

LES NOUVEAUX APPAREILS  
POUR LA  
**MESURE RAPIDE DES BASES GÉODÉSIQUES;**

Par MM. J.-René BENOIT,  
Directeur du Bureau international des Poids et Mesures,

ET

Ch.-Éd. GUILLAUME,  
Directeur-Adjoint.

(ANNEXE AUX *Procès-verbaux des Séances du Comité international  
des Poids et Mesures, SESSION DE 1905.*)





---

LES NOUVEAUX APPAREILS  
POUR LA  
MESURE RAPIDE DES BASES GÉODÉSIQUES;

Par MM. J.-René BENOIT,  
Directeur du Bureau international des Poids et Mesures,

ET

Ch.-Éd. GUILLAUME,  
Directeur-Adjoint.

---

L'étude minutieuse des procédés rapides de mesure des bases, que nous avons entreprise à la suite de la demande adressée au Comité international par l'Association géodésique internationale réunie à Paris en 1900, nous a conduits à apporter aux procédés inaugurés par M. Jäderin des perfectionnements qui augmentent sensiblement la précision obtenue dans les déterminations géodésiques à l'aide de fils tendus sous un effort constant, en même temps qu'ils rendent leur emploi plus rapide et plus facile en campagne.

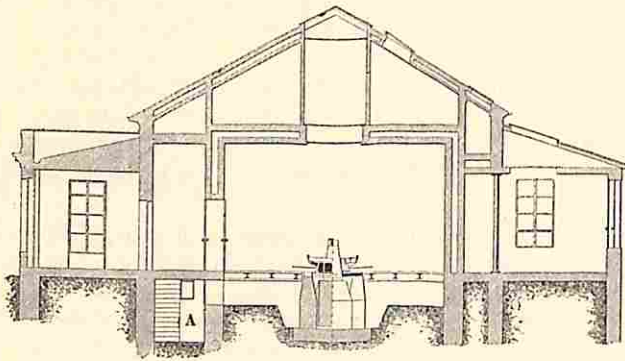
Notre travail s'est divisé de lui-même en deux parties bien distinctes : la première comprend les recherches sur la permanence des fils et sur la précision qu'ils permettent d'obtenir; la seconde se rapporte aux appareils qui les utilisent dans les déterminations géodésiques sur le terrain. Nous dirons, pour n'y plus revenir, que MM. L. Maudet et A. Tarrade nous ont prêté, pour les observations extrêmement nombreuses des fils, leur concours habile et dévoué; et que, pour la réalisation des appareils, la collaboration de M. Carpentier, qui a matérialisé sous une forme pratique et élégante les projets que nous avons établis, nous a permis de mettre à la disposition des géodésiens un matériel qui semble ne plus rien laisser à désirer.

## PREMIÈRE PARTIE.

### CONSTRUCTION ET ÉTUDE DES FILS.

*Méthode d'étude des fils.* — Nous n'avons pas à revenir ici sur quelques essais préliminaires, dont il a été rendu compte au Comité international dans des Rapports antérieurs, et qui constituent les tâtonnements inséparables des débuts de toute recherche. Il nous suffira de rappeler que nous avons constitué successivement deux séries de six fils, dont chacune était composée de trois groupes de deux fils, de trois alliages différents : invar à très faible dilatation (fils A); alliage à 49 pour 100 de nickel, à dilatation voisine de celle du platine (fils B); enfin alliage à 22 pour 100 de nickel et 3 pour 100 de chrome, ayant approximativement la dilatation du laiton (fils C). L'emploi simultané de ces trois alliages était destiné, dans notre idée, à contrôler les changements systématiques possibles de l'un ou de l'autre en fonction du temps, et, surtout, à associer aux fils

Fig. 1.



d'invar des étalons de propriétés très différentes, et pour lesquels l'étude préliminaire des alliages, faite au comparateur, avait indiqué des variations séculaires de signes inverses. Ces premières études ont conduit à des résultats si favorables à tous égards aux fils d'invar que, dans la constitution d'une troisième série de six fils, nous nous sommes limités à ce dernier alliage.

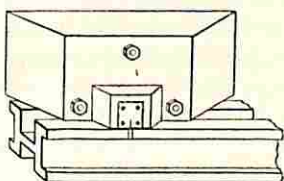
Notre procédé d'étude consiste, on s'en souvient, à rapporter la longueur de tous les fils étudiés à la distance de deux repères fixés contre l'un des murs très épais, limitant un couloir souterrain A (*fig. 1*), protégé par le bâtiment de l'Observatoire du Bureau.

Ces repères sont constitués chacun par une forte embase de bronze, maintenue en place par des tiges de boulons profondément enfoncées dans le mur, et autour desquels on a coulé du ciment; ils portent chacun une plaque de nickel verticale, sur laquelle on a tracé un trait qui atteint son bord inférieur. Les repères extrêmes sont distants de  $2,4^m$ ; ils comprennent entre eux cinq autres repères, situés à  $1^m$  l'un de l'autre, et définissant, en alignement et nivellement, une ligne droite à 1 ou 2 dixièmes de millimètre près. Un repère supplémentaire, situé à  $1^m$  de distance du dernier, permet la détermination de fils de  $25^m$ , qui est parfois demandée au Bureau. Tous les résultats qui seront reproduits plus loin se rapportent à la longueur de  $2,4^m$ .

Aux deux extrémités, extérieurement à cette base, on a placé deux poulies montées sur billes et réglables en hauteur sur une coulisse; des cordes souples, soutenant des poids tenseurs de  $10^k$ , passent dans la gorge de ces poulies.

*Mesure absolue, et contrôle de la longueur de la base.* — La détermination précise de la distance des repères deux à deux est faite à l'aide d'une règle de  $4^m$ , en invar, portant sur deux de ses bords à angle droit des traits qu'on amène au voisinage de ceux des repères, la surface de ceux-ci et celle de la règle se faisant alors exactement suite (*fig. 2*).

Fig. 2.



La règle, dont les constantes ont été soigneusement déterminées, est portée sur deux rouleaux fixés à des trépieds dont les vis calantes trouvent leur place dans des crapaudines encastrées dans le

béton dont est constitué le sol du couloir. D'autres crapaudines reçoivent les pieds de deux cathétomètres que l'on place en face de deux repères consécutifs, et qui portent des microscopes micrométriques, à l'aide desquels on détermine la position du repère de la base par rapport aux deux traits de la règle, distants d'un demi-millimètre environ, entre lesquels il se trouve compris.

La même détermination est répétée, à titre de contrôle, pour chaque intervalle de deux repères, au moyen de la deuxième longueur marquée sur une autre face de la règle.

Les déterminations absolues de la base ont lieu deux ou trois fois par an. La comparaison des fils avec cette base est faite au moins une fois par semaine, et souvent deux ou trois fois.

Après deux années de mesures préliminaires, nous avons pu prendre, comme point de départ de nos déterminations, l'hypothèse suivante, devenue de plus en plus probable à mesure que notre travail se consolidait par le nombre et l'étendue de nos opérations. Des fils convenablement étuvés, et ayant subi une série de manipulations propres à faire disparaître les tensions mécaniques résultant du tréfilage, constituent, par leur ensemble, entre deux déterminations absolues de notre base murale, un témoin suffisamment permanent pour que la longueur de cette dernière puisse être établie avec sécurité par sa comparaison avec ces fils.

Le mode opératoire fondé sur cette hypothèse consiste d'abord à rapporter tous les fils étalons à la base dans les jours qui précèdent et qui suivent immédiatement les mesures absolues de cette dernière, ce qui donne la valeur absolue des fils; puis à déduire dans la suite la valeur de la base de celle des fils, jusqu'à l'époque d'une nouvelle détermination absolue.

La base, en effet, se modifie avec le temps, et l'on ne peut pas plus lui attribuer une longueur fixe qu'on ne peut considérer comme constante la distance des deux microscopes d'un comparateur; et, tout comme, dans un comparateur, on n'emploie les microscopes que pour fournir une longueur inconnue, mais suffisamment constante pendant un temps très court, de même on considère la longueur de la base comme constante pendant le temps très court qui s'écoule entre son repérage au moyen des fils étalons et son utilisation pour la détermination des fils que l'on étudie. La seule différence est que, en général, les opérations au comparateur ne font intervenir que deux étalons à la fois, tandis que les mesures sur la base utilisent



un certain nombre de fils de contrôle, et s'appliquent immédiatement à un certain nombre de fils à l'étude.

Bien que variable, la longueur de la base comporte cependant un contrôle très précieux : ses variations sont une fonction à peu près définie de la température, dont le coefficient a pu être déterminé par des observations de plusieurs années, et qui permet de calculer, pour chaque jour d'observation, une deuxième valeur de la longueur de la base, déduite uniquement de la température donnée par des thermomètres enfoncés dans la muraille. Au bout d'un certain temps, ces deux valeurs discordent en général d'une petite quantité; mais les écarts suivent une marche continue, et restent souvent constants pour une période de plusieurs semaines ou même de plusieurs mois. Cette constance est une garantie de la précision des mesures, et permet d'appliquer, avec sécurité, les valeurs trouvées à la détermination des longueurs de fils inconnus. Nous donnerons, dans la suite, des exemples numériques à l'appui des faits qui viennent d'être rapidement esquissés.

*Mesure de la dilatation des fils.* — Des expériences répétées ayant montré que chaque coulée d'invar constitue un ensemble d'une remarquable homogénéité, dont toutes les parties possèdent une dilatabilité pratiquement identique, on peut se borner à adopter, pour tous les fils, la dilatation trouvée sur un échantillon issu de la même opération. Cette dilatation doit être déterminée dans les conditions mêmes de l'emploi des fils, c'est-à-dire sous un effort de traction de  $10^6$ g; ce n'est pas alors la dilatabilité vraie de l'alliage que l'on mesure, mais une valeur modifiée par les déformations élastiques, qui, comme on sait, sont pour l'invar de moins en moins grandes à mesure que la température s'élève, contrairement à ce qui se passe pour les autres métaux ou alliages; la dilatation de l'invar sous traction est ainsi plus faible que la dilatation libre.

Pour la mesure de la dilatation, l'échantillon choisi est supporté par une règle d'invar, à une des extrémités de laquelle il est fixé, tandis qu'il est tendu, à l'autre extrémité, par un ressort comprimé sous un effort de  $10^6$ g.

La barre est choisie de façon à posséder une dilatation un peu supérieure à celle qui est présumée pour le fil, afin que le ressort soit un peu plus comprimé aux températures élevées qu'aux températures basses, ce qui compense en partie la variation du module d'élasticité du ressort d'acier. Le fil porte deux petites plaques

d'invar, sur lesquelles on a tracé des traits de repère, qui permettent de faire les mesures exactement comme pour une règle, en se servant du comparateur à dilatation.

Depuis plus de deux ans, tous les fils de nouvelle construction que nous avons eu à étudier ont été pris dans deux opérations faites à Imphy, et pour lesquelles nous avons trouvé les dilatations (moyennes entre  $0^\circ$  et  $t^\circ$ , c'est-à-dire  $\alpha + \beta t$ ) données par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Coulée n}^\circ 259 \dots\dots\dots & (+ 0,028 - 0,00232t) 10^{-6} \\ \text{» } 617 \dots\dots\dots & (+ 0,468 - 0,00400t) 10^{-6} \end{aligned}$$

Ces deux formules ont été déduites respectivement des mesures données dans les Tableaux qui suivent; les nombres de la troisième colonne sont les différences entre la distance des traits marqués sur les plaques fixées au fil et la valeur de la Règle n° 13, en platine iridié, du Bureau.

