirable de multiplier encore les stations, ce qui n'entraînera pas de dépenses supplémentaires importantes, si l'on prend soin de combiner le plan d'opérations de façon à éviter des déplacements inutiles.

Il faudrait faire des observations tout le long de la chaîne pour se rendre compte de la façon dont les anomalies de la pesanteur varient depuis la base Nord jusqu'à la base Sud. On pourrait, par exemple, faire des mesures dans chacune des stations astronomiques principales et secondaires et dans le voisinage des bases.

D'un autre côté, on aurait intérêt à posséder des données sur les valeurs de la gravité dans la plaine située à l'est des Andes; et, en effet, le relèvement général du géoïde ne dépend pas seulement de l'intensité de la pesanteur au point où l'on veut évaluer ce relèvement et dans son voisinage immédiat, mais il dépend aussi de la valeur de g dans les régions un peu plus éloignées.

Toutefois, nous devons remarquer que cette plaine est peu habitée et presque inexplorée, qu'on n'y saurait pénétrer sans escorte. C'est donc sur place qu'on pourra s'assurer de la possibilité de cette expédition. C'est d'ailleurs seulement quand les opérations seront plus avancées qu'on verra si les ressources dont dispose encore la Mission lui permettent de l'entreprendre.

Au contraire, il est une autre station où l'observation du pendule serait fort intéressante et pourrait se faire sans aucune difficulté. Je veux parler de celle où sera placé le médimarémètre. Il est possible, en effet, que l'influence des Andes se fasse déjà sentir à Gayaquil, et qu'on trouve une différence entre les deux stations.

Toutes ces mesures se feront avec le pendule *relatif* de M. le Colonel Defforges. Les déterminations relatives suffisent en effet pour notre objet, et le transport du pendule *absolu* présenterait de grandes difficultés.

Observations magnétiques.

Les observations magnétiques se rattachent moins directement aux travaux géodésiques. Mais on profitera du voyage de la Mission pour déterminer les trois éléments magnétiques absolus : déclinaison, inclinaison et composante horizontale, au moins pour toutes les stations astronomiques, qui sont au nombre de neuf.

Les officiers s'exerceront avant leur départ au maniement des instruments magnétiques, à l'Observatoire magnétique du parc Saint-Maur, sous la direction de M. Moureux, dont la compétence est bien connue de l'Académie.

Observations géologiques et topographiques.

Il est nécessaire de corriger les latitudes observées des déviations locales de la verticale, et pour cela de calculer l'attraction locale due aux massifs apparents les plus voisins des stations d'observation. Une correction analogue devra souvent être appliquée aux mesures pendulaires.

A cet effet, il faudra faire un levé topographique de ces massifs à une échelle suffisante, afin d'évaluer leur volume, et une étude géologique sommaire des roches qui les constituent, afin de connaître leur densité.

Un membre de la Commission a proposé de choisir pour médecin de la Mission un homme habitué aux recherches pétrographiques et géologiques. Mais la majorité n'a pas jugé que cette solution fût la meilleure.

Si l'on peut espérer de trouver chez le médecin militaire attaché à la Mission des connaissances zoologiques et botaniques, si cela est même désirable à tous égards, il n'y a aucune raison de supposer qu'on ait plus de chances de rencontrer parmi les médecins un géologue compétent. Ce sont plutôt les officiers eux-mêmes qui sont préparés par leurs études et leurs travaux antérieurs à l'étude pétrographique des terrains.

On a donc pensé que le mieux était de prier M. Fouqué ou M. Lacroix de donner à quelques officiers leurs conseils éclairés et de les exercer au Muséum aux déterminations pétrographiques et au choix judicieux des échantillons.

Examen du devis.

Nous nous étendrons peu sur le devis estimatif, qui échappe à notre compétence, et nous nous bornerons à faire ressortir l'impression générale qui se dégage d'un premier examen.

C'est que ce devis a été établi avec grand soin et avec un souci constant d'éviter les doubles emplois et les dépenses inutiles. Il ne semble pas qu'il puisse être réduit.

En effet, on doit tenir compte de ce fait que, malgré la bonne volonté du Gouvernement de l'Équateur, son concours sera forcément limité.

Il pourra fournir à la Mission une escorte et des hommes pour les transports. Mais cette escorte et ces auxiliaires devront probablement être payés.

