

ASSOCIATION  
FRANÇAISE

POUR

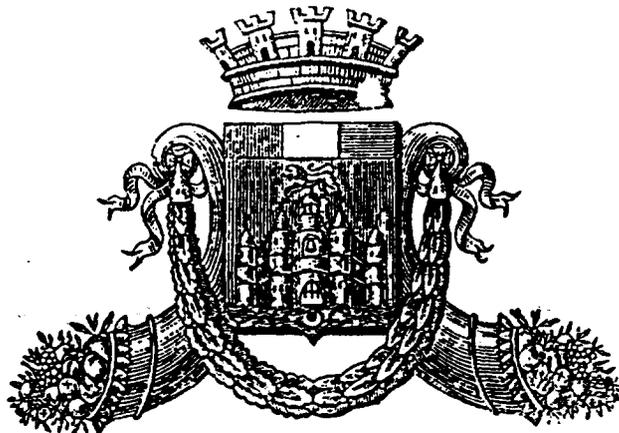
L'AVANCEMENT DES SCIENCES

COMPTES-RENDUS DE LA 1<sup>re</sup> SESSION

1872

---

BORDEAUX

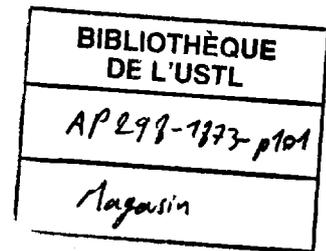


PARIS

AU SECRÉTARIAT DE L'ASSOCIATION

76, RUE DE RENNES, 76

—  
1873



**M. F. PERRIER,**

Capitaine d'état-major, ancien élève de l'école polytechnique.

**De la Méridienne de France.**

On donne le nom de Méridienne de France à la portion de l'arc du méridien de Paris comprise entre les limites Nord et Sud du territoire français, et, plus généralement, par extension, à la grande chaîne de triangles géodésiques du premier ordre, qui s'étend le long de ce méridien, et dont les sommets extrêmes situés en France sont Dunkerque, au Nord, et Perpignan, au Sud. Une chaîne d'une telle étendue fournit des résultats scientifiques d'une haute importance, car elle permet de calculer la longueur d'un arc de méridien terrestre d'une amplitude considérable, et d'obtenir, en combinant cette longueur avec celle d'autres arcs mesurés sous des latitudes différentes, les éléments fondamentaux de la figure du sphéroïde terrestre (demi-grand axe et aplatissement). En outre, elle constitue la chaîne primordiale et comme l'ossature fondamentale du réseau géodésique français; c'est d'elle, en effet, que dérivent les chaînes principales méridiennes et parallèles, les réseaux continus des divers ordres qui couvrent notre pays et, enfin, les points qui servent de jalons aux levés et aux nivellements topographiques, dont l'ensemble constitue la carte de France.

Les opérations qu'il est nécessaire d'effectuer pour déterminer les éléments de cette chaîne, et pour la placer et l'orienter sur notre globe : mesure des bases, mesure des angles horizontaux et des angles de hauteur, détermination des latitudes, longitudes et

azimuts, etc., ainsi que les calculs complexes et difficiles qui en résultent, composent la partie la plus délicate d'une science spéciale peu connue et presque dédaignée en France, bien qu'elle soit de création française, qu'on nomme *géodésie*, qu'on pourrait aussi appeler *géographie mathématique*, et qui n'est qu'une branche particulière de la géographie générale.

Déjà, à trois époques de notre histoire, les destinées de la géodésie française se sont agitées autour de la méridienne de France. Le même fait se reproduit encore aujourd'hui. C'est donc à des titres bien divers, Messieurs, que la méridienne de France intéresse notre Association.

C'est vers 1550 que fut exécutée par Fernel, qui était médecin, mais aussi astronome, la première opération relative à la méridienne de France; elle consista dans la mesure d'un arc d'un degré, effectuée sur la route de Paris à Amiens, en comptant le nombre de tours d'une roue de voiture, dont la circonférence avait été très exactement déterminée. Fernel s'achemina vers le Nord, en supposant que sa route était située dans un même méridien, jusqu'à ce qu'il eût trouvé la hauteur du pôle augmentée d'un degré. Le procédé était grossier, et cependant, par un hasard singulier, il donna un résultat assez juste.

Plus d'un siècle après, en 1669, l'abbé Picard, qui avait déjà rendu à l'astronomie un service capital, en substituant aux pinnules, dans les grands instruments, les lunettes et les micromètres, mesura un arc d'un degré entre Malvoisine et Amiens, en apportant, dans ses opérations, une grande exactitude et des soins tout nouveaux; suivant la méthode scientifique du hollandais Snellius, il mesura une base entre Villejuif et Juvisy, sur laquelle il forma des triangles; il en déduisit la distance dans le sens du méridien, et observa la hauteur du pôle aux deux extrémités. Pendant près de soixante ans, on compta sur l'exactitude de la mesure de Picard; mais on reconnut, plus tard, qu'il s'était trompé de quelques secondes dans l'amplitude de l'arc mesuré, et que la longueur de la toise qu'il avait employée était plus courte d'un millième environ que celle qui servit de modèle à l'Académie des sciences. Par un hasard heureux, cependant, ces deux erreurs étaient de sens contraires, et se compensaient en grande partie; les travaux plus récents ont montré que l'erreur commise par Picard sur la longueur de l'arc d'un degré ne dépassait pas quinze toises.

Bientôt après, en 1683, Cassini II entreprit, par ordre du roi, en collaboration avec Lahire, la mesure de la méridienne de Paris depuis Paris jusqu'à Collioure, en s'appuyant, d'une part, sur la base mesurée par Picard à Juvisy, et, d'autre part, sur une nouvelle base mesurée

à Collioure. Cette opération, souvent interrompue, ne put être terminée qu'en 1718; la même année, elle fut étendue vers le Nord jusqu'à la ville de Dunkerque, près de laquelle on mesura une troisième base (1). En réalité, tout le travail de Cassini reposait sur la base de Picard; les bases de Dunkerque et de Collioure n'étaient que des bases de vérification. On trouva, pour la première, une différence d'une toise seulement entre le calcul et la mesure directe; mais, pour la seconde, cette différence atteignit trois toises; ce qui montre que les mesures faites par Cassini n'étaient pas suffisamment précises. Elles conduisirent, du reste, à un résultat tout à fait inattendu, contraire à celui qu'avaient obtenu par la théorie Huyghens et Newton, contraire aussi à celui qui résultait des observations du pendule faites à Cayenne par l'astronome Richer : les degrés du méridien semblaient s'allonger en marchant du Nord vers le Sud, ce qui indiquait que la terre était allongée dans le sens de la ligne des pôles.

Les mesures effectuées plus tard, au Pérou par Bouguer, La Condamine et Godin; en Laponie, par Maupertuis et Clairaut, ayant montré que, conformément aux indications de la théorie, la terre est réellement aplatie et non allongée dans le sens de son axe de rotation, l'Académie des sciences décida qu'il y avait lieu de reprendre la mesure de la méridienne de France afin d'en faire disparaître les erreurs considérables qu'elle devait contenir. Cassini de Thury fut chargé de ce grand travail, qui fut exécuté en grande partie par l'astronome Lacaille (1739) La *méridienne vérifiée* montra que les degrés vont réellement en croissant du Sud au Nord et servit de fondement à la carte de France, dite Carte de Cassini, composée de 180 feuilles, qui, gravée par souscription nationale et publiée au nom de l'Académie des sciences (1744-1793) à l'échelle de  $\frac{1}{86400}$ , est restée pendant longtemps la représentation la plus fidèle et la plus complète de notre pays.

Je n'insisterai pas davantage sur ces deux premières déterminations de la méridienne, qui n'ont plus qu'une importance historique, et j'arrive à la troisième mesure de l'arc français, exécutée par les astronomes Delambre et Méchain.

Pour faire cesser l'étonnante et scandaleuse diversité de nos poids et mesures, l'Assemblée constituante décréta, le 8 mai 1790, sur la proposition de M. de Talleyrand, la fixation d'une mesure fondamentale.

(1) Les savants attachaient un intérêt immense au prolongement de la méridienne vers le Sud : on ignorait encore, à cette époque, d'après ce que nous dit Cassini lui-même, si le méridien de Paris prolongé passait par les embouchures du Rhône ou par Valence, en Espagne.

de longueur, à la fois *nationale* et *universelle*, d'où devaient dériver, d'une manière simple, les unités de surface, de volume, de poids, de monnaie. — Une Commission, composée de Borda, Laplace, Lagrange, Monge et Condorcet, étudia la question et conclut à l'adoption d'une unité de longueur prise sur la terre même et égale à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre; elle proposa, pour déterminer cette unité, de mesurer un arc de méridien depuis Dunkerque jusqu'à Barcelone, par une amplitude de 9 degrés et demi environ. Le 26 mars 1791, les propositions de la Commission furent approuvées par l'Assemblée, sanctionnées par une loi, et, bientôt après, le Roi chargea l'Académie des sciences de nommer des commissaires qui devaient, *sans délai*, s'occuper des opérations multiples à exécuter et notamment de la mesure de l'arc du méridien entre Dunkerque et Barcelone. On donna aussitôt des ordres pour la construction des instruments nécessaires aux observations géodésiques et astronomiques; les grands secteurs et les quarts de cercle dont on s'était servi jusqu'alors furent abandonnés; l'artiste Lenoir fut chargé de construire, sur des plans dus au génie inventif de Borda, quatre cercles répéteurs, ainsi que les règles de platine qui devaient être employées à la mesure des bases.