*Fil n° 259.*

Numéros des mesures.	Températures.	Fil — [13].	$\delta$ .
	$0^\circ$		
4.....	0,820	+ 183, <sup><math>\mu</math></sup> 25	— 0, <sup><math>\mu</math></sup> 03
5.....	7,083	+ 130,22	+ 0,38
3.....	15,603	+ 54,21	— 0,99
2.....	22,583	— 5,45	+ 0,75
6.....	30,231	— 71,31	+ 0,01
1.....	37,720	— 139,50	— 0,12

*Fil n° 617.*

Numéros des mesures.	Températures.	Fil — [13].	$\delta$ .
	$0^\circ$		
6.....	0,250	+ 186, <sup><math>\mu</math></sup> 65	— 0, <sup><math>\mu</math></sup> 11
1.....	7,965	+ 124,26	+ 0,46
5.....	15,323	+ 63,83	— 0,08
2.....	22,203	+ 4,59	— 1,23
4.....	29,578	— 54,73	+ 1,77
3.....	37,375	— 122,93	— 0,49

Les mesures sont données ici par ordre de températures croissantes; les numéros indiquent leur ordre chronologique.

Les erreurs résiduelles, sensiblement plus fortes que dans les mesures faites sur une règle, montrent, comme on devait s'y attendre, que les résultats sont un peu moins précis. De plus, le fil n° 239 a manifesté, par la marche des écarts, une tendance à un allongement progressif, qui semble avoir atteint près de 2<sup>μ</sup> pendant les mesures qui ont duré six jours; il en a été tenu compte dans l'établissement de la formule de dilatation.

Pour la suite, il nous a paru préférable de libérer entièrement le résultat du résidu non compensé de l'élasticité du ressort, et d'effectuer la tension du fil à l'aide d'un poids agissant sur un levier coudé dont l'axe est porté par une potence fixée à une extrémité de la règle. C'est cet appareil qui servira de support dans les études que nous aurons à faire à l'avenir.

Les formules de dilatation sont appliquées à la réduction, à une température commune, de la valeur des fils résultant de l'observation immédiate. Pour diminuer autant que possible la valeur numérique de cette réduction, nous avons choisi 15°, comme température de repère, et tous les Tableaux que l'on trouvera plus loin donneront les valeurs des fils ramenés à cette température.

Le coefficient de réduction (coefficient vrai,  $\alpha + 2\beta t$ ) au voisinage de 15° est, pour le fil n° 239, égal à  $-0,042 \times 10^{-6}$  ou  $-1^{\mu},0$  par degré pour 24<sup>m</sup>; pour le fil n° 617, il est de  $+0,348 \times 10^{-6}$  ou de  $+8^{\mu},3$  par degré pour 24<sup>m</sup>. Une erreur de 1 degré entraînerait, dans le calcul de la longueur du premier fil, un écart de  $\frac{1}{24\ 000\ 000}$  de sa valeur; pour le second, il serait de  $\frac{1}{3\ 000\ 000}$  environ, alors que, pour l'acier ordinaire, il serait supérieur à  $\frac{1}{100\ 000}$ .

L'incertitude qui règne sur la détermination des dilatations est presque de l'ordre de grandeur des variations trouvées pour le premier fil, qui est issu d'une coulée exceptionnellement bien réussie, et qu'on peut à peine espérer reproduire autrement que par hasard; nous croyons être certains, en revanche, de pouvoir obtenir, des aciéries d'Imphy, des fils un peu moins dilatables que le dernier, qui l'est cependant déjà trente fois moins que l'acier ordinaire.

Les observations faites dans le cours de l'année sur notre base murale du sous-sol, et, plus encore, celles qui ont été effectuées en plein air, nous ont permis, par le fait des variations de la température ambiante, de contrôler l'égalité de dilatation des fils issus d'une même coulée; et, dans les plus grands écarts de la température,



qui ont atteint une vingtaine de degrés, il a été impossible de trouver l'indice d'aucune différence systématique permettant de conclure que la dilatation de ces fils présente une différence appréciable.

Nous pouvons utiliser en revanche les variations de la température extérieure pour déterminer la dilatation de fils qui nous sont envoyés par des Services géodésiques, et provenant d'une opération qui nous est inconnue. C'est ainsi par exemple que nous avons opéré pour le fil O de la Section géographique de l'État-Major de l'Armée serbe, qui avait été construit par MM. Ahlberg et Ohlson, à Stockholm.

Les comparaisons, faites par l'intermédiaire de notre base extérieure, avec neuf fils de dilatation connue, ont donné les résultats suivants :

Dates.	Températures.	Fil — 24 <sup>m</sup> .	z.
9 mai 1904.....	13,3	+0,45	+0,03
2 » .....	13,4	+0,42	-0,01
11 » .....	15,4	+0,45	+0,01
21 » .....	15,6	+0,45	-0,01
18 » .....	16,4	+0,48	0,00
3 » .....	16,9	+0,44	-0,05
20 » .....	17,2	+0,49	0,00
19 » .....	17,4	+0,53	+0,03
13 » .....	20,1	+0,58	+0,04
16 » .....	26,4	+0,64	-0,01

On déduit de ces comparaisons une dilatation moyenne de +0<sup>mm</sup>,0173 par degré (1) ou de +0<sup>m</sup>,719 par degré et par mètre entre 13° et 26°. Ces valeurs sont beaucoup moins certaines que celles que donne le comparateur, mais permettent cependant des réductions très approchées, comme le montrent les erreurs résiduelles.

---

(1) Cette dilatation comprend, outre celle du fil, la variation supplémentaire des réglettes de laiton qui le terminent; pour les longueurs comprises entre les zéros des réglettes, cette dilatation est de 2<sup>m</sup>,9 par degré; celle du fil serait donc seulement + 0<sup>mm</sup>,0144, ou de +0<sup>m</sup>,60 par mètre et par degré.

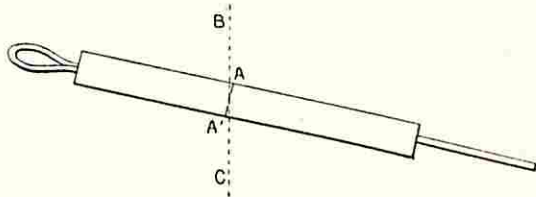


*Règles de construction des fils.* — Il est essentiel que, dans le passage de l'état de couronne enroulée à celui de complète extension, le fil reste dans les limites de la déformation élastique. Or l'expérience a montré que ce résultat est obtenu, si l'on passe (pour un fil d'invar bien éroulé, de 1<sup>mm</sup>,6 à 1<sup>mm</sup>,7 de diamètre) d'un rayon de courbure de 25<sup>cm</sup> au rayon pratiquement infini du fil tendu; tandis que, si le rayon d'enroulement est sensiblement inférieur à la valeur ci-dessus, le fil éprouve, avec le temps, des déformations bien sensibles.

Pour réaliser les meilleures conditions de construction, le fil est amené, dès le tréfilage aux aciéries d'Imphy de la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville, sur un tambour de 50<sup>cm</sup> de diamètre; grâce à l'élasticité de l'alliage, la couronne s'ouvre ensuite sur un diamètre légèrement plus fort, qui devient son diamètre naturel; ainsi, dans les enroulages ultérieurs sur 50<sup>cm</sup>, ou dans la rectification qu'il subira pour les mesures, le fil éprouvera des déformations de signe inverse, mais qui resteront purement élastiques.

Pour l'opération de l'étuvage, le fil est enroulé également sur une chaudière de 50<sup>cm</sup> de diamètre, sur laquelle il reste exposé, pendant deux à trois mois, à une température graduellement décroissante, depuis 100° jusque vers 20°; il est livré sur ce même diamètre minimum de 50<sup>cm</sup> aux constructeurs pour l'ajustage des réglottes; et les consignes les plus strictes sont données aux ouvriers chargés de

Fig. 3.



ce travail pour qu'en aucun moment le fil ne se trouve enroulé sur un diamètre plus petit. Enfin, les tambours destinés au transport des fils achevés sont encore établis au même diamètre, ou à un diamètre un peu supérieur.

Aux deux extrémités du fil sont fixées des réglottes d'invar, di-

visées en millimètres, et dont on applique l'arête contre les repères dont on veut mesurer la distance. Or les conditions de l'éclairage peuvent obliger, en campagne, à donner à la face portant la division des inclinaisons diverses. De plus, la disposition de notre base murale exige que la comparaison soit faite avec la division des réglottes tournée vers le haut, alors qu'en campagne celle-ci est en général dirigée plus ou moins obliquement vers le bas. Les tangentes aux extrémités du fil tendu normalement étant elles-mêmes inclinées d'un angle  $\alpha = 0,024$  sur l'horizon, il en résulte que les extrémités des mêmes traits présentent entre elles des distances différentes, dans les diverses opérations de la détermination ou de l'emploi du fil, si ces extrémités n'aboutissent pas à une arête prolongeant l'axe du fil lui-même. Les différences que l'on peut ainsi constater sont loin d'être négligeables. La valeur indiquée ci-dessus pour l'inclinaison sur l'horizontale montre, en effet, qu'un point éloigné de  $5^{\text{mm}}$  de l'axe décrit, en tournant autour de ce dernier, une demi-circonférence, qui l'amène à occuper, dans les deux directions supérieure et inférieure, des positions A, A' (fig. 3), situées à  $0^{\text{mm}},24$  de part et d'autre du plan vertical BC définissant la position du point correspondant de l'axe du fil. La somme des déplacements aux deux extrémités est donc de  $0^{\text{mm}},48$  ou  $\frac{1}{20000}$  de la longueur du fil.

On évite complètement cette cause d'erreur considérable en disposant les réglottes de manière à ce que leur arête divisée prolonge l'axe du fil. La figure 4 représente une des réglottes dont nous avons

Fig. 4.



établi la forme de manière à répondre à cette condition. La liaison avec le fil est obtenue par l'intermédiaire d'une petite pièce cylindrique dans laquelle le fil est vissé à fond, puis rivé par derrière. La pièce elle-même est ensuite vissée à fond dans la réglotte, et fixée par une goupille qui coupe à moitié le pas de vis.

*Vérifications relatives à la forme des réglottes.* — Pour contrôler les données du calcul, nous avons établi, contre le mur extérieur de l'Observatoire du Bureau, deux potences en fonte, solidement bou-

lonnées dans la muraille, et portant des repères identiques à ceux des appareils servant en campagne et qui seront décrits plus loin; les réglettes sont amenées, pour les comparaisons, sur les repères de cette base avec leur arête divisée dirigée vers le bas.

Dans ces comparaisons, souvent répétées, les fils sont pris consécutivement en deux séries d'ordre inverse, pour éliminer la faible variation continue de la base; ces comparaisons sont encadrées par des mesures faites sur la base du sous-sol. Entre les séries d'opérations, les fils ne sont pas enroulés; ils sont retirés du couloir souterrain, ou y sont réintroduits par un soupirail. L'opération est ainsi très rapide.

Les comparaisons ont porté soit uniquement sur des fils munis de réglettes du modèle qui vient d'être décrit, soit sur des séries mixtes, comprenant des fils de construction ancienne, où l'arête divisée se trouvait à 5<sup>mm</sup> environ de l'axe.

Nous avons d'abord comparé entre eux, à cinq reprises différentes, cinq fils construits par M. Démichel, et quatre construits par M. Carpentier, tous munis des nouvelles réglettes.