Sans doute, on peut espérer que le crédit demandé ne sera pas entièrement dépensé; les évaluations ont été faites largement et en tenant compte d'éventualités qui ne se présenteront peut-être pas. Cela était nécessaire, afin d'être assuré que le devis ne serait pas dépassé; mais en escomptant les circonstances heureuses et en réduisant d'avance le crédit, on s'exposerait à des surprises.

Il ne semble pas qu'aucun des articles du devis puisse donner lieu à une contestation.

Il était nécessaire, par exemple, de prévoir le cas où quelques-uns des officiers auraient besoin d'un congé pendant une campagne si longue et si fatigante.

Il était nécessaire d'emmener un mécanicien pour faire sur place les réparations des instruments; car le renvoi des instruments en France, à cause du prix des transports et des délais qui résulteraient d'un aussi long voyage, entraînerait des dépenses considérables.

Enfin, tandis que la Mission principale partira au mois de février ou de mars prochain en vue d'une campagne de quatre ans, deux officiers partiront six mois plus tôt, en septembre 1900, afin de préparer les voies et d'acheter les animaux destinés aux transports. Il est évident que cette disposition produira en définitive une économie notable.

Étendue de l'arc.

Il nous reste à traiter deux importantes questions. La première a été soulevée par la Lettre ministérielle elle-même.

« Toutefois, dit M. le Ministre, il y a lieu de considérer que la dépense pourrait être réduite dans une assez forte proportion s'il était possible, sans inconvénient scientifique, de réduire l'arc actuellement prévu de 6° à $4^{\circ},5$, de la base de Colombie à la base de Targui; on supprimerait ainsi la partie la plus difficile des travaux.... Je prierais l'Académie de me faire connaître son sentiment sur la question de l'amplitude de l'arc à mesurer et de me dire si la mesure d'un arc de $4^{\circ},5$ lui paraîtrait répondre suffisamment aux besoins de la Science. »

L'arc mesuré au XVIII^e siècle s'étendait de la station de Mira, par $0^{\circ}35'N$, jusqu'à la base de Targui, par $3^{\circ}10'S$. Il s'étendait ainsi sur environ $3^{\circ},5$. Il est question de le prolonger vers le Nord jusqu'à Cerro de Pasto, par $1^{\circ}12'N$, soit de trois quarts de degré environ, et vers le Sud jusque sur le territoire péruvien, par $4^{\circ}55'S$, soit d'à peu près $1^{\circ},5$.

La proposition visée dans le paragraphe que je viens de citer consisterait à supprimer le prolongement vers le Sud, ce qui réduirait l'arc à $4^{\circ},5$.

Nous devons d'abord remarquer que l'arc à mesurer doit être combiné avec des arcs de grande amplitude pris dans les latitudes moyennes et qui ont une vingtaine de degrés; j'ai cité plus haut les plus importants de ces arcs; il serait à désirer que la nouvelle détermination eût un poids comparable.

Or, il est évident que ce poids sera d'autant plus grand que l'arc sera plus étendu. La principale cause d'erreur est, en effet, l'incertitude sur les latitudes extrêmes, en raison des attractions locales qui peuvent faire dévier la verticale. Cette déviation et par conséquent cette incertitude, toutes choses égales d'ailleurs, seront indépendantes de l'amplitude de l'arc, de sorte que l'erreur relative qui en résultera variera en raison inverse de cette amplitude.

A ce compte, en réduisant l'arc de 6° à $4^{\circ},5$, on réduirait d'un quart sa valeur scientifique; mais, en réalité, ces sortes d'appréciations ne peuvent se traduire par des chiffres. Quand une détermination devient deux fois plus précise, est-il vrai que sa valeur scientifique devient seulement deux fois plus grande? Tous les savants répondront que la progression est beaucoup plus rapide, que pour avoir deux fois autant de précision ils devront dépenser beaucoup plus de deux fois autant de peine, et qu'ils ne la regretteront pas.

D'un autre côté, plusieurs membres de la Commission ont émis l'avis que, les frais généraux restant les mêmes, la dépense ne serait réduite que d'un sixième.

Mais un examen plus approfondi du devis montre que cette évaluation est encore très exagérée.

Il n'y aurait aucune économie ni sur la mesure des bases, ni sur les indemnités d'entrée en campagne, ni sur le transport du personnel et du matériel de France en Amérique, ni sur le nivellement de précision, ni sur l'achat des mules.

En ce qui concerne la mesure des angles, l'économie n'est pas la même, si l'on veut rattacher la triangulation à la mer, au point dit « l'ancien Phare », dont j'ai parlé plus haut, ou si l'on renonce à ce rattachement.