Méchain se mit en route le 25 juin 1792; il était chargé de la partie méridionale de l'arc à mesurer, entre Rodez et Barcelone. Delambre se réserva la partie comprise entre Rodez et Dunkerque. Les observations d'angles furent terminées vers la fin de l'année 1797; dans le courant de l'année suivante, Delambre mesura les deux bases de Melun et de Perpignan, sur lesquelles s'appuyait la chaîne méridienne; en outre, des observations astronomiques avaient été ou furent faites en divers points, à Paris, à Dunkerque, à Bourges, à Évaux, à Carcassonne, à Montjoux. — Dans cette grande entreprise, menée à bonne fin dans l'espace de quelques années par les deux vaillants astronomes et qui excita à la fois l'étonnement des savants eux-mêmes et l'admiration universelle, les observations furent faites et les calculs exécutés au moyen de méthodes nouvelles d'une grande précision et d'une surprenante simplicité : par un ingénieux théorème de Legendre, le calcul des triangles géodésiques fut ramené au calcul des triangles plans; Delambre imagina des formules nouvelles pour la réduction des observations, pour le calcul des coordonnées astronomiques de tous les sommets de la chaîne et des azimuts des côtés, pour le calcul des différences de niveau, ainsi que pour celui des portions successives de l'arc du méridien comprises entre les triangles, d'où fut conclue la longueur totale de l'arc entre les deux stations extrêmes.

La combinaison de l'arc français avec l'arc mesuré au Pérou par Bouguer et La Condamine donna pour l'aplatissement du sphéroïde terrestre la valeur de  $1/334$ , et pour la longueur du quart du méridien le chiffre de 5130740 toises, d'où on déduisit, pour le mètre rapporté à la toise du Pérou, la valeur de 0'5130740 ou 443 lignes 296 millièmes.

Le 4 prairial an VII, l'Institut présentait au Corps législatif les étalons prototypes du mètre et du kilogramme, qui furent aussitôt déposés aux Archives, en exécution de l'article 2 de la loi du 18 germinal an III.

Vous le voyez, Messieurs, c'est de la méridienne de France qu'est né le mètre, et avec lui tous ses dérivés, dont l'ensemble constitue le système métrique français, déjà en usage chez un grand nombre de nations, et qui sera successivement adopté par tous les peuples civilisés du monde.

Mais ce n'est pas là le seul service que nous ait rendu la méridienne de Delambre et Méchain. En 1818, lorsqu'on songea à refaire la carte de Cassini, qui ne semblait plus satisfaire à tous les besoins des services publics, la Commission royale, présidée par Laplace et chargée d'examiner le projet nouveau, ainsi que d'en poser les bases et d'en fixer le mode d'exécution, décida que la méridienne serait considérée comme la coordonnée principale qui devait fournir les bases primordiales de l'opération. C'est en effet sur la méridienne que vinrent se greffer successivement les parallèles de Paris, de Bourges, de Clermont, de Rodez, d'Amiens et des Pyrénées, les méridiennes de Bayeux, de Sedan et de Strasbourg, qui divisent la France en grands quadrilatères et qui ont donné les éléments de départ et de vérification du réseau principal, formé de grands triangles dans l'intérieur desquels la triangulation secondaire a déterminé tous les points topographiques remarquables du sol de la France.

C'est donc la méridienne qui a servi de base à toutes les opérations si délicates et si complexes d'où est née la carte de France de l'état-major, tant attaquée aujourd'hui, et trop souvent par des personnes incompétentes, dont nous n'avons pas la prétention de nier les imperfections et les lacunes, mais qui constitue, quoi qu'on en dise, l'œuvre topographique la plus remarquable qui ait été encore exécutée.

Il est impossible de lire le compte-rendu des travaux de la méridienne sans être frappé de la haute capacité des astronomes éminents qui les ont accomplis, sans être surpris par les précautions minutieuses qu'ils ont prises pour éviter ou atténuer toutes les causes d'erreur et obtenir de bons résultats.

En lisant le discours préliminaire de la Base du système métrique, on peut apprécier les difficultés de toute nature qu'ils eurent à surmonter, les dangers auxquels ils furent exposés, et on est étonné qu'avec les faibles ressources dont ils disposaient, ils aient pu accomplir si dignement la mission qui leur était confiée. Pendant longtemps, à l'étranger aussi bien qu'en France, l'œuvre de Delambre et Méchain a été considérée comme un exemple à donner et un modèle à suivre pour tous les travaux de la même nature.

Mais, Messieurs, depuis le commencement de ce siècle, la géodésie a réalisé de grands progrès; des travaux considérables ont été exécutés dans toutes les parties du monde avec une précision extrême, et notre méridienne ne satisfait plus que d'une manière fort imparfaite aux exigences de la science moderne.

Les cercles répéteurs dont se servaient Delambre et Méchain ne donnaient, à la lecture, que la minute centésimale ou cent secondes, tandis que ceux de Gambey, qui ont été employés pour les chaînes primordiales de la carte de France, donnaient vingt secondes, et, par l'estime, dix secondes que quelques-uns même donnaient directement; les cercles azimutaux employés de nos jours donnent à la lecture simple deux secondes centésimales ou deux tiers environ de seconde sexagésimale. On comprend donc que la précision des mesures faites par Delambre et Méchain soit bien inférieure à celle qu'on peut atteindre sans peine aujourd'hui. En outre, les circonstances mêmes dans lesquelles ils ont opéré, ont empêché de satisfaire à certaines conditions indispensables: les triangles ne sont pas tous bien conformés, la forme de certains édifices pris pour signaux n'était pas assez régulière; quelques angles n'ont pas été suffisamment répétés; deux d'entre eux, non mesurés, ont dû être conclus; enfin Delambre a fait souvent, parmi ses séries, un choix arbitraire que rien ne justifie.

Les chaînes primordiales de la carte de France ont été mesurées dans des circonstances plus favorables que la méridienne, avec des cercles répéteurs perfectionnés par Gambey; la forme des triangles qu'on a déterminés est plus satisfaisante; tous les angles ont été obtenus par un nombre fixe de séries, et il n'y a pas d'angles conclus. On ne peut pas dire cependant que ces chaînes aient été mesurées avec toute la rigueur qu'on pourrait y apporter aujourd'hui. Et malgré cela, elle ont fait découvrir dans la méridienne de France des erreurs *intolérables*. Par exemple, le Dépôt de la guerre a fait mesurer une chaîne latérale à la méridienne, dite chaîne de Fontainebleau, qui est formée de douze triangles bien conditionnés et qui, partant du côté Bois-Commun — Chapelle-la-Reine et longeant la méridienne

à l'Est, la rejoint sur le côté Bourges — Dun-le-Roi; et le calcul de cette petite chaîne a donné pour le dernier côté un résultat plus fort que celui de Delambre de 3<sup>m</sup>98.

Ne pouvant ici aborder la discussion détaillée des erreurs dont il est permis d'affirmer l'existence dans notre méridienne, je me contenterai de dire que les plus considérables semblent localisées entre Paris et Rodez.

Ainsi, Messieurs, notre méridienne est imparfaite, et les erreurs qu'elle contient, mises en évidence par les chaînes primordiales de notre réseau géodésique, affectent ces chaînes elles-mêmes, de sorte que la triangulation française a besoin d'être reprise ou tout au moins d'être révisée dans les parties reconnues défectueuses.

A plusieurs reprises, le Bureau des longitudes et même l'Observatoire avaient émis le vœu que la méridienne fût entièrement révisée. Et chaque fois le Dépôt de la guerre avait invariablement répondu que les erreurs de la méridienne avaient été souvent signalées et mises en évidence par les ingénieurs géographes, qu'il serait utile de reprendre ce grand travail au milieu du calme des esprits et avec des instruments perfectionnés, mais qu'il n'était pas possible d'en prescrire l'exécution immédiate pour des raisons tirées des ressources restreintes du budget, du manque de personnel actif et rompu à toutes les opérations de haute géodésie.

Une circonstance inattendue est venue lever tous les obstacles; permettez-moi de vous la rappeler en quelques mots :

MM. Biot et Arago, en prolongeant la méridienne de Barcelone à Formentera, avaient formulé l'espérance qu'elle pourrait être poussée plus loin encore, jusqu'au cap de Gata d'abord et plus tard peut-être jusqu'en Algérie, au moyen de quelques triangles jetés par-dessus la Méditerranée; après quoi, disaient-ils, si la civilisation européenne parvenait à s'implanter dans les États barbaresques, elle pourrait remonter la côte jusqu'à Alger, qui est situé très près du méridien de Paris, et être ensuite continuée vers le sud jusqu'au sommet ou même au delà de l'Atlas algérien. Ce qui n'était qu'un rêve grandiose de la part de MM. Biot et Arago est devenu une possibilité incontestable. Déjà, dans le deuxième supplément au tome IX du *Mémorial du Dépôt de la guerre*, le colonel Levret a montré, par des calculs suffisamment exacts, en partant des altitudes approchées des sommets de l'Espagne et de ceux de l'Algérie placés en regard de la côte espagnole, que la jonction des réseaux algérien et espagnol était possible, malgré l'énorme distance qui les sépare, et il a même indiqué des sommets de triangles méditerranéens au moyen desquels on pourrait passer d'Espagne en Algérie.