Les divers fils ont fourni pour la différence des deux bases (Base extérieure — Base du sous-sol) les valeurs suivantes, moyennes des cinq journées d'observation :

Fils Démichel.			Fils Carpentier.		
	Différences.	$\delta$ .		Différences.	$\delta$ .
	mm	mm		mm	mm
A <sub>25</sub> . . . . .	—0,33	+0,06	N° 1 . . . . .	—0,42	—0,03
A <sub>27</sub> . . . . .	—0,46	—0,07	N° 2 . . . . .	—0,36	+0,03
A <sub>32</sub> . . . . .	—0,40	—0,01	N° 3 . . . . .	—0,38	—0,01
A <sub>37</sub> . . . . .	—0,38	+0,01	N° 4 . . . . .	—0,40	+0,01
A <sub>39</sub> . . . . .	—0,38	+0,01	Moy . . . . .	—0,39	$\pm 0,02$
Moy . . . . .	—0 39	$\pm 0,03$			

Pour les différentes journées d'observation, on a trouvé, pour la différence des deux bases, évidemment variable avec la température, les nombres ci-après :



Dates.	Fils.		D. — C.
	Démichel.	Carpentier.	
1904.			
	mm	mm	mm
16 mai.....	—0,31	—0,35	+0,04
18 ».....	—0,42	—0,43	+0,01
19 ».....	—0,37	—0,36	—0,01
20 ».....	—0,41	—0,38	—0,03
21 ».....	—0,44	—0,45	+0,01
Moy...	—0,39	—0,39	±0,02

Si les observations étaient sans erreurs, les différences D. — C. devraient être constantes; leurs écarts montrent le degré de précision avec lequel la comparaison des deux bases a été faite. Si l'on considère qu'il s'agit de la différence de deux groupes d'observations, dont on compare les différences obtenues par deux séries de fils, on reconnaîtra que ces écarts n'ont rien d'exagéré, et peuvent même être considérés comme très petits, puisqu'ils sont inférieurs, en moyenne, au millionième de la quantité mesurée. Ces nombres indiquent l'échelle de précision des mesures; et, en appliquant au Tableau qui précède, on voit que les différences entre les fils Carpentier rentrent dans les mêmes limites, tandis que celles des fils Démichel en sortent d'une très petite quantité.

Cette supériorité dans la concordance obtenue par les fils Carpentier, par rapport aux fils Démichel, nous semble être une conséquence de la construction plus parfaite des premiers. Il ne semble pas, d'ailleurs, qu'il y ait rien de systématique dans les écarts fournis par les deux groupes de fils, puisque la différence des deux bases a été trouvée identique par les deux moyennes. Il est même très remarquable qu'une concordance aussi bonne puisse ressortir d'observations faites à l'œil nu sur une division millimétrique. La raison en est sans aucun doute dans le nombre considérable des observations desquelles les résultats ci-dessus ont été déduits; cette comparaison utilise, en effet, un ensemble de plus de 3000 lectures. Tous les résultats que nous mentionnerons dans la suite ont été d'ailleurs aussi appuyés sur un ensemble de même importance relative, et le travail entier sur plus de 150 000 lectures.

Les écarts constatés entre les fils Démichel paraissent réels. Cette opinion est d'autant plus légitime qu'ils ont été retrouvés, sinon



identiques, du moins très semblables, dans une autre série de comparaisons dont il sera question dans un instant.

Une direction défectueuse de la dernière section du fil, entraînant celle de la réglette, expliquerait en partie les divergences trouvées; cependant, nous n'avons pas pu établir de relation bien certaine entre ce défaut du fil et les écarts constatés. Une illusion d'optique, conduisant à prolonger inconsciemment les traits au delà du bord de la réglette, et les différences d'éclairage et de position des observateurs dans les lectures faites sur les deux bases, peuvent aussi occasionner de petites erreurs.

Ces considérations ont, d'ailleurs, surtout une valeur rétrospective et théorique, puisque, d'une part, les fils de très bonne construction ne présentent plus d'écarts notables, et que, d'autre part, ces écarts s'éliminent sur la moyenne d'un certain nombre de fils de construction un peu moins parfaite. Or, pour bien des raisons, aucune mesure ne devra être faite en campagne sans que l'on soit pourvu de plusieurs fils se contrôlant mutuellement.

Nous avons essayé de nous documenter mieux sur cette question, en renouvelant les comparaisons au moyen des 6 fils d'invar récemment construits pour le contrôle permanent de notre base murale du sous-sol.

Un premier groupe de cinq comparaisons, faites du 25 juin au 2 juillet 1904, a donné, pour la différence des deux bases :

Fils.	Différences.	$\delta$ .
	mm	mm
A <sub>6</sub> .....	—0,36	—0,03
A <sub>7</sub> .....	—0,36	—0,03
A <sub>8</sub> .....	—0,31	+0,02
A <sub>9</sub> .....	—0,30	+0,03
A <sub>10</sub> .....	—0,35	—0,02
A <sub>11</sub> .....	—0,33	0,00
	—0,33	±0,02
Moy.....	—0,33	±0,02

La direction des réglettes a ensuite été révisée très soigneusement, et, au besoin, légèrement retouchée, afin que la tangente à l'extrémité du fil tendu eût, par rapport à l'horizontale, l'inclinaison indiquée par la théorie, inclinaison telle que, dans une rotation autour de son axe longitudinal, l'arête divisée conserve toujours la même

position. Nous avons obtenu alors, entre le 4 et le 18 juillet, les valeurs suivantes de la différence moyenne des deux bases, de plus en plus petite à mesure que montait la température extérieure :

Fils.	Différences.	$\delta$ .
	mm	mm
A <sub>6</sub> .....	-0,23	-0,02
A <sub>7</sub> .....	-0,17	+0,04
A <sub>8</sub> .....	-0,22	-0,01
A <sub>9</sub> .....	-0,20	+0,01
A <sub>10</sub> .....	-0,22	-0,01
A <sub>11</sub> .....	-0,23	-0,02
Moy.....	-0,21	$\pm 0,02$

Il semble bien que, entre les deux séries d'opérations, les valeurs relatives des fils, observés dans les positions inverses des réglottes, se soient légèrement modifiées: pour cinq des fils, la concordance s'est améliorée, mais le fil A<sub>7</sub> ramène la moyenne des écarts sensiblement à sa précédente valeur. Il s'agit d'ailleurs de quantités très petites, en moyenne inférieures au millionième, et qu'il est difficile de garantir.

La comparaison avec des fils d'ancienne construction, à réglottes non échanerées, a donné des résultats bien différents. Nous nous sommes servi, pour établir la différence moyenne des deux bases, des 5 fils Démichel dont il a été déjà question, et nous avons déterminé, en partant de cette relation entre les bases, la correction de 4 fils, A<sub>13</sub> à A<sub>16</sub>, appartenant à l'Institut géodésique prussien, et qui ont servi dans la mesure d'une base à Schubert, dans la Prusse orientale. Les différences des deux bases (moyennes de cinq journées d'observation), trouvées par ces deux séries de fils, sont données ci-après :

Fils nouveaux.			Fils anciens.		
Différences.	$\delta$ .		Différences.	$\delta$ .	
	mm	mm		mm	mm
A <sub>26</sub> ...	-0,60	+0,04	A <sub>13</sub> ...	-1,08	+0,05
A <sub>27</sub> ...	-0,69	-0,05	A <sub>14</sub> ...	-1,07	+0,06
A <sub>32</sub> ...	-0,62	+0,02	A <sub>15</sub> ...	-1,15	-0,02
A <sub>37</sub> ...	-0,64	-0,00	A <sub>16</sub> ...	-1,22	-0,09
A <sub>39</sub> ...	-0,67	-0,03	Moy.	-1,13	$\pm 0,05$
Moy.	-0,64	$\pm 0,03$			

Les fils à réglettes droites donnent, conformément aux indications de la théorie, une valeur plus faible de la base extérieure, comparée à celle du sous-sol, que celle qu'indiquent les fils à réglettes échan-crées; la différence moyenne est de  $0^{\text{mm}},48$ , nombre identique à celui que donne le calcul appliqué aux dimensions réelles des anciennes ré-glettes, et très semblable aussi à celui ( $0^{\text{mm}},46$ ) qui avait été trouvé autrefois par le retournement des fils bout pour bout (et par con-séquent des réglettes de haut en bas) sur la base du sous-sol.

Il est intéressant de remarquer que les écarts individuels pour les fils anciens sont les plus forts que nous ayons constatés jusqu'ici. Ces écarts dépassent très sensiblement les erreurs possibles des observations, fait que confirment pleinement des comparaisons faites à Potsdam.

Les différences entre les valeurs de chacun de ces fils et leur moyenne, obtenues par les observations faites sur la base du sous-sol, sont données, en effet, par la première colonne significative du Tableau ci-dessous, tandis que la deuxième colonne contient les va-leurs relatives sur la base extérieure; la troisième colonne, enfin, reproduit les nombres relatifs trouvés à Potsdam, tels qu'ils nous ont été communiqués par le Professeur E. Borrass, de l'Institut géodésique prussien.

*Valeurs individuelles des fils rapportées à leur moyenne.*

Fils.	Mesures faites		
	sur la base murale		
	du sous-sol.	extérieure.	à Potsdam.
	mm	mm	mm
A <sub>13</sub> . . . . .	-0,35	-0,40	-0,39
A <sub>14</sub> . . . . .	+0,02	-0,04	-0,04
A <sub>15</sub> . . . . .	-0,18	-0,16	-0,19
A <sub>16</sub> . . . . .	+0,51	+0,60	+0,63

Les différences relatives trouvées dans les mêmes conditions d'ob-servation sont donc pratiquement identiques, puisqu'elles ne dif-fèrent pas, en moyenne, de 1 millionième de la longueur mesurée. Cette concordance est d'autant plus remarquable que les mesures se sont trouvées séparées par un intervalle de temps de plus de huit mois, les mesures de Potsdam ayant été faites en août 1903,

celles de Sèvres en mai 1904. Entre ces mesures, les fils ont été soumis à plusieurs enroulages et déroulages, et ont subi les trépidations d'un voyage. Les écarts des première et troisième colonnes sont notables au contraire, et dépassent certainement les limites des erreurs d'observation.

*Détermination du coefficient de dilatation de la base du sous-sol.* — Les manipulations nombreuses auxquelles nous avons soumis les fils de notre première série, dans le courant de l'automne 1902, ont provoqué, ainsi qu'il a été dit dans le Rapport sur les travaux du Bureau, présenté au Comité international dans sa session de 1903, des variations irrégulières de plusieurs de ces fils, qui ont rompu la régularité des séries de mesures, et ne nous ont permis, pour effectuer le calcul de la dilatation de la base, d'utiliser que les observations postérieures aux premiers jours de décembre 1902. La rupture d'un fil, survenue le 31 octobre 1903, a interrompu de nouveau les mesures, et nous a obligés à traiter séparément les résultats compris entre le 9 décembre 1902 et le 24 octobre 1903 d'une part, et ceux qui ont été obtenus du 7 novembre 1903 au 20 juillet 1904, date à laquelle les fils des anciennes séries ont été abandonnés pour le contrôle permanent de la base, et remplacés par les six nouveaux fils d'invar.

Pour ces deux intervalles de temps, nous avons ordonné les observations par ordre de températures croissantes, puis nous les avons groupées en moyennes de trois ou de quatre observations hebdomadaires à des températures voisines. Les deux périodes utilisées comprennent au moins un maximum ou un minimum de la température, de telle sorte que les variations séculaires du mur sont en partie éliminées du résultat. Les deux Tableaux qui suivent contiennent les valeurs trouvées pour la différence moyenne entre la base et les fils, ramenés toujours à 15°, correspondant aux températures de la base indiquées dans la première colonne. La dernière colonne donne les erreurs résiduelles.