Si l'on veut rejoindre la mer, jonction dont l'intérêt est manifeste, on ne pourra supprimer que neuf stations, à savoir les cinq stations péruviennes et celles d'Acacana, Pisaca et Ama. Je ne parle pas des deux stations situées aux extrémités de la base, qui se trouveraient supprimées également, mais qui devraient être remplacées par deux stations analogues aux extrémités de la base de Targui.

Si l'on renonce à joindre la mer, on pourra supprimer en plus Chilla, Muellepungo, Minas et l'ancien Phare, de sorte qu'on économiserait en tout treize stations.

La durée de l'opération serait ainsi diminuée de deux mois.

Pour les mesures astronomiques, la station principale du Sud serait supprimée, ainsi que la station secondaire du Cerro Chacas, mais la station secondaire de Purin devrait devenir principale.

En somme, on aurait quatre stations secondaires au lieu de six; d'où une nouvelle économie de deux mois.

L'entretien du personnel français pendant un mois montant à 4175^{fr}, l'économie en argent serait de 16700^{fr}. Cette évaluation est très exagérée, car le séjour de chaque membre de la Mission ne serait pas réduit de quatre mois, et, en particulier, l'officier supérieur chef de la Mission devrait néanmoins rester un an à l'Équateur. Quant à une réduction du personnel, elle ne saurait se faire sans nuire à la rapidité et à la bonne exécution du travail.

Les frais occasionnés par la mesure des angles, soit 38 000^{fr}, seraient réduits d'un quart environ (toujours en renonçant à la jonction à la mer), soit 9500^{fr}.

Les dépenses des stations secondaires seraient réduites d'un tiers, soit 3900^{fr}.

Cela fait en tout environ 30 000^{fr}, mettons 35 000^{fr} pour tenir compte de divers frais de transport et des économies réalisables sur les mesures de gravité.

Cette évaluation, qui est plutôt exagérée, suffit pour expliquer comment votre Commission a été unanime à penser que l'arc devait être prolongé sur 6°.

Relèvement du géoïde.

La seconde question se rapporte au relèvement du géoïde que pourrait produire l'attraction du massif des Andes. M. Hatt, dans les séances de la Commission, a insisté à plusieurs reprises sur les difficultés qui peuvent en résulter.

Nous devons d'abord nous demander quelle est l'importance probable ou possible de ce relèvement. Quelques auteurs avaient parlé de 150^m. Si l'on calcule l'effet de l'attraction d'un massif cylindrique de 3000^m de hauteur et de 150^{km} de diamètre, en supposant la densité moitié de celle de la Terre, on trouve un relèvement maximum de 50^m. Le résultat pourrait être augmenté, et peut-être doublé, pour la chaîne des Andes, qui ne se réduit pas à un massif circulaire, mais s'étend tout le long de la côte du Pacifique.

Mais il faut tenir compte aussi de l'influence probable des masses intérieures. On sait que les observations du pendule dans les régions montagneuses ont mis en évidence un fait des plus curieux. Les valeurs observées de la gravité sont toujours en déficit sur les valeurs calculées par la formule de Bouguer. Elles s'accordent, au contraire, assez bien avec une autre formule, due à M. Faye, et où l'on néglige complètement l'attraction des massifs montagneux.

Ce fait inattendu, sur lequel M. Faye a appelé à plusieurs reprises l'attention du monde savant, montre que l'attraction des massifs montagneux apparents est compensée, du moins en grande partie, par la distribution intérieure des masses, de telle sorte que, si la formule de M. Faye était rigoureusement exacte, le relèvement du géoïde serait nul.

Il en est à peu près ainsi dans les Alpes et l'Himalaya. En sera-t-il de même dans les Andes? Les différences de structure stratigraphique et de constitution lithologique ne nous permettent pas de l'affirmer. L'observation peut seule décider.

Nous devons voir maintenant quelles peuvent être les conséquences de ce relèvement sur les résultats de nos mesures.

Pour bien le faire comprendre, nous devons distinguer trois surfaces :

- 1° L'ellipsoïde de révolution, qui diffère le moins de la forme de la Terre;
- 2° Le géoïde vrai, c'est-à-dire la surface d'équilibre des eaux tranquilles

sous l'influence de la force centrifuge et de l'attraction de toutes les masses, tant apparentes qu'intérieures;

3° Le géoïde corrigé, c'est-à-dire la figure d'équilibre que prendraient ces mêmes eaux tranquilles si l'on supprimait quelques-uns des massifs les plus apparents.