Plus heureux que le colonel Levret, j'ai pu constater, *de visu*, que, des côtes d'Algérie, on apercevait très distinctement l'Espagne. Dans le courant du printemps de 1868, pendant que j'étais occupé à reconnaître les points qui devaient servir de sommets aux triangles de la partie occidentale de la grande chaîne algérienne, entre Oran et le Maroc, au Bem-Saabia, près d'Oran; au Séba-Chioukh, près de l'embouchure de la Tafna; au Filhaoussen, situé non loin de la Nedroma; au Zendal, sur la frontière du Maroc; et, enfin, au Nador de Tlemcen; les Arabes et les colons m'avaient souvent affirmé, *même sous la foi du serment*, qu'on apercevait parfois très nettement la côte espagnole; mais j'avais vainement scruté vers le Nord-Ouest-Nord l'horizon de la mer, toujours limité de ce côté par des brumes opaques. J'espérais cependant que la saison d'automne serait plus propice, et mes prévisions ne tardèrent pas à être justifiées. Le 18 octobre, à la reprise des opérations, au Seba-Chioukh, vers cinq heures du soir, au moment où, les observations d'angles et de hauteurs étant terminées, je venais de remettre mon instrument dans sa boîte pour rentrer à Tlemcen, le vent changea subitement de direction pour passer de l'Ouest-Sud-Ouest au Nord, et j'aperçus très distinctement à l'œil nu une crête qui se profilait dans le lointain, au-dessus de l'horizon de la mer, sous la forme d'une ligne dentelée présentant deux renflements gigantesques. Le doute n'était plus possible; c'était bien la côte espagnole qui apparaissait à mes yeux comme par une évocation magique. Quoique séduit par l'imprévu et par la grandeur incomparable du spectacle qui se déroulait devant moi, et malgré la fatigue extrême dont j'étais atteint après une journée d'observations pénibles, je me hâtai de replacer mon cercle en station et de prendre, par rapport au sommet du Tessala encore bien visible, l'azimut des deux points principaux de la crête dont j'avais dessiné le profil.

Quelques jours après, au Filhaoussen, plus tard au Nador de Tlemcen, au Zendal et au Bem-Saabia, grâce à un concours heureux de circonstances atmosphériques très favorables, je pus contempler encore, toujours vers le moment du coucher du soleil, la même arête dentelée facilement reconnaissable, et mesurer de nouveau les azimuts des deux sommets déjà visés. A ma rentrée en France, au mois de décembre, je rapportai sur un croquis fait à une grande échelle les points principaux de la triangulation algérienne, ainsi que les directions observées vers l'Espagne, et l'identité des deux sommets successivement visés fut ainsi absolument démontrée: toutes ces directions concouraient, en effet, à très peu près, vers deux centres uniques, dont la position coïncidait très sensiblement

C'est donc pour la quatrième fois que la France est amenée à déterminer sa méridienne; aussi est-il essentiel que la nouvelle opération soit exécutée avec tout le soin et toute la précision que comporte la science moderne. Chargé par M. le Ministre de la guerre de diriger l'ensemble et de surveiller tous les détails de cette vaste entreprise, j'ai à cœur de vous rassurer en vous prouvant que, grâce à la perfection de nos instruments et à la rigueur de nos méthodes d'observation et de calcul, nous pouvons obtenir un degré d'exactitude qui n'a pas encore été atteint et capable de satisfaire les plus exigeants.

J'ai fait placer sous vos yeux l'instrument qui nous sert pour la mesure des angles horizontaux ou, plus exactement, pour la mesure des azimuts relatifs des directions observées et que nous appelons *cercle azimutal*. C'est un instrument *réitérateur* construit par MM. Brüner frères. A première vue, il inspire une grande confiance, parce qu'il est débarrassé de la complication d'axes et de vis, de mouvements généraux ou particuliers que présentaient les cercles répéteurs de Gambey; il ne donne, du reste, que des azimuts et n'est pas pourvu d'un cercle vertical pour la mesure des distances zénithales, ce qui a permis encore d'en simplifier la construction et la manœuvre (1).

Il ne contient qu'un seul axe, qui fait corps avec le pied de l'instrument et forme avec ce pied et un limbe annulaire en cuivre un ensemble solide et d'une grande stabilité. Autour de cet axe sont ajustés : d'abord le cercle gradué qui peut tourner à frottement lorsqu'on exerce sur lui une pression normale à deux rayons opposés et qui peut être maintenu invariablement dans une position quelconque au moyen d'une rondelle supérieure en cuivre ajustée sur l'axe et reliée au pied par trois vis qu'on peut serrer fortement, et ensuite, indépendamment du limbe, l'alidade qui porte l'index, les microscopes et la lunette. Vous remarquerez les particularités suivantes : le limbe gradué a 42 centimètres de diamètre et porte une graduation centigrade de 0 à 400; chaque grade est divisé en 10 parties égales valant 10 minutes; le pourtour du limbe contient donc 4,000 traits équidistants d'un tiers de millimètre. L'objectif achromatique a 53 millimètres d'ouverture efficace; la distance focale de la lunette est de 62 centimètres, sa puissance optique est considérable : avec l'oculaire qui lui est adapté, le grossissement est d'environ 40.

(1) Nous sommes parti de ce double principe : qu'un instrument destiné à donner à la fois les azimuts et les hauteurs ne doit être employé que pour des opérations d'ordre secondaire; et que pour une opération importante comme la révision de la méridienne, il est nécessaire de n'employer que des instruments uniquement appropriés à l'objet particulièrement essentiel de l'opération : la mesure des azimuts.

Le réticule est formé de quatre fils dont deux sont parallèles entre eux, très rapprochés et perpendiculaires à l'axe des tourillons, les deux autres étant perpendiculaires aux deux premiers. Ces fils réticulaires sont portés par un châssis qui peut se mouvoir dans l'intérieur d'une boîte micrométrique au moyen d'une vis centrale dont on compte les tours à l'aide d'un peigne situé à très peu près dans le plan même du châssis et les fractions de tour par un tambour extérieur divisé sur sa tranche en 100 parties égales. C'est donc un réticule mobile, un véritable réticule astronomique que nous avons adapté à l'oculaire de notre lunette, et c'est en cela que consiste le perfectionnement le plus important, et je puis le dire, absolument nouveau de notre instrument. J'ai à peine besoin d'ajouter que les images des objets visés sont pointées non plus à la croisée des deux fils, mais à égale distance des quatre fils, c'est-à-dire au centre du petit carré qu'ils forment entre eux. Le zéro des verniers est remplacé par une petite lunette qui sert d'index et qui permet de lire, sur le cercle divisé, les grades et les dixièmes de minutes; on apprécie les fractions complémentaires de la lecture au moyen de quatre microscopes à micromètre qui tiennent lieu de verniers; les fils réticulaires de chacun de ces microscopes sont au nombre de trois, dont l'un est perpendiculaire aux traits de la graduation: les deux autres sont parallèles entre eux et aux traits du limbe, et leur écartement a été réglé de telle sorte que l'image des traits, quand on les pointe, vient se former au milieu de leur intervalle et est légèrement débordée de part et d'autre par les fils. Grâce à ces deux fils, on évite l'inconvénient de pointer un fil noir sur un trait noir et l'exactitude de la lecture est considérablement augmentée. De même la présence des quatre fils au réticule de l'oculaire permet de pointer nettement, et sans craindre qu'elles disparaissent sous les fils, les images des objets toujours comprises à l'intérieur du petit carré, dont les côtés sont convenablement espacés d'après la longueur moyenne des côtés géodésiques, la distance focale de la lunette et la dimension linéaire des signaux employés; dans notre cercle, la distance angulaire des fils verticaux est égale à 17 divisions du tambour ou 90 secondes environ; chaque division du tambour oculaire vaut 5 secondes un tiers, plus exactement  $0^{\text{e}} 0005' 27$ .

Lorsque les microscopes sont réglés, la vis micrométrique de chacun d'eux, dont le tambour est divisé en 100 parties égales, tourne de deux tours et demi pour porter les deux fils d'un trait sur le trait voisin; chaque petite division du tambour correspond ainsi à la deux cent cinquantième partie de l'intervalle angulaire de deux traits consécutifs, et vaut, par conséquent, 4 secondes centésimales,

( soit 1', 3 sexagésimales). Il résulte de là, qu'en ajoutant ensemble les lectures des quatre microscopes exprimées en tours et fractions décimales de tour, on obtiendra, sans autre calcul, la lecture angulaire exprimée en grades, minutes et secondes correspondant à la direction observée.

Permettez-moi de vous signaler le mode d'éclairage des divisions du limbe; il est très ingénieux ; le tube de chaque microscope porte, vers le bas, un tube auxiliaire dans l'intérieur duquel peut se mouvoir, autour d'un arc horizontal, un miroir parabolique argenté percé en son sommet d'une ouverture suffisante pour laisser passer les rayons réfléchis par le limbe; ce miroir, convenablement placé, renvoie sur le cercle divisé les rayons sortis normalement d'un prisme à angle droit dont l'hypoténuse située du côté opposé au microscope est inclinée à 50 grades sur chacune des faces et sur l'horizon. C'est donc la lumière zénithale qui éclaire les traits de la graduation; et vous voyez que la direction des rayons éclairants étant constante par rapport à la division, il n'y a pas à craindre, dans le pointé des traits, de phase résultant d'incidences lumineuses variables.