*Observations du 9 décembre 1902 au 24 octobre 1903.*

Température.	Base — fils.	$\delta$ .
0	<sup>mm</sup>	<sup>mm</sup>
9,74	+0,53	+0,05
9,94	+0,55	+0,04
10,03	+0,57	+0,05



*Observations du 9 décembre 1902 au 24 octobre 1903 (suite).*

Température.	Base — fils.	$\delta$ .
<sup>o</sup>	<sup>mm</sup>	<sup>mm</sup>
10,27	+0,49	-0,08
10,50	+0,55	-0,06
10,97	+0,69	+0,01
13,20	+1,06	-0,05
13,44	+1,14	-0,01
14,49	+1,37	+0,03
14,85	+1,43	+0,02
15,14	+1,45	-0,01
15,56	+1,55	+0,01
15,86	+1,60	+0,01

La dilatation qui s'en déduit est de  $0^{\text{mm}},183$  par degré pour  $24^{\text{m}}$ .

*Observations du 7 novembre 1903 au 20 juillet 1904.*

Température.	Base — fils.	$\delta$ .
<sup>o</sup>	<sup>mm</sup>	<sup>mm</sup>
8,40	+0,59	+0,02
8,68	+0,65	+0,03
9,64	+0,80	+0,01
10,13	+0,86	-0,01
10,34	+0,92	+0,01
10,87	+1,05	+0,05
11,04	+1,02	-0,02
11,76	+1,12	+0,03
12,46	+1,26	-0,02
13,08	+1,29	-0,09
14,11	+1,52	-0,04
14,72	+1,67	-0,01
15,53	+1,82	0,00
16,12	+1,97	+0,05
16,58	+2,05	+0,05

D'après cette deuxième série, la dilatation serait de  $0^{\text{mm}},174$  par degré.

Combinant ces deux séries avec des poids proportionnels aux intervalles de température qu'elles ont utilisés, on trouve, pour la dilatation de la base,

$$0^{\text{mm}},178 \text{ par degré,}$$

valeur correspondant au coefficient de dilatation  $7,41 \times 10^{-6}$ , ou à une variation de  $7^{\mu}, 41$  par degré et par mètre.

*Parallélisme des valeurs de la base fournies par les fils et de ses valeurs calculées.* — Ainsi qu'il a été dit précédemment, les valeurs de la base déduites de la comparaison avec les fils sont toujours mises en regard des nombres qui résultent du calcul établi sur la connaissance de la température de la muraille et de son coefficient de dilatation. Pour ne pas surcharger inutilement ce Rapport de l'énorme quantité de chiffres que comporte cette comparaison, nous nous limiterons à la période récente, où nous avons eu en service les six fils d'invar constituant notre troisième série; et même, pour cette période, nous ne reproduirons que les observations faites dans la dernière semaine de chaque mois, où nous avons également comparé à la base les onze fils restant de nos deux précédentes séries. Les observations comprises dans la période du 4 au 20 juillet 1903 se sont composées, pour chaque fil, de dix séries de 40 observations, soit 400 observations par fil et 6800 observations pour l'ensemble des dix-sept fils. Elles ont servi à établir la relation entre les fils et la base, à l'époque de la mesure absolue (7 et 8 juillet). Ces observations ont été ramenées à  $15^{\circ}$ , en tenant compte du coefficient de dilatation de la base, dont la température est restée comprise, dans cette période, entre  $14^{\circ}, 6$  et  $16^{\circ}, 7$ . La valeur portée au Tableau, pour cette date moyenne, est celle qui est résultée de la détermination absolue de la base. Les valeurs suivantes sont obtenues comme il a été dit.

		Valeurs de la base — $24^m$ .			
Dates.	Tempé- ratures.	d'après 11 fils		d'après 6 fils	calculée.
		divers.	d'invar.		
1904.	4-20 juil. . . . .	15,00	$+2,64$	$+2,64$	$+2,64$
	23 août. . . . .	16,47	$+2,85$	$+2,87$	$+2,89$
	24 sept. . . . .	14,71	$+2,59$	$+2,58$	$+2,59$
	31 oct. . . . .	12,75	$+2,31$	$+2,33$	$+2,24$
	26 nov. . . . .	10,15	$+1,89$	$+1,84$	$+1,78$
	31 déc. . . . .	8,30	$+1,65$	$+1,62$	$+1,45$
1903.	28 janv. . . . .	6,95	$+1,42$	$+1,40$	$+1,21$
	25 fév. . . . .	8,26	$+1,55$	$+1,54$	$+1,44$
	25 mars. . . . .	9,49	$+1,78$	$+1,76$	$+1,66$
	29 avril . . . . .	10,18	$+1,87$	$+1,88$	$+1,78$
	27 mai . . . . .	11,00	$+1,99$	$+2,02$	$+1,97$

Les chiffres fournis par les deux séries de fils montrent un parallélisme tout à fait remarquable. Après un intervalle de près de dix mois, ils donnent encore des valeurs de la base identiques au millionième, et une seule différence, pendant toute cette période, dépasse accidentellement le cinq cent millième. Nous reviendrons plus loin sur cette concordance.

Si nous examinons maintenant les écarts entre les valeurs de la base données par les fils et ses valeurs calculées par sa température, nous constatons que, jusqu'à la fin de septembre (les observations hebdomadaires indiquent jusqu'au milieu d'octobre), l'accord est complet. Puis la base mesurée reste au-dessus des valeurs calculées, avec un écart maximum de  $0^{\text{mm}},2$  en janvier. Depuis lors, la différence est allée en diminuant, pour n'être plus, à l'époque des dernières mesures, que de  $0^{\text{mm}},05$ .

Ces différences peuvent être interprétées de deux façons; on peut penser, d'une part, que le coefficient de dilatation déduit, pour le mur, des précédentes observations, certainement moins bonnes que les dernières, a été trouvé un peu trop fort. On compenserait, en effet, presque entièrement toutes les différences en admettant un coefficient de dilatation égal à  $0^{\text{mm}},164$  pour  $24^{\text{m}}$ , qui est de 8 pour 100 inférieur à celui qui est résulté de nos précédentes comparaisons. Ou bien, on peut admettre, d'autre part, que le mur a subi une variation différente des changements simplement thermiques, dans le sens d'un retrait inférieur au retrait normal. Il suffirait, par exemple, de supposer qu'il s'est produit dans le mur une déformation mécanique, due à l'action des parties extérieures, de l'ordre de 1 à 2 dixièmes de millimètre, pour expliquer toute la divergence constatée. Dans les précédentes déterminations, on n'avait jamais atteint une température aussi basse que dans cette dernière période; d'ailleurs, nous avons observé, en notant les changements de la température extérieure, que le mur subit parfois des variations qui en dépendent, et qui ne sont pas complètement expliquées par les températures mesurées dans le sous-sol.

De telles variations n'ont lieu ni de nous surprendre, ni de nous inquiéter. Les chiffres ci-dessus nous montrent des périodes de deux à trois mois pendant lesquelles la différence entre les valeurs mesurées et calculées du mur est restée constante au millionième près. C'est plus qu'il n'en faut pour nous permettre d'affirmer que nos comparaisons, faites à l'aide du mur, présentent une parfaite

continuité; et qu'il n'y a aucun danger, pour l'exactitude des résultats, à laisser s'écouler quelques heures, ou même quelques jours, entre la vérification de la valeur de notre base au moyen des fils du Bureau, et l'utilisation de cette valeur pour la détermination d'autres fils.

*Stabilité relative des fils, déduite de leurs comparaisons.* — Nous venons, à propos de la vérification de la base au moyen de deux séries de fils de constitution très différente, de montrer le remarquable accord qu'ils ont conservé entre eux pendant une longue période. Mais il s'agit ici, pour chaque groupe, d'un certain nombre de fils, pour lesquels on peut penser qu'il s'est produit une compensation des variations.

Cependant, si nous prenons individuellement les fils, l'accord n'est guère moins parfait. Nous avons rassemblé en effet, dans le Tableau suivant, dans lequel sont condensées 7800 lectures, les valeurs relatives de chacun de nos nouveaux fils, rapportées à leur moyenne et groupées par périodes de cinq comparaisons consécutives.

Dates.	Fils.					
	A <sub>6</sub> .	A <sub>7</sub> .	A <sub>8</sub> .	A <sub>9</sub> .	A <sub>10</sub> .	A <sub>11</sub> .
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1904. 16-20 juillet. . . .	-0,30	+0,04	-1,00	-0,92	+0,23	+1,97
25 juillet-3 sept. . .	-0,29	+0,05	-1,03	-0,94	+0,25	+1,98
10 sept.-8 oct. . . .	-0,27	+0,02	-1,05	-0,91	+0,23	+1,99
15 oct.-12 nov. . . .	-0,31	+0,04	-1,06	-0,91	+0,25	+2,00
19 nov.-17 déc. . . .	-0,30	+0,03	-1,03	-0,93	+0,23	+2,00
25 déc.-6 janv. . . .	-0,29	+0,03	-1,03	-0,93	+0,21	+2,01
1905. 7 janv.-14 janv. . .	-0,30	+0,05	-1,02	-0,93	+0,20	+2,00
16 janv.-28 janv. . .	-0,31	+0,05	-1,02	-0,92	+0,21	+1,99
4 fév.-25 fév. . . .	-0,28	+0,03	-1,02	-0,93	+0,22	+1,99
2 mars-20 mars. . . .	-0,29	+0,04	-1,03	-0,93	+0,23	+1,99
23 mars-8 avril. . . .	-0,30	+0,04	-1,02	-0,92	+0,22	+1,99
15 avril-4 mai. . . .	-0,30	+0,04	-1,02	-0,93	+0,23	+1,99
6 mai-20 mai. . . .	-0,31	+0,04	-1,02	-0,93	+0,23	+1,98

Les valeurs relatives des fils se sont donc conservées au millionième près pendant cette période de près de dix mois, au cours de laquelle ils ont été soumis à plus de soixante comparaisons. Aucun



écart systématique, avec la saison, ne permettrait d'admettre que leur dilatation présente une différence sensible.

Les résultats qui viennent d'être rapidement énumérés nous amènent à conclure que nos fils, quelle que soit leur nature, soumis simplement aux manipulations que nécessite leur transport d'un des murs du couloir contre lequel ils restent étendus, sur l'autre mur où ils sont comparés, ainsi qu'à la tension périodique qu'exigent ces comparaisons, ne subissent, les uns par rapport aux autres, aucun changement appréciable, et constituent encore, après un temps très long, des étalons présentant entre eux des différences identiques.

Malheureusement, nos expériences ne sont pas encore suffisantes pour que nous puissions affirmer l'invariabilité de la longueur absolue des fils avec le temps, dans les limites de précision que permettent les comparaisons dont nous venons de voir de nombreux exemples. Nous nous bornerons à enregistrer cette permanence comme probable, réservant à une époque ultérieure la publication d'expériences qu'il est nécessaire de prolonger pendant des années pour pouvoir être plus affirmatifs.

Les détails que nous allons donner sur la tenue des fils soumis à des manipulations diverses vont nous montrer qu'on peut en espérer, dans toutes les conditions normales de leur emploi, un degré de permanence élevé.

*Changements produits par des tensions excessives.* — Des expériences bien souvent répétées nous ont montré que les changements produits, dans un fil d'invar de section normale, par une charge de  $10^6$  longtemps prolongée, échappent complètement à l'observation dans les limites de la précision que les mesures faites sur notre base permettent de garantir.

Les allongements engendrés par des tensions plus fortes deviennent bientôt mesurables, mais diffèrent beaucoup suivant le degré d'érouissage du fil. Le mode de fixation des réglettes que nous employons autrefois augmentait encore cette action, la chauffe du fil pour le soudage produisant un ramollissement de ses extrémités, qui cédaient un peu sous l'effort. Cette cause d'allongement a été supprimée par le nouveau mode de fixation des réglettes que nous avons adopté (p. 12).