Il est clair que le géoïde corrigé, dont la définition reste d'ailleurs arbitraire dans une large mesure, différera très peu du géoïde vrai, mais présentera moins de petites irrégularités locales.

Le théorème de Legendre et Gauss prouve d'abord que nos mesures nous donneront exactement la véritable longueur d'un arc méridien du géoïde vrai (ou du géoïde corrigé, si l'on a calculé convenablement les attractions locales), à la seule condition que la base ait été correctement réduite au niveau de la mer, je veux dire du géoïde.

Jusqu'à quel point cette condition sera-t-elle réalisée? A cause de la grande altitude de la base, elle ne le sera qu'au prix de certaines précautions. Soit α l'angle de la normale au géoïde et de la normale à l'ellipsoïde. Si la variation de cet angle entre les deux extrémités de la base est de $1''$, il est aisé de calculer que l'erreur sur la réduction de la base sera d'un peu plus de 1^{cm} .

Mais si nous obtenons ainsi exactement la courbure d'un certain arc du géoïde, il n'est pas certain que cette courbure ne s'écarte pas notablement de celle de l'ellipsoïde; il peut se faire qu'on ait pris les mesures sur une bosse toute locale du géoïde, et que la courbure y soit très différente de ce qu'on aurait trouvé dans une autre partie peu éloignée de ce même géoïde, sur le bord du Pacifique par exemple.

Il importe de se mettre en garde contre une semblable erreur, et l'on ne peut le faire qu'en cherchant à évaluer le relèvement du géoïde. Quels sont les moyens que l'observation nous fournit pour cela?

Il y en a deux : le premier est l'observation pendulaire. C'est le moins coûteux et c'est le plus sûr, parce qu'on peut multiplier les mesures. Mais il ne donnera le relèvement cherché que si les cotes sont assez nombreuses pour qu'on ait une idée approximative des variations de la gravité dans toute la région considérée.

Toutefois, ce premier moyen ne devrait pas nous faire négliger le second, si sur place on le reconnaissait praticable et suffisamment économique. Ce second moyen est la mesure de la différence de longitude astronomique entre

un point de la côte et Quito et sa comparaison avec la différence de longitude géodésique.

Il est clair qu'on pourra en déduire, sinon le relèvement absolu du géoïde, du moins la différence entre les valeurs de ce relèvement à Quito et sur le bord du Pacifique.

Mais, pour que cette opération puisse se faire, il faut trouver sur le littoral un point dont on puisse avoir à la fois la longitude astronomique et la longitude géodésique. Gayaquil, au nord du golfe du même nom, et relié à Quito par le télégraphe; on en mesurera donc la longitude astronomique. D'un autre côté, l'ancien Phare, au sud du même golfe, sera rattaché au réseau trigonométrique, ce qui permettra d'en calculer la longitude géodésique.

En revanche, on ne peut avoir ni la longitude astronomique de l'ancien Phare, puisque le télégraphe n'y va pas, ni la longitude géodésique de Gayaquil, parce que la plaine entre cette ville et les Cordillères est plate, boisée et sans vues.

Mais il y a au milieu du golfe de Gayaquil une île appelée Puna; dans cette île se trouvent quelques collines que l'on pourrait peut-être raccorder à la triangulation au moyen d'un ou deux triangles. On peut espérer, d'autre part, que le télégraphe sera d'ici à quelques mois prolongé de Gayaquil à Puna.

La mesure des deux sortes de longitude deviendrait alors possible.

Conclusions.

En résumé, votre Commission vous propose :

1° D'émettre un avis favorable au projet de revision de la méridienne de Quito;

2° D'insister auprès de M. le Ministre pour que l'arc mesuré soit de 6° et non de 4°,5;

3° D'émettre le vœu que l'opération soit confiée au Service géographique de l'Armée, sous le haut patronage et sous le contrôle scientifique de l'Académie des Sciences;

4° De nommer une Commission permanente chargée de suivre et de contrôler les opérations de la Mission;

5° D'approuver dans ses traits généraux l'avant-projet qui nous est soumis, sous la réserve des observations contenues dans ce Rapport et, en particulier, de celles qui se rapportent à la nécessité de multiplier les mesures pendulaires.

Après discussion en Comité secret, l'Académie adopte les conclusions du Rapport.