Les pinces avec vis de rappel ont une forme particulière : l'alidade porte un bras horizontal qui se prolonge suivant un châssis à fenêtre rectangulaire pouvant glisser sur la mâchoire supérieure de la pince; une vis micrométrique, dont le châssis est l'écrou, vient buter par sa pointe contre la face verticale de la pince, sur laquelle vient buter aussi, du côté opposé, un ressort à boudin fixé au châssis. La vis de la pince étant serrée, le pied et l'alidade sont solidaires l'un de l'autre; en tournant la vis de rappel, on entraînera le châssis et par suite l'alidade; le ressort sera comprimé ou allongé suivant le sens du mouvement; mais, à chaque instant de son action, il maintiendra la pointe de la vis contre la pince. On n'a pas à craindre ainsi, comme avec les vis de rappel de Gambey, qu'il se produise après les pointés des ressauts brusques provenant des *temps morts* du pas de la vis ou des jeux accidentels des calottes sphériques et des boulets, et on n'est plus tenu, comme autrefois, sous peine d'erreur, d'effectuer les pointés en tournant toujours la vis dans le même sens.

La description de notre instrument sera complète si j'ajoute que, lorsqu'il est en station, il repose, par les pointes des trois vis calantes sur le fond de rainures longitudinales en forme de V pratiquées dans des galets en acier fondu, dirigées vers le centre du cercle et dans lesquelles on verse du suif pour empêcher l'oxydation des pointes; les galets en acier sont employés de préférence à ceux en cuivre, qui sont moins durs et finissent toujours par être mordus par les pointes des vis, surtout si l'instrument est lourd et s'il n'est pas mis en place

avec les plus grandes précautions pour éviter tout choc un peu brusque des pointes sur les galets.

Voyons maintenant comment on peut éliminer ou atténuer, de manière à les rendre presque nulles, les erreurs d'observation.

Indépendamment des erreurs grossières qu'un observateur consciencieux sait et peut toujours éviter, toute direction visée comporte trois causes d'erreur distinctes : la lecture, le pointé et la division. Les erreurs de lecture et de pointé sont des erreurs accidentelles, tantôt positives, tantôt négatives, par suite susceptibles de compensations et dont la probabilité décroît rapidement à mesure qu'elles se rapprochent d'une certaine valeur qu'elles ne sauraient dépasser. L'erreur de division est plus complexe : elle comprend d'abord une erreur accidentelle qui n'est assujétie à aucune loi déterminée, qui varie de signe et est toujours d'autant plus petite que l'artiste est plus habile ; et ensuite une erreur systématique ou régulière, dépendant d'un vice quelconque dont l'influence se fait sentir dans toute la graduation. Comme exemples d'erreurs systématiques, on peut citer celles qui proviennent de l'excentricité ou de l'inclinaison du limbe à graduer par rapport au centre ou au plan du cercle de la machine à diviser, et dont l'expression analytique est facile à trouver.

Étudions d'abord l'erreur commise dans un pointé fait sur un signal ordinaire en pierres ou en charpente *et ne présentant pas de phases*.

Tous les observateurs savent que cette erreur est la plus redoutable ; elle dépend, avec les instruments ordinaires, de la bissection imparfaite du signal qu'on vise, et, avec le nôtre, d'une appréciation inexacte du centre du carré des fils ; elle dépend aussi du défaut de régularité des signaux visés, de la non-coïncidence de l'axe d'un signal avec la verticale du centre de station, d'une lumière insuffisante et d'autres causes encore parmi lesquelles l'atmosphère joue le rôle le plus important et que, pour le moment, nous supposons entièrement annulées. Avec un réticule fixe, on ne peut faire qu'un pointé pour chaque lecture sur le limbe ; avec notre réticule, au contraire, on peut pointer plusieurs fois l'image du signal et réduire ainsi l'erreur commise sur un pointé unique. On démontre, en effet, par le calcul des chances, que l'erreur probable commise sur la moyenne des 16 pointés, par exemple, est égale à celle d'un pointé unique diminuée dans le rapport de 1 à la racine carrée de 16 ; pour 16 pointés, l'erreur probable de la moyenne n'est donc que le quart de l'erreur commise sur un pointé unique.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que si la moyenne des pointés

successifs ne coïncide pas exactement avec la position de la vis pour laquelle l'axe optique, déterminé par la ligne qui joint le centre optique de l'objectif au milieu du carré des fils, est perpendiculaire à l'axe de rotation, c'est-à-dire pour laquelle la collimation est nulle, il y aura une correction à faire subir aux lectures sur le limbe pour les ramener à l'axe optique de collimation nulle.

En appelant  $V$  la moyenne des lectures de la vis pour les divers pointés,  $V_0$  la lecture de la vis, lorsque la collimation est nulle,  $K$  la valeur angulaire des petites divisions du tambour oculaire, et  $H$  la hauteur de l'objet visé, considérée comme positive si cet objet est au-dessus de l'horizon, et comme négative s'il est au-dessous, la correction à faire subir aux lectures du limbe sera calculée, pour notre cercle, au moyen de la formule

$$\begin{array}{l} + \left\{ \frac{R (V - V_0)}{\text{Cos } H} \right\} \text{ tambour à droite} \\ - \left\{ \frac{R (V - V_0)}{\text{Cos } H} \right\} \text{ tambour à gauche.} \end{array}$$

Le point de la vis que nous appelons  $V_0$  se détermine simplement de la manière suivante : On pointe plusieurs fois un objet dans la position de la lunette, tambour à droite, l'alidade étant assujétie d'une manière invariable, et on prend la moyenne des lectures de la vis. On retourne ensuite la lunette dans ses collets, de manière à amener le tambour à gauche, et on pointe le même nombre de fois le même objet en prenant de nouveau la moyenne des lectures de la vis effectuées à chaque pointé. La moyenne des deux moyennes ainsi obtenues donne le  $V_0$ , c'est-à-dire le point auquel doivent être rapportées toutes les lectures azimutales.

J'estime que, pour un signal ordinaire situé à trente kilomètres de distance de l'observateur, supposé nettement visible et sans phases, l'erreur probable commise sur un pointé unique est certainement inférieure à la distance angulaire qui correspond à une petite division du tambour oculaire, distance qui est égale à  $5'3$ . Pour 16 pointés, l'erreur commise sur la moyenne sera donc ramenée à  $1'3$ , nous verrons plus loin qu'elle peut être réduite encore davantage.

Quant à l'erreur de lecture, elle résulte de l'inexactitude des pointés faits sur les traits du limbe avec les fils mobiles des microscopes. Or, le pointé d'un trait s'effectue sans peine, même pour un observateur peu expérimenté, à moins d'une demi-partie du tambour; une lecture faite sur le limbe avec un seul microscope ne comporte donc pas une erreur supérieure à deux secondes centésimales ou deux tiers de seconde sexagésimale; la substitution des microscopes aux verniers augmente ainsi d'une manière considérable la précision des lectures. Si, en outre, au lieu de faire une

seule lecture, on lit les quatre microscopes et qu'on prenne la moyenne des quatre résultats obtenus, cette moyenne, affranchie d'ailleurs de l'erreur d'excentricité de l'alidade par rapport au limbe, ne comportera plus qu'une erreur égale à l'erreur d'une lecture simple divisée par la racine carrée de 4 ou par 2. Nous pouvons ainsi dire, sans exagération, que l'erreur probable de la moyenne des quatre lectures aux microscopes ne dépasse pas une seconde centésimale ou un quart de division des tambours, et nous atteignons ainsi la limite de précision qu'on puisse désirer. — Il vous intéressera peut-être de savoir quelle est la longueur de l'arc du limbe qui correspond à une seconde; on trouve, par un calcul simple, qu'elle est égale à *trois dix-millièmes de millimètre*. Et si nous transportons ce petit arc à une distance de 30 kilomètres, il correspond, à cette distance de l'instrument, à 9 millimètres seulement. En d'autres termes, l'erreur de lecture que nous commettons est si atténuée qu'elle fait subir à un objet pointé à 30 kilomètres, sur une circonférence de cercle dont l'instrument est le centre, un déplacement de 9 millimètres seulement.

Mais nous avons supposé les microscopes absolument réglés de manière que deux tours et demi des vis correspondent à l'intervalle de deux traits ou à dix minutes d'arc sur le limbe. Or, en supposant que cette condition fût remplie à une certaine température, elle cesserait de l'être pour une température différente : le limbe se contracte ou se dilate, les bras de support des microscopes subissent des variations analogues, l'objectif est soulevé ou abaissé; la vis elle-même est modifiée, de sorte que l'image d'une division ne correspond plus au même nombre de tours de la vis. La différence est toujours très petite, car l'artiste a réglé l'instrument et gradué le cercle à une température moyenne, autour de laquelle les écarts ne seront jamais considérables; il est cependant important d'en tenir compte, en *tarant* pour chaque série la valeur angulaire de chaque vis et déterminant ainsi la correction de température à faire subir aux lectures du limbe. Nous avons calculé et nous calculons toutes les corrections de cette nature pour toutes nos séries d'observations, en supposant que, dans l'intervalle de *deux tares* des microscopes, la variation de la vis se produit proportionnellement au temps.