Les mesures faites avec nos anciens fils, moins résistants que ceux qui ont été construits récemment, nous ont révélé, après des

charges prolongées de 30<sup>kg</sup>, des déformations dépassant un peu les limites des erreurs d'observation et qui allaient rapidement en augmentant. Nous avons trouvé ainsi pour le fil A<sub>0</sub> du Bureau, soumis à des charges croissantes et prolongées, puis mesuré, comme toujours, sous la tension de 10<sup>kg</sup> :

Charges.	Durée de la charge.	Allongements.
Valeur initiale...		mm
20 <sup>kg</sup> .....	45 heures.	0,00
		0,00
30 <sup>kg</sup> .....	5 »	0,03
	24 »	0,09
	51 »	0,11
40 <sup>kg</sup> .....	6 »	0,12
	31 »	0,16
	47 »	0,16
50 <sup>kg</sup> .....	8 »	0,19
	24 »	0,31
	72 »	0,39
	100 »	0,43
	142 »	0,41
60 <sup>kg</sup> .....	4 »	0,54
	25 »	0,52
	47 »	0,53
	95 »	0,59

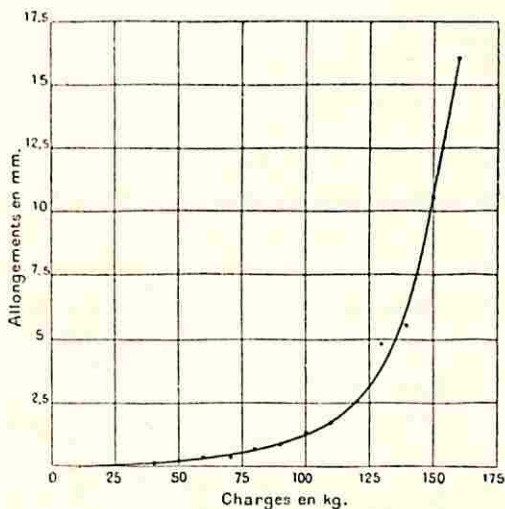
Des tractions beaucoup plus fortes ont donné, pour le fil A<sub>37</sub>, les allongements suivants :

Charges.	Durées.	Allongements.
Valeur initiale ....		mm
60 <sup>kg</sup> .....	40 heures.	0,00
70 .....	26 »	0,38
80 .....	24 »	0,43
90 .....	24 »	0,70
100 .....	24 »	0,88
		1,30

Charges.	Durées.	Allongements
110 <sup>kg</sup> .....	24 heures	mm 1,71
120 .....	24 »	2,51
130 .....	26 »	4,81
140 .....	24 »	5,52
150 .....	25 »	10,59
160 .....	72 »	16,08

Ces résultats sont représentés dans le diagramme (fig. 5).

Fig. 5.



La section du fil étant de  $2\text{mm}^2$ , la plus forte charge correspond à  $73\text{ kg:mm}^2$ ; le plus grand allongement est, en valeur relative, de  $0,00066$ ; il est un peu supérieur au dixième de l'allongement élastique pour la même charge. Sous  $50\text{kg}$ , l'allongement résiduel est de l'ordre du centième de la déformation élastique.

Nous verrons plus loin dans quelle mesure les tensions provoquées dans le fil par des efforts de traction peuvent ensuite disparaître.

La variation progressive avec le temps a été suivie sous une charge de 60<sup>kg</sup> pour une première série de quatre fils de 2,4<sup>mm</sup> : A<sub>32</sub>, A<sub>33</sub>, A<sub>34</sub> et A<sub>37</sub> ; les allongements ont été les suivants :

Durée de la charge de 60 <sup>kg</sup> .	Allongements moyens.
	mm
Valeur initiale .....	0,00
1 minute.....	0,15
2 " .....	0,17
5 " .....	0,18
10 " .....	0,19
30 " .....	0,23
1 heure .....	0,28
2 " .....	0,33
8 " .....	0,38
24 " .....	0,41

Une autre série de trois fils du même étirage, A<sub>29</sub>, A<sub>30</sub>, A<sub>31</sub>, a donné :

Durée de la charge de 60 <sup>kg</sup> .	Allongements moyens.
	mm
Valeur initiale .....	0,00
10 minutes.....	0,22
30 " .....	0,26
1 heure .....	0,26
2 " .....	0,27
8 " .....	0,34
24 " .....	0,36

Les courbes de la figure 6 représentent ces deux séries d'expériences.

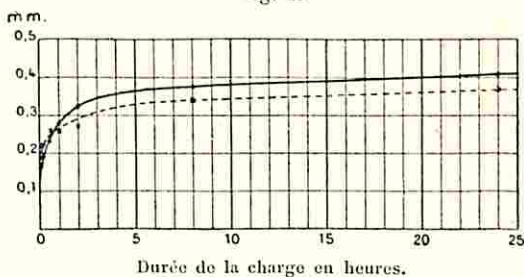
Les résultats qui précèdent ont été obtenus, comme il a été dit, avec des fils moins éroulés que ceux dont nous avons disposé depuis lors. L'étude détaillée des allongements sous traction devra être reprise avec des fils de construction récente. Pour le moment, on



pourra se faire une idée de ce qui a été gagné en comparant les nombres qui précèdent aux résultats ci-après :

Une charge de  $60^{\text{kg}}$ , agissant pendant 24 heures, a produit un allongement de  $0^{\text{mm}}, 25$ , obtenu comme moyenne d'observations faites sur 26 fils; une charge de  $100^{\text{kg}}$ , de même durée, a donné  $1^{\text{mm}}, 07$ , et une charge d'une heure sous  $150^{\text{kg}}$ ,  $2^{\text{mm}}, 23$ ; ces derniers nombres sont des moyennes respectives de trois et quatre fils. Les différences avec les anciens fils sont toujours de même sens, mais apparaissent surtout aux très fortes charges. La rupture des fils bien écrouis est très brusque.

Fig. 6.



Nous avons renoncé maintenant à soumettre les fils à des tractions aussi fortes, qui peuvent n'être pas sans inconvénients pour leur tenue ultérieure; nous nous bornons aujourd'hui à exposer, pendant 24 heures, les fils neufs à une traction de  $60^{\text{kg}}$ , parfaitement suffisante pour la vérification de la solidité des attaches et de l'écrouissage du fil.

*Étude des changements produits par l'enroulage ou le déroulage des fils.* — Ces recherches ont comporté des enroulages et déroulages consécutifs et nombreux, puis des mesures après de longues périodes durant lesquelles les fils étaient restés soit enroulés, soit étendus sous faible tension.

Voici, par exemple, les résultats trouvés dans des mesures faites après les tensions dont il vient d'être question, et qui ont été intercalées entre des enroulages des fils  $A_{29}$ ,  $A_{30}$ ,  $A_{31}$ , faits sur un tambour de  $50^{\text{cm}}$  de diamètre. Le point de départ des longueurs est la valeur finale du précédent Tableau.

Nombre d'enroulages.	Valeurs des fils. mm
0 .....	+0,36
1 .....	+0,23
2 .....	+0,22
5 .....	+0,20
10 .....	+0,18
20 .....	+0,16
30 .....	+0,20
40 .....	+0,21
50 .....	+0,19
60 .....	+0,19

Les premiers enroulages, après l'extension des fils, les ramènent en arrière; mais les changements constatés à partir du cinquième enroulage ne sortent pas des limites des erreurs d'observation.

Les fils ayant été exposés de nouveau, pendant 24 heures, à la tension de 60<sup>ks</sup>, sont revenus en moyenne à une longueur de +0<sup>mm</sup>,34 supérieure à celle des fils neufs; des enroulages faits librement, sur un diamètre de 50<sup>mm</sup>, ont amené alors aux valeurs moyennes ci-après :

Nombre d'enroulages.	Valeurs des fils. mm
0 .....	+0,34
1 .....	+0,22
2 .....	+0,22
5 .....	+0,19
10 .....	+0,18
20 .....	+0,15
30 .....	+0,14
40 .....	+0,16

La même remarque faite au sujet des enroulages sur un tambour s'applique, comme on le voit, aux enroulages libres; les fils prennent bientôt un état invariable. Les figures 7 et 8 représentent les variations observées dans ces deux séries d'enroulages.

Les mêmes résultats sont obtenus *a fortiori*, avec des fils qu'on n'ont pas été soumis à une extension forcée, c'est-à-dire à des fils neufs. Nous l'avons vérifié dans des cas nombreux.

Fig. 7.

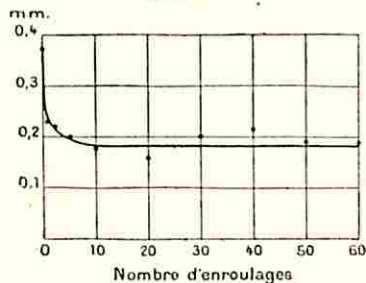
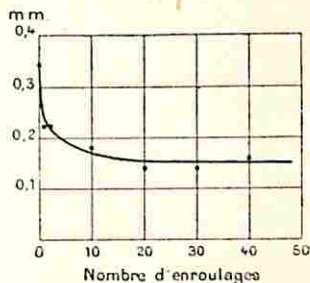


Fig. 8.



Les résultats reproduits ici, corroborés par un grand nombre d'autres, dont il nous paraît inutile de surcharger ce Rapport, montrent, en outre, qu'il est indifférent, au point de vue de la conservation des fils, de pratiquer les enroulages librement ou sur un tambour; les résultats sont, dans les deux cas, les mêmes. Cette remarque nous a permis d'ajouter, au matériel de mesure des bases, un tambour d'enroulage, qu'on avait toujours craint d'employer, pensant qu'il en pourrait résulter un forçement des fils, hors de leur forme naturelle, et, par conséquent, un changement avec le temps. Il n'en est rien, mais à la condition que les réglettes soient orientées sur la courbure du fil de manière à ce qu'il s'adapte de lui-même au tambour.

Les Tableaux qui suivent résument nos mesures faites sur des fils avant leur enroulage, et après un déroulage succédant à un repos de un ou plusieurs mois, pendant lequel le fil restait sous la forme d'une couronne de 50<sup>mm</sup> de diamètre. Les mesures elles-mêmes ont toujours été échelonnées sur la totalité du mois qui a précédé ou suivi l'enroulage; elles sont réunies dans les Tableaux par moyennes de cinq mesures faites dans la première ou la deuxième quinzaine du mois. Une différence entre ces nombres, si elle existait, serait de nature à mettre en évidence une déformation progressive du fil étendu après avoir été enroulé. Les valeurs données ci-après sont les excès vrais de la longueur du fil sur 24<sup>m</sup>, réduits à 15°.