Quant aux erreurs de division, celles de la première classe, dites accidentelles, sont rares et toujours très petites, depuis que les cercles sont divisés par des artistes habiles au moyen de machines très perfectionnées; en étudiant avec le plus grand soin les diverses parties de la graduation de notre instrument, nous n'avons pu découvrir aucune erreur anormale sensible, ce qui semble démontrer

que les erreurs accidentelles du limbe sont noyées dans les erreurs de lecture avec lesquelles nous les supposons désormais confondues.

On démontre aisément que les erreurs systématiques de division peuvent être représentées par une série générale de la forme

$$A_1 \frac{\sin(u - \alpha_1)}{\sin 1'} + A_2 \frac{\sin 2(u - \alpha_2)}{\sin 1'} + A_3 \frac{\sin 3(u - \alpha_3)}{\sin 1'} + \dots$$

dans laquelle  $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$  sont des constantes numériques,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$  des constantes angulaires et  $u$  la division considérée; les premiers termes de cette série ont seuls une valeur sensible, et les termes éloignés dont l'indice dépasse un petit nombre d'unités sont négligeables, si la division a été bien faite. On démontre aussi que, dans la moyenne de 4 microscopes équidistants répartis sur tout le pourtour d'un limbe, les termes dont l'indice n'est pas divisible par 4 disparaissent, c'est-à-dire les termes de rang 1, 2, 3, ainsi que ceux de rang 5, 6 et 7. Les termes d'un indice élevé étant extrêmement petits, on peut admettre, sans erreur appréciable, que l'erreur de division d'un trait du limbe est, dans ce cas, représentée très exactement par un terme de la forme

$$A \frac{\sin 4(u - \alpha)}{\sin 1'}$$

Or, ce terme comporte une représentation géométrique. Supposons, en effet, que l'erreur de chaque trait soit figurée en grandeur par de petites ordonnées normales à la circonférence du limbe, et portées en dehors ou en dedans suivant le signe de cette erreur; comme la période du terme

$$A \frac{\sin 4(u - \alpha)}{\sin 1'}$$

est le quart de la circonférence, c'est-à-dire qu'il passe par toutes les phases du sinus quand  $u - \alpha$  varie de  $\frac{\pi}{2}$ , la courbe d'erreur de notre limbe sera une ligne ondulée analogue à une sinussoïde qui se reproduirait quatre fois autour de la circonférence.

Il est évident que si on se sert toujours de la même région du limbe et des mêmes traits, on retombera toujours sur la même erreur de division, et la moyenne des quatre lectures ne sera pas exempte de cette erreur; si, en effet, sur la figure ci-contre, vous tracez deux diamètres rectangulaires dans une position quelconque, chaque extrémité de diamètre correspondra à une même ordonnée en grandeur et en signe. Mais si on recommence l'opération plusieurs fois en prenant pour origines des directions observées des traits

équidistants répartis pour chaque microscope dans l'un des quadrants, les ordonnées, toujours égales entre elles à chaque opération pour les quatre microscopes, varieront d'une opération à l'autre en grandeur et en signe; et, comme la somme algébrique des sinus d'arc croissant en progression arithmétique de 0 à 400 grades est nulle, il en résulte que la somme algébrique des ordonnées est nulle aussi et que, par conséquent, l'erreur systématique de division disparaît de la moyenne des résultats fournis par une série d'observations correspondant à des origines équidistantes réparties sur tout le limbe.

C'est donc par la méthode d'observation qu'on élimine les erreurs systématiques de division. En même temps on réduit considérablement les erreurs de pointé et de lecture; on démontre, en effet, par le calcul des chances, que la précision d'une moyenne croît comme la racine carrée du nombre de mesures qui ont concouru à la former, en sorte que, si nous réitérons vingt fois, par exemple, nos observations pour chaque direction visée, les erreurs de pointé et de lecture qui étaient, pour une seule observation, égales à 1'3 et 1', seront réduites, dans la moyenne des vingt résultats, à

$$\frac{1'3}{\sqrt{20}} \text{ et } \frac{1'}{\sqrt{20}}$$

ou bien 0'3 et 0'2 environ, c'est-à-dire seront extrêmement petites.

Mais, Messieurs, s'il est vrai de dire, dans la pratique, que les erreurs systématiques de division sont entièrement éliminées, et que l'erreur de lecture est ramenée à une quantité d'un ordre de grandeur inappréciable à nos sens, on ne peut en dire autant de l'erreur de pointé que nous avons déterminée pour des circonstances exceptionnelles. Nous avons, en effet, admis que les signaux visés étaient toujours également bien définis, bien réguliers, bien éclairés et non exposés aux effets de phases. Or, ces conditions sont rarement satisfaites avec des signaux en bois ou en charpente; et c'est afin de les réaliser que nous avons renoncé à employer les signaux ordinaires pour adopter l'usage si commode et si avantageux des héliotropes, depuis si longtemps appliqué en Allemagne, en Angleterre, en Espagne, dans l'Inde et en Amérique, et dont nous nous étions déjà servi nous-même avec succès, sous la forme un peu différente d'héliostats, pour les opérations géodésiques relatives à la jonction de la France avec la Grande-Bretagne.

Le partie essentielle de tout héliotrope consiste dans une glace argentée à faces planes et bien parallèles qui réfléchit à de grandes distances, dans une direction fixe, la lumière du soleil; les miroirs que nous employons ont des glaces d'un décimètre carré de surface

seulement, qu'on réduit encore à volonté au moyen d'obturateurs, et peuvent tourner autour d'un axe horizontal porté par une fourchette, mobile elle-même autour d'un axe vertical qui fait corps avec un pied massif muni de trois pointes de support. En chaque point géodésique, un miroir est installé, au centre même de la station, sur un pilier maçonné qui doit supporter l'instrument au moment des observations, et deux soldats, dressés à cet effet, sont chargés de le diriger et de l'orienter, de manière à éclairer constamment le point où se trouve l'observateur. Une petite ouverture est pratiquée au centre du miroir; l'un des deux soldats, ramenant la glace verticalement et en face du point à illuminer, place son œil en arrière de l'ouverture et vérifie si la ligne qui va vers l'observateur passe par le centre d'une ouverture circulaire pratiquée dans une planche qui est portée par un poteau scellé en terre. Cette planche a été fixée par MM. Penel et Bassot, qui sont mes collaborateurs pour la révision de la méridienne, dans la direction convenable, à l'aide d'un petit théodolite dont la lunette, lorsqu'il est installé sur le pilier, est exactement située à la même hauteur que le centre du miroir. Les soldats ont à se préoccuper uniquement de maintenir l'image lumineuse au centre même du trou de la planche directrice et à vérifier de temps en temps, surtout après les grands vents, que la planche n'a pas été dérangée. Ainsi, à chaque station géodésique, au lieu d'élever un signal en pierres ou en charpente servant à la fois de point de mire et d'abri pour les observations, nous établissons un pilier maçonné sur la borne-repère; sur ce pilier, un miroir réflecteur; tout autour, des poteaux et des planches dirigeant le cône réfléchi vers les stations voisines, et nous confions la manœuvre du miroir à deux soldats d'infanterie. Ils touchent un franc par jour de haute-paie, doivent être ou rester à leur poste, tant que le soleil est au-dessus de l'horizon, et sont tenus de corriger la position de leur miroir toutes les trois minutes. Grâce à ces simples prescriptions, nos héliotropes marchent avec une régularité parfaite et brillent d'une manière aussi constante que les héliostats de Silbermann, sur lesquels ils ont l'avantage d'être plus simples et de pouvoir se placer plus facilement au centre de la station.

Les signaux héliotropiques sont visibles à des distances énormes. Dans des circonstances atmosphériques favorables, des miroirs pareils à ceux que vous avez sous les yeux ont été visibles à l'œil nu par-dessus le détroit du Pas-de-Calais, de Boulogne à Hastings, à une distance de 76 kilomètres environ. En employant des miroirs de 12 centimètres de côté, et des lunettes dont le pouvoir grossissant était de 25 environ, les officiers espagnols ont récemment relié les îles

Baléares au continent, à une distance évaluée à 220 kilomètres, et nous avons la certitude que des miroirs de 2 décimètres seulement de côté seront visibles à 300 kilomètres de distance. des hauteurs du Nador de Tlemcen au point culminant de la Sierra-Nevada, pour la jonction de l'Afrique avec l'Europe.

A trente kilomètres de distance et même jusqu'à 40, les miroirs sont la plupart du temps visibles à l'œil nu, même par un soleil très faible, sous la forme d'étoiles blanches, quelquefois très éclatantes. Dans la lunette, les miroirs donnent une image lumineuse qui offre un pointé facile, d'une précision comparable à celle que fournissent les étoiles. Vous savez que le pointé des signaux ordinaires, quand ils sont éloignés, est, en général, assez difficile, parce que les images sont pâles et que la teinte noire des fils les affaiblit encore par le contraste; avec les miroirs, on obtient des images brillantes, de véritables points lumineux que l'on vise et que l'on bissecte par un fil ou que l'on pointe dans un petit carré réticulaire, avec une exactitude remarquable.

Les observations que nous avons déjà faites nous permettent d'affirmer que l'erreur probable commise sur un pointé isolé, lorsque les miroirs apparaissent comme des points lumineux, ne dépasse pas 2 secondes; pour 16 pointés, l'erreur sera réduite à

$$\frac{2}{\sqrt{16}}$$

ou une demi-seconde centésimale; et la moyenne de 20 réitérations ne sera plus affectée que d'une erreur de pointé égale à

$$\frac{2}{\sqrt{16} \cdot \sqrt{20}}$$

ou à environ un dixième de seconde.

Pendant longtemps on a cru, en France, qu'il serait difficile d'employer des miroirs pour signaux, que cela entraînerait des complications, des pertes de temps et des dépenses considérables. Il n'en est rien; Messieurs. Notre service marche sans encombre et nous n'avons pas à nous préoccuper de la régularité de nos signaux; la dépense moyenne par chaque station est diminuée, grâce à la main-d'œuvre militaire; les avantages qu'on retire de l'emploi des miroirs sont incontestables et désormais incontestés.

Toutes les complications que pourrait faire naître l'intervention d'agents secondaires plus ou moins intelligents, plus ou moins dociles, s'ils appartenaient à l'élément civil du pays; disparaissent lorsqu'on a recours à des soldats de l'armée. Quoique situés à une très

grande distance de nous, ils peuvent recevoir nos ordres et nous en surveillons l'exécution immédiate, comme cela se passerait dans l'intérieur d'une caserne. Voici comment :

Les miroirs étant visibles à l'œil nu, pour correspondre facilement avec un groupe d'hommes en station, il suffira qu'on ait arrêté d'avance un système de signaux résultant d'apparitions et d'occultations successives et convenablement espacées de l'image lumineuse. Il est facile d'imaginer des alphabets très variés de *télégraphie optique*; celui que nous avons adopté se compose seulement de huit signaux particuliers. L'héliotrope étant dirigé sur un point, pour annoncer qu'on va télégraphier, on produit, avec la main placée devant le miroir, des occultations rapides et nombreuses qui font l'effet d'une vraie scintillation; le soldat qui est en station doit reproduire ce signal pour indiquer qu'il est prêt à recevoir la communication.

Cela étant, l'observateur recouvre le miroir pendant 30 secondes, le découvre pendant le même temps et le recouvre de nouveau pendant 30 secondes. La vue de la lumière pendant 30 secondes signifie le nombre 1 de notre alphabet. En produisant une nouvelle apparition de lumière, suivie d'une occultation, on aurait le nombre 2 et ainsi de suite. On est assuré qu'une dépêche est arrivée et a été comprise par le commencement d'exécution de l'ordre donné ou bien par des scintillations lumineuses analogues à celles que j'ai décrites tout à l'heure.

Voici notre alphabet :

1. Les circonstances sont favorables. Veillez.
2. Vous ne surveillez pas assez votre miroir.
3. Mettez obturateur n° 1 devant la glace.
4. Mettez obturateur n° 2.
5. Vérifiez la planche directrice.
6. Impossible d'observer. Repos.
7. Je ne suis pas content.
8. Bonnes notes pour votre travail d'hier.

Les miroirs nous permettent encore de donner l'heure à nos hommes.

Ainsi, tous les jours, il y a repos à partir de onze heures jusqu'à une heure de l'après-midi. Un coup de miroir donné successivement sur chaque point fait connaître l'heure du repos et celle de la reprise des opérations. Pour exécuter ces divers signaux, l'observateur, ou un de ses adjoints, n'a qu'à faire rapidement un tour d'horizon avec l'héliotrope de Gauss, que j'ai fait mettre aussi sous vos yeux.

Cet appareil se compose d'une lunette assez forte montée sur un

axe vertical autour duquel elle peut tourner, et qui est lui-même engagé dans une colonne portée par trois vis calantes servant à élever ou à abaisser l'axe optique de la lunette et à le diriger sur le point où l'on veut envoyer les rayons solaires. Au-devant de l'objectif est disposé un système de deux miroirs plans perpendiculaires entre eux et dont l'intersection commune est perpendiculaire à l'axe optique de la lunette. En faisant tourner ce système de miroirs autour de leur intersection, de manière à faire pénétrer dans la lunette l'image du soleil réfléchi à la surface d'un des miroirs, il est évident que l'autre surface enverra une seconde image dans le prolongement de l'axe optique et qu'elle sera, par conséquent, visible du point de l'horizon sur lequel la lunette a d'abord été dirigée.

Quand une station est terminée et que l'observateur se dispose à partir pour une station voisine, il prévient tous les groupes de soldats qui dirigent des héliostats en braquant successivement vers chacun d'eux, pendant cinq minutes, non plus un seul miroir, mais bien deux miroirs placés à 50 ou 60 mètres de distance l'un de l'autre. A ce double signal, les hommes comprennent qu'il n'est plus nécessaire d'éclairer le même point, et ils se reposent, en attendant des ordres écrits, pendant tout le temps que l'observateur est en route. Ce procédé très ingénieux a été appliqué pour la première fois par MM. les capitaines Penel et Bassot, et pourra devenir le point de départ de modifications à introduire dans notre système de télégraphie optique.

Je viens de vous démontrer, Messieurs, que les observations azimutales comportent une extrême précision; mais notre démonstration suppose qu'on a préalablement pris certaines précautions essentielles, trop souvent négligées ou considérées comme secondaires dans les travaux de la carte de France : l'observateur et l'instrument doivent être indépendants l'un de l'autre, et l'instrument doit reposer sur un support invariable. On comprend, en effet, que, si le support n'est pas fixé, s'il s'élève ou est bâti sur un terrain mouvant, le poids de l'observateur, dans les diverses positions qu'il prendra autour du centre de la station, suffira pour déplacer le cercle et par suite introduira dans les observations des erreurs considérables qui les feront rejeter comme absolument vicieuses. De même, dans les cas où l'on est obligé d'élever l'instrument à une grande hauteur pour dominer des obstacles qui empêchent de voir les points voisins, il ne suffit pas que les deux conditions précédentes soient satisfaites, il faut encore que le vent n'ait aucune prise sur le support et ne puisse le faire osciller. — J'ajouterai deux autres conditions à satisfaire : l'instrument doit être garanti contre les rayons directs du

soleil; et s'il n'est pas placé au centre même de la station, les éléments de réduction au centre doivent être mesurés avec la plus grande exactitude.

Pour éviter toutes les causes d'erreur que je viens de signaler, j'ai adopté les dispositions suivantes : A chaque station, au-dessus de la borne-repère, je fais élever un pilier maçonné de 1<sup>m</sup>20 de hauteur et de 0<sup>m</sup>60 de côté, sur la surface supérieure duquel je projette le centre de la station; autour de ce point, je décris deux circonférences de cercle de 0<sup>m</sup>085 et 0<sup>m</sup>265 de rayon sur lesquelles viennent se poser les pointes des héliotropes et celles des vis calantes du cercle. On n'a pas ainsi d'erreur de centre à craindre, puisque, pendant les observations, le centre du cercle azimutal est situé sur l'axe même du repère et que les miroirs visés satisfont à la même condition. Pendant la durée des mesures, on dresse successivement autour de chaque pilier une baraque — observatoire — en bois, de 2 mètres de hauteur et 2 mètres de côté, dont les quatre montants verticaux et les quatre traverses inférieures soutiennent un plancher, découpé au centre de manière à ne pas toucher le pilier en l'encastant et destiné à supporter l'observateur. Le toit et les parties latérales supérieures sont recouverts de grosse toile verte, à l'exception de la partie centrale du toit occupée, suivant un carré de 80 centimètres de côté, par une large glace horizontale en verre dépoli, qui projette sur le limbe la lumière blanche du zénith. Enfin, dans les circonstances exceptionnelles, lorsqu'il faudra élever l'instrument à des hauteurs considérables, à 20 ou 25 mètres par exemple, au lieu de charpentes comme support, nous ferons construire des tours maçonnées, autour desquelles seront disposées les charpentes destinées à supporter les observateurs. — Autant que possible, nous opérerons au centre même de la station; si, cependant, dans certains cas, nous étions obligés d'observer en dehors du centre, nous calculerions la réduction résultante, non point au moyen de la formule habituelle

$$\frac{r \cdot \sin (0 + y)}{D \sin l'} - \frac{r \cdot \sin y}{G \sin l'}$$

dans le calcul de laquelle le sens de l'angle  $y$  mal entendu peut causer des erreurs grossières, mais au moyen de la formule plus simple

$$\frac{r}{K \sin l'} \sin (l_1 - l_0)$$

dans laquelle  $r$  désigne l'excentricité,  $K$  la longueur du côté correspondant à la direction visée,  $l_1$  la lecture sur le limbe pour la même direction et  $l_0$  la lecture correspondant à la direction du centre de la station.