*Fils restés enroulés pendant un mois.*

Fils. — Nos.	Avant l'enroulage.		Après l'enroulage.	
	Premières mesures.	Dernières mesures.	Premières mesures.	Dernières mesures.
19.....	<sup>mm</sup> -0,30	<sup>mm</sup> -0,35	<sup>mm</sup> -0,34	<sup>mm</sup> -0,35
20.....	+0,41	+0,46	+0,45	+0,44
23.....	-0,12	-0,13	-0,09	-0,10
25.....	+0,78	+0,74	+0,72	+0,71
26.....	-0,54	-0,55	-0,55	-0,55
27.....	-1,15	-1,17	-1,18	-1,19
28.....	-0,11	-0,11	-0,10	-0,10
29.....	-0,36	-0,34	-0,39	-0,41
	-0,17	-0,18	-0,18	-0,19
	-0,18		-0,19	

*Fils restés enroulés pendant six semaines (1).*

32.....	<sup>mm</sup> +0,88	<sup>mm</sup> +0,88	<sup>mm</sup> +0,88	<sup>mm</sup> +0,88
33.....	+0,47	+0,42	+0,43	+0,45
34.....	+0,71	+0,71	+0,73	+0,71
35.....	+0,56	+0,52	+0,58	+0,55
36.....	+1,10	+1,11	+1,11	+1,10
37.....	0,00	-0,01	0,00	0,00
38.....	+0,75	+0,72	+0,76	+0,77
39.....	+0,60	+0,57	+0,63	+0,61
40.....	+0,04	+0,03	+0,07	+0,06
41.....	-0,03	-0,04	0,00	-0,04
	+0,51	+0,49	+0,52	+0,51
	+0,50		+0,51	

(1) Les fils 32, 33, 34, 35 étaient enroulés sur un tambour d'aluminium.



*Fils restés enroulés pendant deux mois.*

Fils. — N <sup>o</sup> .	Avant l'enroulage.		Après l'enroulage.	
	Premières mesures.	Dernières mesures.	Premières mesures.	Dernières mesures.
	mm	mm	mm	mm
7.....	-1,06	-1,06	-1,07	-1,06
8.....	-5,11	-5,11	-5,16	-5,12
11.....	+1,64	+1,62	+1,64	+1,65
12.....	-0,22	-0,21	-0,22	-0,19
13.....	+0,19	+0,15	+0,16	+0,17
14.....	-1,50	-1,51	-1,46	-1,45
15.....	+0,07	+0,08	+0,05	+0,05
16.....	+0,56	+0,58	+0,57	+0,59
17.....	+0,50	+0,50	+0,50	+0,52
18.....	+0,66	+0,65	+0,62	+0,68
21.....	+0,23	+0,24	+0,21	+0,23
22.....	0,00	0,00	0,00	+0,02
	-0,34	-0,34	-0,36	-0,33
	-0,34		-0,35	

*Fils restés enroulés pendant sept mois.*

A <sub>30</sub> .....	mm +0,21	mm +0,20	mm +0,20	mm +0,22
A <sub>31</sub> .....	+0,41	+0,47	+0,45	+0,45
A <sub>33</sub> .....	+0,27	+0,26	+0,21	+0,26
	+0,30	+0,31	+0,29	+0,31
	+0,30		+0,30	

L'examen des nombres ci-dessus ne permet pas de conclure au moindre changement systématique des fils; les écarts entre les longueurs trouvées avant et après l'enroulage sont, en effet, pour les divers groupes de fils, positifs ou négatifs, et si petits qu'ils rentrent absolument dans les limites des erreurs d'observation. Il est

même remarquable que, pour chaque fil pris individuellement, les concordances des nombres résultant de mesures faites à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe faible, et consistant à estimer la position d'un trait par rapport à une échelle millimétrique, soient finalement d'un ordre voisin, en moyenne, de 1 à 2 centièmes de millimètre. La raison en est dans le nombre considérable des lectures qui ont conduit aux résultats du Tableau, et leur diversité aussi complète que possible. Chacun des nombres individuels ci-dessus est déduit en effet de cent lectures, faites à raison de vingt dans une même série, dans des positions quelconques et sans cesse modifiées des réglettes par rapport aux repères, et de cinq séries à des jours différents, donnant des équations relatives de la base et des fils légèrement variables d'une mesure à l'autre, et susceptibles de répartir peu à peu les équations à déterminer sur un intervalle de quelque étendue.

En somme, notre expérience de l'invariabilité pratique des fils qui restent enroulés pendant un temps prolongé dans les conditions que nous avons indiquées, est fondée sur un ensemble de plus de douze mille lectures. On peut donc considérer cette expérience comme très probante; nous nous proposons néanmoins de la poursuivre toutes les fois que nous en aurons l'occasion.

*Effet des secousses.* — Il nous reste à dire quelques mots d'un traitement particulier des fils susceptible de les modifier, mais propre aussi à augmenter dans la suite leur stabilité. Des constatations faites au hasard des expériences journalières nous ayant conduits à penser que des fils soumis à des secousses énergiques sont susceptibles de se raccourcir, nous avons soumis ce phénomène à une étude systématique qui a été fructueuse.

Tout d'abord, nous avons opéré sur des fils ayant subi une forte distension. Ils étaient saisis par les porte-mousquetons attachés aux réglettes, étendus dans toute leur longueur, puis frappés vigoureusement contre le plancher par un mouvement rythmé des deux opérateurs. Voici quelques-uns des résultats obtenus.

Le fil A<sub>37</sub>, ayant subi un allongement de 16<sup>mm</sup>,08 par l'effet d'une traction prolongée qui avait atteint 160<sup>kg</sup> (p. 25), a éprouvé ensuite, par des battages, les raccourcissements ci-après :

Nombre de choes.	Raccourcissements.
Valeur initiale.....	0,00
100.....	1,34
300.....	3,20
500.....	4,04
1000.....	5,21
1500.....	6,75
2500.....	8,88

L'effet des secousses, très marqué au début, s'atténue rapidement, puisque les 1000 choes qui ont été donnés au fil à partir du quinze-centième ont produit une action de même ordre que celle des 200 premiers, estimée d'après les mesures faites après 100 et 300 choes.

Le fil, dont les attaches étaient très fatiguées, s'est rompu un peu après 3000 choes, ce qui a mis fin à l'expérience. L'allure des chiffres ne permet pas de dire avec certitude si la valeur finale aurait été inférieure ou serait restée supérieure à celle que le fil possédait avant le début des traactions; en d'autres termes, si l'effet des choes eût été d'annuler seulement les tensions restées dans le fil après les efforts considérables que nous lui avons fait subir, ou s'ils se fussent manifestés par une diminution de l'état de contrainte engendré par le tréfilage, et que l'étuvage prolongé n'avait pas entièrement annulé.

Cette question a été résolue par l'étude d'autres fils, soumis préalablement à de moindres extensions, et qui, par un nombre suffisant de battages, sont toujours arrivés à des longueurs inférieures à leur valeur initiale. Ce phénomène a été constaté bien nettement sur plusieurs fils de la même livraison que le n° A<sub>37</sub> ci-dessus, et qui n'avaient pas été éerouis au maximum; il a été plus marqué encore sur des fils tirés au maximum de dureté.

Ainsi, un fil très éeroui, qui s'était allongé de 0<sup>mm</sup>,88 sous une charge de 100<sup>kg</sup>, s'est ensuite raccourci de 1<sup>mm</sup>,92 par l'effet de 100 choes; de 1<sup>mm</sup>,40 après les 200 suivants; enfin de 0<sup>mm</sup>,45 sous 200 autres choes; soit, au total, de 3<sup>mm</sup>,77, arrivant ainsi à 2<sup>mm</sup>,89 au-dessous de sa valeur initiale. Nous avons observé, pour un autre fil, un raccourcissement de 8<sup>mm</sup>,32 sous l'action de 400 choes succédant à une charge de 100<sup>kg</sup>, qui avait produit un allongement de 1<sup>mm</sup>,09.

Ces exemples, pris parmi le nombre très grand de nos expériences, montrent à l'évidence que les chocs très énergiques auxquels les fils sont soumis dans toute leur longueur font non seulement disparaître les allongements produits par les tensions auxquelles ils peuvent être exposés accidentellement, mais encore ramènent bien au-dessous de la valeur initiale, par l'effet des glissements moléculaires entraînant l'alliage vers une position d'équilibre plus stable que celui dans lequel il se trouvait après le passage à la filière.

Les quelques nombres donnés ci-dessus prouvent que l'effet des chocs va rapidement en s'atténuant à mesure que l'on s'approche de l'équilibre définitif. Le battage apparaît ainsi comme une opération éminemment propre à augmenter la stabilité des fils, et à parer aux variations qu'ils subiraient inévitablement en campagne si elle n'avait pas été effectuée par avance.

L'effet de ce battage est assez variable d'un fil à l'autre, soit que l'écroutissage diffère, soit que les chocs, dont il est impossible de mesurer l'énergie et de doser les effets, soient plus ou moins efficaces. Si donc il était fait entièrement sur les fils achevés et laissés un peu trop longs en vue de leur retrait, ils atteindraient l'état relativement stable avec des longueurs qui pourraient différer sensiblement (de quelques millimètres) de la valeur normale de  $24^m$  que l'on cherche à réaliser toujours aussi bien que possible. D'ailleurs, les secousses nombreuses auxquelles les attaches sont soumises dans cette opération pourraient compromettre la solidité. C'est pourquoi les premiers battages sont faits maintenant sur des fils non montés, qui subissent ainsi 200 chocs très énergiques. Puis ils sont munis de leurs réglettes, exposés, comme nous l'avons dit, à une traction de  $60^ks$ , d'une durée de 24 heures, enfin battus de nouveau, généralement 100 fois. Le raccourcissement produit par ce dernier battage est, en moyenne, de  $0^{mm},6$  à  $0^{mm},7$ , et dépasse très rarement  $1^{mm}$ .

Les coups que reçoivent les fils sont d'une énergie telle qu'il est difficile d'imaginer des conditions d'emploi sur le terrain dans lesquelles un fil ait à subir des secousses qui, dans toute une campagne de mesures, dépassent en efficacité celle de deux ou trois des chocs que nous leur imposons; c'est, sans aucun doute, en partie à ce traitement, subi par tous les fils avant le début des autres épreuves, que nous devons d'avoir pu réaliser les conditions de



stabilité dont les Tableaux qui précèdent contiennent de nombreux exemples.

*Polissage du fil.* — A plus d'une reprise, des fils, demeurés pendant des mois dans une atmosphère saturée d'humidité, ont été légèrement attaqués par la rouille, et ont dû être repolis. Cette opération a toujours été faite en frottant légèrement, avec du papier d'émeri fin, le fil tendu afin d'éviter les plis.

Sous une tension initiale de  $10^{b_5}$ , qui se trouvait très fortement dépassée lorsque le mouvement du polissage s'effectuait vers le poids tenseur, nous avons observé parfois de faibles allongements des fils, dépassant rarement quelques centièmes de millimètre. Mais en revanche, lorsque le polissage a été limité à ce qui était strictement nécessaire pour enlever les piqûres et lorsque, en même temps, nous avons réduit un peu la tension initiale, nous avons toujours retrouvé la valeur du fil dans les limites d'erreur des observations.

Nous devons cependant considérer cette opération comme présentant quelque danger, en raison des variations que nous avons constatées à plus d'une reprise, et que l'on n'est pas toujours sûr de pouvoir éviter. Le mieux est évidemment de la rendre inutile, en graissant les fils avec de la vaseline, lorsqu'ils doivent rester longtemps sans emploi dans une atmosphère très humide.

*Vérification complémentaire.* — Le Bureau possède un fil servant à la démonstration de la mesure des bases et des diverses opérations qu'elle comporte, et pour lesquelles il est soumis, en de fréquentes occasions, à toutes les manipulations qui accompagnent une telle mesure. La série suivante de ses valeurs montre bien comment il les a supportées jusqu'ici :

Dates.	Valeurs.		Dates.	Valeurs.	
1904. 8 oct...	$2\overset{m}{4}$	$+ 0,0\overset{mm}{4}$	1905. 28 janv...	$2\overset{m}{4}$	$- 0,0\overset{mm}{1}$
» 15 »...		$+ 0,02$	» 25 fév...		$- 0,01$
» 31 »...		$+ 0,01$	» 30 mars...		$- 0,01$
» 26 nov...		$0,00$	» 29 avril...		$+ 0,03$
» 31 déc...		$- 0,03$	» 31 mai...		$- 0,01$

La longueur du fil s'est donc maintenue dans des limites très serrées, dont les plus grands écarts ne dépassent pas les erreurs possibles des mesures, qui n'ont compris chacune que vingt lectures.