Ainsi, Messieurs, grâce aux instruments que nous employons, grâce aussi à notre méthode d'observation et aux précautions prises pour éviter les causes d'erreur grossières, nous pouvons espérer que la révision de notre méridienne sera effectuée avec une très grande précision. Il semble même, au premier abord, qu'elle pourrait être exempte de toute erreur appréciable. Malheureusement, l'observateur n'a pas seulement à lutter contre les erreurs de pointé, de lecture et de division, qu'il est facile de définir et d'atténuer presque indéfiniment; même en supposant ces erreurs tout à fait éliminées, les mesures azimutales restent encore soumises à d'autres influences dont il est impossible de les affranchir entièrement. L'observateur n'opère pas dans le vide; il est entouré d'une atmosphère variable, capricieuse, dont la présence suffit souvent à causer des perturbations bien supérieures aux erreurs que donnent les instruments. N'avez-vous pas vu quelquefois, dans la campagne, par une chaude journée d'été, les objets situés à l'horizon se déformer, se mouvoir dans tous les sens d'une manière irrégulière et quelquefois fantastique, des colonnes droites transformées en colonnes torses, des flèches aiguës d'église d'abord nettement visibles et disparaissant bientôt après, comme noyées dans des ondes opaques? N'avez-vous pas vu des phénomènes de mirage si variés et toujours si surprenants? C'est l'atmosphère seule qui est la cause et le siège de ces réfractions anormales d'où résultent les déplacements apparents des signaux et par suite des erreurs dans les directions observées. Les réfractions latérales sont surtout à craindre, en géodésie, lorsque le rayon qui tombe sur l'objectif de la lunette a traversé des couches irrégulièrement disposées et de densités croissant ou décroissant de part et d'autre d'une surface oblique de position variable avec la hauteur et l'intensité du soleil, lorsqu'il est trop plongeant ou lorsqu'il rase des mouvements de terrain suréchauffés. Dans ces trois cas, si fréquents pendant les fortes chaleurs de l'été, le géodésien doit se reposer et attendre patiemment des circonstances atmosphériques plus favorables au milieu desquelles les anomalies ne sont pas sensibles; quel que soit son désir d'observer et d'éviter toute perte de temps, il ne doit viser les miroirs que lorsqu'ils donnent des images fixes et suffisamment réduites pour fournir de très bons pointés.

C'est la présence seule de l'atmosphère qui fait que les mesures angulaires ne sont jamais comparables pour la précision avec les mesures de longueur. Je vous rappellerai, à ce sujet, que l'exactitude des mesures linéaires peut s'étendre presque indéfiniment.

Autrefois, les géographes s'estimaient heureux lorsque la reprise de la mesure d'une base ne donnait, sur une longueur de 5,000 ou

6,000 toises, qu'une différence de 5 à 6 pouces. Aujourd'hui, nos bases d'Algérie ont été mesurées avec une erreur probable qui ne dépasse pas 1 centimètre pour des longueurs de 10 à 11,000 mètres, et la base de Madrilejos, mesurée en Espagne avec la règle la plus perfectionnée qui existe, est probablement exacte à moins de 3 millimètres, et comme elle a 14664<sup>m</sup>50 de longueur, l'erreur relative probable est exprimée par la fraction  $\frac{1}{5860000}$ .

Bien des essais ont été tentés pour mettre les observations angulaires à l'abri des erreurs qu'entraîne la présence de l'atmosphère. Dans ces derniers temps même, on m'a reproché assez vivement de n'avoir pas remplacé les observations de jour par des observations de nuit faites au moyen de réverbères, ou, tout au moins, de n'avoir pas fait des comparaisons préalables entre les deux espèces d'observations; mais, Messieurs, ces reproches ne sont pas fondés, et je n'ai pas cru devoir en tenir compte. Les comparaisons demandées ont déjà été faites en divers points du globe, et la question nous paraît jugée sans réplique. Depuis longtemps déjà, les observations de nuit ont été abandonnées pour la mesure des distances zénithales, à cause des variations extrêmes de la réfraction d'une nuit à l'autre et dans l'intervalle d'une même nuit. Il est vrai que MM. Biot et Arago ont observé certains angles, de nuit, avec des réverbères comme points de mire; mais s'ils ont opéré ainsi, c'est uniquement parce que les distances comprises entre les points visés étaient très considérables, et que des signaux ordinaires n'auraient pas été visibles. S'ils avaient eu l'idée d'employer des héliotropes, ils auraient certainement renoncé à opérer pendant la nuit. On sait, du reste, que leurs observations sont loin d'être parfaites. Sur le parallèle de Paris, dans la partie orientale, le colonel Henry a pointé la nuit des réverbères, et les discordances entre les résultats donnés par les séries d'un même angle, ont atteint jusqu'à 42 secondes; dans la section occidentale, exécutée en partie par le colonel Bonne, les observations de nuit ont donné des résultats inférieurs à ceux des séries faites de jour. Le colonel Puissant, en parlant des fortes discordances que présentent les résultats des observations azimutales faites avec la polaire et un réverbère, les attribue au réverbère et admet qu'il se produit, la nuit, des réfractions latérales très dangereuses, lorsqu'on pointe des objets à l'horizon. Le colonel Peytier a constaté, dans les observations azimutales faites sur les parallèles d'Amiens et de Bourges, des discordances énormes qui ne se sont jamais présentées dans les observations de jour; elles ne sauraient, dit-il, être attribuées au pointé de la polaire, puisqu'on obtient pour la latitude des résultats très concor-

dants. C'est donc le pointé du réverbère qui présente de l'incertitude. Les ingénieurs anglais sont arrivés aux mêmes conclusions; dans l'Inde, le colonel Lambton a trouvé, dans ses observations de nuit, des discordances énormes bien supérieures à celles des observations de jour. Aussi, le colonel Everest, son successeur, a-t-il adopté de préférence les observations de jour faites avec des héliotropes pour points de mire. En Prusse, en Espagne, en Angleterre, partout enfin, les observations de nuit ont été rejetées; elles ne présentent, en effet, au point de vue de la précision, aucun avantage, comme nous venons de le montrer. Mais en présenteraient-elles, qu'elles devraient être repoussées, car elles offrent des inconvénients énormes. La première condition que doit rechercher un géodésien pour obtenir des résultats satisfaisants, c'est une bonne installation, grâce à laquelle il n'ait pas à se préoccuper outre mesure des nécessités matérielles de la vie, de sa sécurité personnelle, de la conservation de ses instruments et des difficultés qu'il rencontrera pour les transporter sur les sommets élevés; et il ne peut réaliser cette condition que *de jour*, car il n'opère pas comme l'astronome dans un observatoire bien fermé, commodément assis dans un fauteuil roulant ou à genoux sur des coussins moelleux, en des points voisins de grands centres de population, où on trouve toujours un abri, la nourriture et le coucher, où les orages et le vent ne sont à craindre, ni pour lui, ni pour ses instruments. Le géodésien choisit d'ordinaire ses lieux de station sur des points culminants, élevés, d'un accès difficile. Pour les atteindre, même de jour, il faut souvent dépenser beaucoup de force et faire appel à tout son courage. Ainsi, au Canigou, à Bugarach, à Espira, qui sont des points où nous sommes allés l'année dernière, l'ascension *de nuit* présenterait des difficultés et des dangers qui rebutteraient les plus intrépides observateurs. Et l'on ne doit pas songer à camper sur ces pics, car le terrain sur lequel on peut s'y mouvoir sans danger, suffit à peine à recevoir et à amarrer une baraque-observatoire, et, de part et d'autre, on est comme suspendu au-dessus de l'abîme. J'en appelle à tous ceux qui ont pratiqué les observations géodésiques et qui en connaissent, par expérience, les fatigues et les dangers.

Et nous ne sommes pas suspects, Messieurs, de reculer devant les difficultés et de rechercher la commodité et le confort au détriment de l'exactitude de nos observations; depuis dix ans, nous pratiquons la géodésie, non point dans une chambre, ni dans une baraque bien confortable où nous pourrions faire, à des amis curieux, les honneurs du ciel et de la terre, mais sur les sommets les plus inaccessibles en Angleterre, en Corse, en Algérie, en France; nous avons vu la mort de près, et deux de nos collaborateurs ont été emportés par des mala-

dies contractées dans notre service. Nous avons donc le droit d'espérer que notre opinion sera partagée par tous ceux qui savent se rendre compte des difficultés de la géodésie pratique, et qu'on ne sera pas surpris si les observations de nuit ont été absolument écartées de notre programme d'opérations.

Indépendamment des mesures azimutales, nous nous proposons encore de déterminer la différence des niveaux de la mer à Dunkerque et à Perpignan, par un nivellement géodésique spécial effectué au moyen de distances zénithales *récioproques* et *simultanées* observées à tous les sommets d'une ligne brisée voisine de la méridienne, et dont les côtés ne dépasseraient pas en longueur 12 kilomètres. Les points de cette ligne qui ne font pas partie de la méridienne seront rattachés à elle par une triangulation secondaire; les distances zénithales seront mesurées aux heures de la journée où la réfraction est minimum, entre 11 heures du matin et 3 heures du soir, à des instants fixés d'avance et signalés, par l'un des observateurs, à celui qui est placé à la station conjuguée, au moyen de coups de miroir convenablement espacés. C'est la première fois qu'on aura pu, en France, réaliser la simultanéité des observations dans la mesure des hauteurs sur une ligne d'une très grande étendue, et nous pourrons, j'espère, en tirer des conclusions très importantes.

Vous savez, en effet, que le géodésien, après avoir déterminé la forme approchée de la terre, calcule en chaque point l'altitude de la station au-dessus de cette surface hypothétique qui se rapproche le plus possible de la surface du niveau des mers, prolongée à travers les continents; le géomètre, de son côté, exécute un nivellement à petites portées qui donne, sur la verticale de chaque lieu, l'altitude de la station au-dessus de la vraie surface prolongée de la mer. La comparaison des résultats obtenus par ces deux sortes de nivellement fera connaître, en certains points communs, la différence de hauteur entre la surface vraie et la surface hypothétique, et cette différence pourra conduire à des résultats très intéressants sur les perturbations de la vraie forme de la terre ou sur les déviations locales.

Il nous a paru aussi utile de déterminer, dans des conditions favorables qu'on a rarement pu réaliser, le degré de précision des mesures de hauteur par le baromètre. Pour cela, à chacune des stations conjuguées, on observe *simultanément* six fois par jour, à des heures voisines du maximum et du minimum de pression, c'est-à-dire à 8<sup>h</sup>, 9<sup>h</sup>, 10<sup>h</sup>; 2<sup>h</sup>, 3<sup>h</sup> et 4<sup>h</sup>, la hauteur du baromètre, la température de l'air et l'état hygrométrique, par le psychromètre d'August. A l'aide de ces lectures répétées en chaque station pendant huit ou dix jours de suite, nous pourrons calculer, en partant de la mer à Port-Vendres,

l'altitude de la mer à Dunkerque, et conclure de l'ensemble de nos observations quelle est, dans les circonstances habituelles, l'erreur probable d'une mesure de hauteur par le baromètre. — Nous pensons que la précision des mesures barométriques a été considérablement exagérée par les voyageurs.

Enfin, sur le double désir exprimé au Bureau des longitudes et à l'Observatoire, nous avons été autorisés par M. le Ministre de la guerre à faire, en chaque lieu de station, des observations magnétiques pour déterminer la déclinaison, l'inclinaison et la composante horizontale de l'intensité magnétique du globe terrestre. La géographie magnétique de la France est peu connue, et les seules observations de quelque valeur que nous possédions ont été faites chez nous par des savants étrangers, par Lamont, en 1856 et 1857, et par les révérends Pères Perry et Sidgreaves de Stonyhurst, en 1868. Nous avons pensé que nous pouvions aider à combler une lacune importante, et nous avons accepté avec empressement l'offre qui nous était faite. Quelques personnes ont paru craindre que la diversité des observations multiples dont nous sommes chargé ne compromît la précision des mesures azimutales; je me hâte de les rassurer. La révision de la méridienne géodésique est et restera toujours la partie essentielle de notre travail; la *méridienne magnétique*, les mesures zénithales, barométriques et autres, ne sont pour nous que des objets d'ordre secondaire, qui nous permettent d'utiliser nos trop nombreux loisirs dans la montagne, mais qui seront toujours subordonnés à l'objet principal de nos opérations.

Vous le voyez, Messieurs, la mission qui nous est confiée peut fournir à la science de la terre des données neuves et très intéressantes; et je suis heureux de vous annoncer que les résultats déjà obtenus sont très satisfaisants. Nos opérations, commencées au printemps de 1870, ont été interrompues par la guerre, et n'ont pu être reprises qu'au mois d'août 1871. Mes deux collaborateurs, MM. Penel et Bassot, sont venus me retrouver au retour de leur captivité en Allemagne, où j'avais aussi été emmené comme prisonnier après la capitulation de Metz, et nous avons eu, du moins, après tant d'épreuves, la satisfaction de nous trouver réunis tous les trois pour recommencer l'œuvre qui nous est commune. Dans le courant de l'automne de 1871, nous avons pu faire quatre stations, dont les résultats ont été soumis à la haute approbation du Bureau des longitudes; pendant la campagne de 1872, nous avons effectué la liaison, sur la côte Forceral-Canigou, des triangulations de l'Espagne et de la France, et nous avons poussé nos observations jusqu'aux sommets voisins du parallèle de Rodez.

Le sujet que j'ai traité devant vous n'est certes pas de ceux qui comportent une exposition brillante; il est un peu aride. Je n'ai pas craint pourtant de l'aborder dans cette enceinte, assuré que j'étais à l'avance de votre attention bienveillante pour des travaux qui sont l'expression la plus élevée de la géographie mathématique du globe. Il me reste à vous prier de m'accorder encore quelques minutes que je désire mettre à profit pour vous exposer en peu de mots la situation de la géodésie française.

La géodésie est une science d'origine toute moderne, et, on peut le dire, de création toute française. C'est l'Académie de France qui a eu la gloire et l'honneur d'entreprendre et d'exécuter les premières expéditions destinées à faire connaître la forme de la terre, en France, en Laponie, au Pérou, au cap de Bonne-Espérance, en Espagne. Ce sont les savants français Laplace, Legendre, Delambre, Puissant, etc., qui ont imaginé les premières méthodes vraiment scientifiques d'observation et de calcul, c'est la France qui a donné le mouvement à l'Europe en accomplissant cette triangulation grandiose qui est restée longtemps sans rivale.

Mais nous sommes forcés, à notre grand regret, de l'avouer : depuis longtemps déjà, la science géodésique semble avoir émigré à l'étranger. Sous l'impulsion des savants allemands Gauss, Bessel et Baeyer, elle a revêtu une forme nouvelle, basée sur le calcul des probabilités; les instruments ont été perfectionnés, ainsi que les méthodes d'observation et de calcul; des travaux gigantesques et d'une précision nouvelle ont été exécutés dans toutes les parties du monde; des progrès considérables ont été accomplis, qu'on ne peut considérer sans tristesse, car c'est toujours hors de France qu'ils ont été réalisés. — A force de répéter et de croire que l'Europe nous jalousait, qu'elle nous enviait notre triangulation, nous avons fini par négliger de lui donner le degré de précision qu'elle comportait, et les nations voisines, profitant de l'expérience acquise par nos travaux, nous ont toutes dépassés. C'est à Berlin que la géodésie tient, de nos jours, ses assises solennelles, à Berlin où le général Baeyer, président de l'Association géodésique internationale, centralise et coordonne toutes les triangulations des États de l'Europe compris entre Christiania et Palerme.

C'est la suppression du corps des ingénieurs géographes et sa fusion avec le corps d'état-major qui ont porté un coup funeste à la géodésie française. Soit parce que, dans ces dernières années, la science n'était guère en honneur dans l'armée, et que les officiers préféraient aux rudes et minutieux travaux de la géodésie les

occupations plus brillantes et les loisirs mondains des états-majors, soit parce que l'enseignement à l'École d'état-major est élémentaire, incomplet, suranné et tombe sur un terrain peu disposé à le faire fructifier, soit enfin pour d'autres causes que je ne saurais définir ici, le recrutement des géodésiens dans l'armée est tari ou empêché d'une manière à peu près complète: quatre ou cinq officiers seulement veulent bien se consacrer aux études et aux travaux de la géodésie. Dans le public, même dans celui qui a la prétention de savoir lire les cartes topographiques, on ignore jusqu'au nom même de la science géodésique; on voit bien le monument qui est la carte de France, mais on n'en connaît pas les fondations. A l'Académie, au Bureau des longitudes, dans tout notre monde savant, on pourrait bien compter deux ou trois représentants de la science géodésique, envisagée sous son point de vue spéculatif, deux ou trois voyageurs qui ont accompli, au péril de leur vie, des triangulations importantes dans des pays étrangers et parmi lesquels nous plaçons, en première ligne, notre éminent collègue, M. d'Abbadie, mais on n'en pourrait citer aucun qui ait consacré sa vie à la pratique et à l'étude de la géodésie et qui ait dirigé ou exécuté les opérations de haute géodésie, sans lesquelles toutes les combinaisons théoriques des géomètres ne peuvent avoir ni base sûre, ni consécration suffisante.

La comparaison des rares travaux produits chez nous avec les nombreux travaux qu'on a produits en Allemagne, en Russie, en Espagne, aux Etats-Unis et dans l'Inde, ferait ressortir une infériorité humiliante du côté de la France, et nous renonçons à la tenter devant vous. Mais, il ne faut pas craindre de le dire, la France a perdu, en géodésie, la place d'honneur qu'elle avait si longtemps occupée. Saura-t-elle la reconquérir un jour? Je l'espère.

La guerre de 1870 porte avec elle ses terribles, mais aussi ses salutaires enseignements, qui ne sauraient être perdus pour nous; elle a montré, de manière à convaincre les plus incrédules, combien les études et les connaissances géographiques, si négligées dans notre pays, nous ont fait défaut dans ces douloureuses circonstances, combien leur absence a contribué à aggraver nos désastres. Déjà, dans l'armée, des esprits sérieux et réfléchis coalisent leurs efforts pour populariser et répandre, sous diverses formes, le goût et l'enseignement de la géographie; au Dépôt de la guerre, des officiers modestes et dévoués à leur œuvre, parmi lesquels je place en première ligne M. le commandant Bugnot, s'attachent à perfectionner les moyens de reproduire et de multiplier les richesses cartographiques de ce grand Etablissement. La géodésie seule est un peu délaissée encore; mais il n'est pas possible que, parmi tant d'officiers qui se

livrent avec persévérance à l'étude de la géographie, il n'y en ait pas quelques-uns qui soient bientôt tentés de se joindre à nous pour reconstituer, en France, le service géodésique. Nous n'avons point à leur offrir une carrière brillante, ni l'espoir d'un avancement rapide qui n'est pas accordé d'ordinaire aux géodésiens; mais nous pouvons leur montrer tous les grands travaux qui nous restent à accomplir et auxquels ils seraient appelés à prendre part; nous pouvons faire appel à leur patriotisme le plus désintéressé, en leur prouvant qu'en venant à nous ils contribueront au relèvement d'une science qui eut autrefois, en France, une longue période de grandeur et de gloire, d'une science d'origine française, qui a émigré à l'étranger, et qu'il faut ramener à son premier berceau, dans l'intérêt de notre patrie, pour l'honneur de la science et de l'armée.

---