*Conclusions de l'étude des fils.* — Les recherches qui précèdent ont montré qu'en somme les fils d'invar, bien écroulés par le tréfilage, enroulés dès l'usinage sur un tambour d'un diamètre suffisant, étuvés pendant un temps prolongé, ramenés toujours, dans les enroulages nécessaires, à une forme assez voisine de celle de leur équilibre mécanique pour ne produire que des déformations élastiques, pourvus enfin de réglottes du modèle que nous avons indiqué, peuvent servir à transporter, avec une grande exactitude, des longueurs d'une base de repérage à une base à mesurer, si l'on met en œuvre, dans toutes les opérations auxquelles ils servent, une technique bien établie et d'ailleurs facile à suivre. Les tensions ordinaires auxquelles ils sont soumis pour les mesures, et même des efforts doubles auxquels une fausse manœuvre accidentelle pourrait les exposer, ne les modifient pas d'une quantité mesurable. Des chocs violents, et peut-être des trépidations répétées, telles que celles qui peuvent se produire dans un long voyage en chemin de fer, seraient susceptibles de produire un léger raccourcissement dans un fil neuf, ayant conservé, depuis le tréfilage, des tensions mécaniques. Mais l'effet de ces secousses, comme de toutes celles que le fil est susceptible de subir dans les manœuvres sur le terrain, est grandement atténué, et peut être entièrement supprimé par un battage systématique, qu'il est avantageux de faire subir au fil, au moins pour la plus grande partie, avant de le munir de ses réglottes.

La précision des mesures, répétées dans des conditions très diverses, s'est montrée remarquablement élevée. Les comparaisons des fils entre eux, fondées sur des observations nombreuses, ont amené à des concordances de l'ordre du millionième ou d'un ordre supérieur; l'addition des longueurs sur le terrain bénéficiera bien certainement d'une compensation analogue; et finalement les erreurs de chaque lecture individuelle, qui peuvent paraître considérables si on les compare à celles que permettent des microscopes micrométriques, disparaîtront complètement, et n'interviendront en aucune façon pour limiter l'exactitude réelle de la valeur d'une base, dans les limites qu'il semble aujourd'hui désirable d'atteindre.

## DEUXIÈME PARTIE.

### INSTRUMENTS AUXILIAIRES DE LA MESURE DES BASES.

*Principe de la mesure.* — La détermination de la longueur d'une base exige que l'on reporte, un certain nombre de fois, l'étalon de mesure dans des positions successives, qui, partant du premier repère de la base, vont rejoindre le repère marquant sa deuxième extrémité. Le point qui, dans une position de l'étalon, se trouve à son extrémité antérieure, est, dans la portée suivante, situé à son extrémité postérieure; il est défini, pour ces deux opérations, par un repère mobile, que l'on enlève une fois qu'il est devenu inutile, pour le reporter en avant de la section mesurée. La détermination de la distance des repères mobiles deux à deux constitue l'opération fondamentale de la mesure d'une base; mais elle est accompagnée d'un certain nombre d'opérations accessoires, nécessitant des appareils auxiliaires, qui forment, avec les fils et les repères mobiles, l'ensemble du matériel de mesure que nous allons décrire. Quelques-uns de ces appareils reproduisent, sous une forme plus parfaite, les dispositifs que nous avons présentés à la troisième Conférence générale des Poids et Mesures en 1901; d'autres ont été entièrement élaborés depuis lors.

*Repères mobiles.* — Nous nous sommes proposé de donner aux repères mobiles une forme telle qu'ils puissent être amenés rapidement et très exactement dans la position que chacun d'eux doit occuper dans la ligne de la base; nous les avons disposés aussi de manière à ce qu'ils portent les accessoires destinés à la mesure des pentes, sans que l'on ait besoin d'avoir recours, comme on l'avait fait jusqu'ici, à des installations auxiliaires. Enfin, nous avons admis la possibilité de déterminer par une opération simple un point du sol situé verticalement au-dessous de la croisée de traits qui constitue le point fixe de l'espace auquel viennent se joindre les deux portées successives.

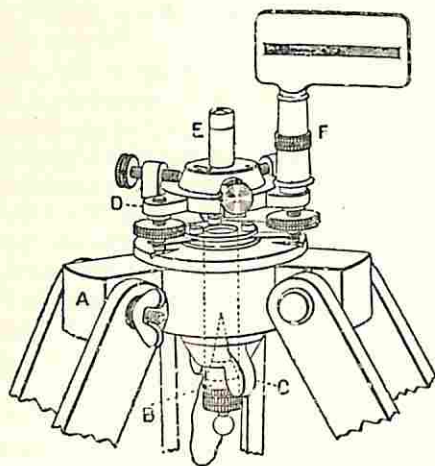
Voici comment ce programme a été mis à exécution: Un solide trépied de bois (*fig. 9*) porte, à sa partie supérieure, un plateau A percé d'une large ouverture verticale. Un tube cylindrique B, fixé au-dessous d'une plaque-crapaudine, et portant à sa partie inférieure un écrou à oreilles C, est serré contre le plateau de bois, par



rapport auquel il peut, d'ailleurs, occuper des positions quelconques dans un espace de quelques centimètres.

La plaque-crapaudine est surmontée d'un disque de bronze D, monté sur trois vis calantes maintenues en place par des ressorts, et qui est muni, à sa périphérie, de trois vis radiales permettant un déplacement micrométrique d'une pièce E, composée d'une embase portant un niveau et surmontée d'un goujon vertical. Ce goujon est terminé par une pastille en un alliage blanc, dur et inoxydable, au

Fig. 9.



centre de laquelle se croisent les traits rectangulaires du repère; il est, de plus, percé d'un canal central dans lequel descend la cordelette de suspension d'un fil à plomb permettant de marquer un point du sol, et qui, lorsqu'il est sans emploi, reste vissé de bas en haut, dans le tube de la plaque-crapaudine (1).

Le disque supérieur est muni, en outre, d'un goujon latéral fixe, qui peut supporter alternativement une mire F et une lunette de

---

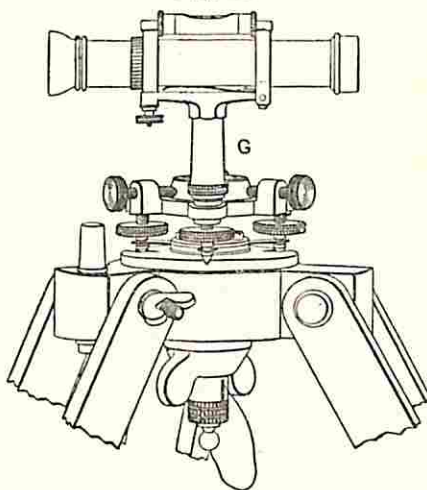
(1) Lorsqu'il fait du vent, il est bon d'entourer le trépied d'une toile si l'on veut opérer avec le fil à plomb. On peut aussi substituer une lunette plongeante à la pièce portant le goujon.



nivellement servant, par la visée de la mire, à déterminer la différence de hauteur de deux trépieds consécutifs.

*Lunette de nivellement.* — Cette lunette G (fig. 10), qui se place, comme il vient d'être dit, sur le disque du repère mobile, est pourvue d'un niveau sensible ; elle porte, au foyer de l'objectif correspondant à la distance de  $24^m$ , une échelle photographique, dont les traits successifs sont à des distances sensiblement égales à celle qui

Fig. 10.



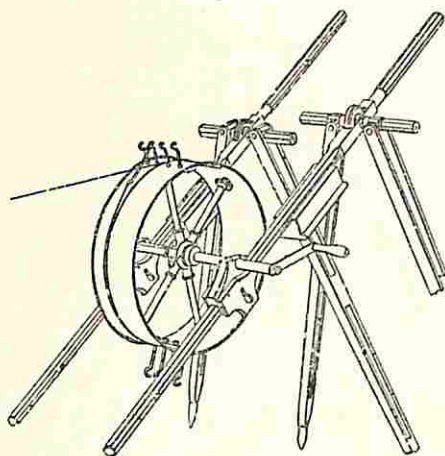
correspond à  $24^{mm}$  vus à la distance de  $24^m$ , soit au millième absolu de la pente. La simple lecture de la position de la mire par rapport à l'échelle donne ainsi la différence de niveau des deux repères successifs, ou plutôt l'inclinaison de la droite qui les joint. Le petit écart entre l'axe optique passant par le zéro de l'échelle et la ligne de foi du niveau, ainsi que les erreurs de la division, se déterminent aisément, la première par des observations réciproques sur deux trépieds conjugués, les autres, par des lectures faites sur une échelle divisée, placée à  $24^m$ .

*Lunette d'alignement.* — Pour déterminer l'alignement des repères, on pose, sur le goujon mobile du dernier repère placé,

une petite lunette qui sert à viser à la fois une mire lointaine, dans la direction du deuxième terme de la base, et le goujon du repère que l'on met en station. Les images de ces deux objets se superposent quand le repère est définitivement en place.

*Piquets tenseurs.* — La tension des fils est obtenue, comme sur la base murale, à l'aide de deux poids de 10<sup>kg</sup>, fixés à des cordes souples passant sur des poulies à billes (voir *fig. 11* et 15). Ces poulies sont portées dans une chape montée sur un solide piquet de bois, muni de deux bras horizontaux servant d'axes à deux étais, articulés

Fig. 11.



dans les deux directions, et qui, avec le piquet lui-même, constituent un trépied fixe et solide. Lorsqu'il est sans emploi (*fig. 11*), le poids est fixé au piquet par deux encastrements, dans lesquels il est retenu par une goupille. Pour l'usage (*fig. 15*), le piquet occupe une position inclinée de 50 grades environ sur l'horizon, de manière à supporter en bout la résultante des efforts de la corde. Des conditions particulières du terrain peuvent nécessiter l'enlèvement des étais, qui sont aisément séparés du piquet, après que l'on a retiré les bras horizontaux; ceux-ci, remis en place après avoir été retournés bout pour bout, servent à l'auxiliaire, chargé de la manœuvre du piquet tenseur, à appuyer ses mains pour l'immobiliser.

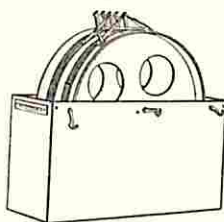
*Tambour d'enroulage des fils.* — Le modèle usuel de tambour que nous avons établi pour l'enroulage des fils en vue de leur transport, consiste (*fig. 11*) en une poulie légère, avec moyeu et jante d'aluminium, munie, à sa partie périphérique, de deux séries de crochets auxquels viennent se fixer les extrémités des fils; la longueur des crochets est telle que les fils arrivent tangentiellement au tambour.

L'axe de la poulie est amovible; il repose, pour l'enroulage et le déroulage, sur deux paliers de bois, également amovibles, qu'on serre à l'aide d'une clavette, pour cette opération, sur deux piquets tenseurs placés l'un à côté de l'autre, et qu'on enlève ensuite.

Pour le transport, le tambour est enfermé dans une caisse où il est retenu, par ses bras, sur trois cales de bois. L'axe et les paliers trouvent également place dans la caisse.

M. Carpentier a modifié ce premier instrument en montant l'arbre

Fig. 12.



à demeurer dans les côtés d'une caisse (*fig. 12*), qui lui servent de paliers. De cette façon, l'enroulage ou le déroulage s'effectuent sans que l'on ait à faire intervenir les piquets tenseurs comme supports. Cette solution présente donc certains avantages sur celle que nous avions donnée au problème pratique de l'enroulage.

*Repères de la base.* — Les points marqués dans le terrain peuvent être fixes ou mi-fixes. Les premiers sont les repères extrêmes de la base, dont la distance, mesurée au moyen du fil, constitue ensuite le côté du premier triangle de toutes les opérations géodésiques. Mais il est avantageux, et souvent nécessaire, de pouvoir marquer dans le sol des points dont l'importance n'est que passagère, et qui disparaissent une fois que la mesure de la

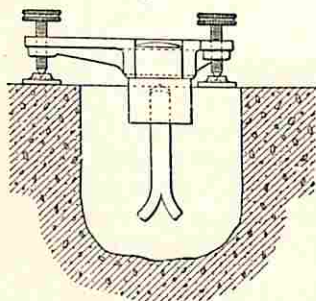
base est achevée. Il faut s'assurer, en particulier, des repères mi-fixes, toutes les fois que la mesure est interrompue pendant un laps de temps plus ou moins long, notamment dans les repos du personnel, ou pendant la nuit, lorsqu'une base n'est pas mesurée en entier dans la même journée.

De plus, il est tout indiqué de poser de tels repères de distance en distance, par exemple à tous les kilomètres, afin de retrouver un point de départ bien déterminé sans avoir à retourner au premier terme de la base, si par hasard on soupçonne, à un moment donné, un déplacement accidentel de tous les repères mobiles.

Les termes de fin de base étaient jusqu'ici, pour la plupart, enfoncés dans le sol; mais il peut paraître avantageux de les fixer à un pilier qui émerge du sol, et qui servira dans la suite à supporter les théodolites pour la mesure des angles. Nous avons donc proposé de constituer ces repères par de solides goujons de bronze, portant une plaque de l'alliage employé pour le tracé des traits des repères mobiles, et maintenus, par un scellement au ciment, dans la partie supérieure du pilier. Ce repère, une fois scellé, peut servir d'axe à un compas traceur marquant, sur le pilier, des cercles concentriques pour le placement du théodolite.

La mise en place du goujon est facilitée par un trépied muni de

Fig. 13.



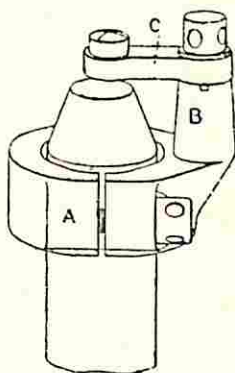
vis calantes (*fig. 13*), dans une ouverture duquel il s'engage, et qui permet de l'amener exactement en place. On coule alors du ciment dans un creux ménagé à cet effet, et l'on retire le trépied dès que le ciment est suffisamment dur.

Les repères mi-fixes sont constitués par des piquets tubulaires en



fer, munis, à leur partie supérieure, d'une bague robuste A (*fig. 14*) serrée par deux vis à broche, et dont une moitié porte une partie surélevée B, sur laquelle on serre un bras horizontal C ayant à son extrémité une croisée de traits. La bague peut tourner autour du piquet, et le bras peut, à son tour, décrire une circonférence entière.

Fig. 14.



La croisée de traits est donc susceptible d'éprouver des déplacements d'assez grande amplitude, et d'atteindre, par les mouvements de ces deux organes, tous les points à l'intérieur d'un cercle donné.

Il n'a pas semblé nécessaire de prévoir, pour ce repère, des déplacements micrométriques. Il suffit, en effet, que la croisée de traits soit amenée en place à 2 ou 3 millimètres près perpendiculairement à la base, et à 2 ou 3 centimètres dans le sens de la base. Les déplacements micrométriques du repère mobile servent à la superposition exacte.

La coïncidence une fois obtenue, le repère mi-fixe est recouvert d'une enveloppe métallique. En général, on l'enfoncera même au-dessous du niveau du sol, et on le recouvrira de terre.

*Accessoires divers.* — Le matériel de mesure d'une base comprend enfin :

1° Un gabarit en câble toronné, muni de deux bagues marquant un intervalle de 24<sup>m</sup>, et servant à placer les repères mobiles à la

distance voulue. Il est accompagné de deux piquets de bois que tiennent les opérateurs.

2° Les étalons nécessaires pour permettre de mesurer l'appoint, c'est-à-dire la distance, inférieure à 24<sup>m</sup>, qui sépare la position du dernier repère mobile du deuxième terme de la base. On peut employer, dans ce but, soit un ruban de 12<sup>m</sup>, soit un fil de 8<sup>m</sup> auquel succède un ruban de 4<sup>m</sup>. Le ruban doit posséder les traits marquant tous les décimètres, et des divisions millimétriques du premier et du dernier décimètre.

3° Une série de mires, que l'on place au théodolite dans la ligne de la base, et qui servent ensuite à aligner les repères mobiles.

### TROISIÈME PARTIE.

#### EMPLOI DES APPAREILS SUR LE TERRAIN.

Quelques indications concernant la manœuvre sur le terrain des appareils qui viennent d'être décrits ne seront pas inutiles; celles qui sont données ci-après sont loin de constituer un manuel complet de leur emploi pour la mesure rapide des bases; il s'agit bien plutôt de donner, par cette rapide esquisse, une idée des simplifications dans le travail que permet notre nouveau matériel. Nous avons d'ailleurs communiqué, à plusieurs des Services intéressés, une instruction plus complète, restée jusqu'ici en manuscrit, et dans laquelle chaque opération est décrite en détail.

Au surplus, nous pouvons difficilement établir des règles fixes pour tous les éléments de la mesure; notre expérience du travail en campagne est, en effet, encore insuffisante, et a été acquise dans des conditions trop faciles de terrain et de transport des appareils pour répondre à tous les cas pratiques.

Les accidents du sol, sa nature, le nombre des appareils, le chiffre du personnel disponible, la plus ou moins grande facilité des transports, dicteront, dans chaque cas particulier, les variantes à apporter au procédé dont nous ne pouvons indiquer ici que les grandes lignes; et c'est seulement lorsque les cas les plus divers auront été abordés par les géodésiens que l'on pourra élaborer une instruction complète, dans laquelle toutes les circonstances puissent être prévues.

*Pose des repères mobiles.* — Le premier repère mobile étant amené approximativement au-dessus du point de départ, en s'aidant du fil à plomb, une équipe, composée de trois opérateurs et de un ou deux porteurs, commence à placer les repères mobiles le long de la base, tandis qu'une seconde équipe achève l'ajustage du premier repère.

Le chef de la première équipe se tient à l'arrière et porte l'une des extrémités du gabarit; il transporte la lunette d'alignement d'un repère à l'autre. Un autre opérateur tient l'autre extrémité du gabarit, tandis que le troisième met en place le trépied ramené de l'arrière à l'avant de la base par un porteur. Après avoir donné les indications approximatives pour l'alignement du trépied, le chef tend le gabarit, amène la bague marquant l'une des extrémités de la longueur de 24<sup>m</sup> contre le goujon du repère mobile qui vient d'être mis en place, tandis que l'opérateur chargé de la pose place le nouveau repère contre la deuxième bague du gabarit. Cela fait, le chef procède à l'alignement au moyen de la lunette; la distance est mesurée de nouveau, l'alignement est rectifié; et, pour finir, le repère est réglé horizontalement au moyen des vis calantes.

Les indications relatives à l'alignement doivent toujours être données par le chef sans ambiguïté et avec la valeur estimée des déplacements à effectuer. Les mots *gauche*, *droite* doivent être évités, et remplacés, par exemple, par l'indication des points cardinaux, ou des localités, ou encore des directions relatives à l'opérateur; une indication telle que : *un peu à gauche*, est rarement comprise et occasionne une perte de temps; au contraire : 15<sup>cm</sup> *vers vous*, contient l'ordre précis du mouvement à exécuter.

Les grands déplacements doivent être faits par un mouvement de tout le trépied; les déplacements plus petits, par la plaque-crapaudine, après le desserrage de l'écrou à oreilles; enfin les derniers seuls avec les vis radiales.

Dans la première mise en place du trépied, on doit assurer une horizontalité approximative du plateau de bois qui le surmonte, pour n'avoir que peu de chemin à faire par les vis calantes; celles-ci sont employées au dernier réglage, lorsque le repère est définitivement en place. L'horizontalité obtenue, et toutes les vis étant serrées, l'opérateur chargé de la pose donne avis au chef, qui commande : *en avant!* L'équipe part alors d'un bon pas, en tenant le gabarit



légèrement tendu. Lorsqu'elle arrive dans sa nouvelle position, le chef commande : *doucement!* et aussitôt après : *halte!* Si ces commandements sont donnés au bon moment et bien exécutés, la bague d'arrière s'arrête sans oscillations contre le goujon; et, après quelques secondes, la bague d'avant marque l'endroit que doit venir occuper le goujon du repère que l'on va placer.

*Mesures.* — La deuxième équipe effectue toutes les mesures; elle se compose de deux observateurs, d'un secrétaire et de deux auxiliaires. Les fonctions de chef sont remplies soit par l'observateur d'avant, soit par le secrétaire.

La première mesure est celle de la pente. Elle est effectuée en général par le secrétaire, qui se porte, le plus rapidement possible, vers le trépied d'avant, substitue la lunette de nivellement à la mire qu'il place sur le goujon de repos, tourne la lunette dans le sens de la marche, puis vers l'arrière de la base, et mesure la différence de niveau par rapport aux trépieds voisins. La lunette de nivellement est enlevée du trépied, et la mire remise en place.

Pendant que le secrétaire détermine la pente, les observateurs reprennent le fil en main, tandis que les auxiliaires, suivant les commandements *attention!* et *poids!* donnés par l'observateur d'avant, remontent les poids dans leurs encastrements, les fixent par les goupilles et chargent les piquets tenseurs sur l'épaule. Au commandement *en avant!* toute l'équipe part vers la nouvelle portée, où elle se remet en station; si le secrétaire n'a pas terminé ses mesures, le piquet tenseur d'avant est placé légèrement de côté, pour ne pas gêner les opérations, et n'est mis définitivement en place que lorsque le secrétaire s'est retiré.

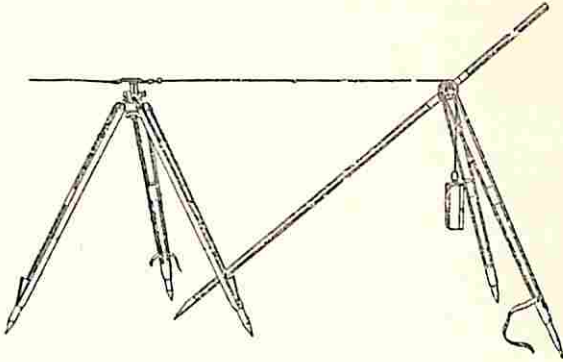
Aussitôt les tenseurs en station, le fil est accroché par les porte-mousquetons aux S en laiton qui terminent les cordes, puis aux commandements espacés : *attention, goupille, poids!* les auxiliaires retirent les goupilles et descendent les poids sans secousse, d'un mouvement lent et simultané, tandis que les observateurs, retenant les porte-mousquetons, arrêtent les mouvements transversaux du fil, et surtout l'empêchent de buter dans les repères.

Les piquets-tenseurs doivent être placés bien d'aplomb, les poulies se faisant face exactement, pour éviter les frottements latéraux de la corde. Leur position est assurée par les auxiliaires de telle



sorte que les réglottes viennent se placer d'elles-mêmes contre les repères mobiles. La figure 15 montre l'organisation d'une des extrémités de la portée.

Fig. 15.



Les observateurs saisissent les réglottes aussi légèrement que possible, de manière à éviter toute contrainte, et en particulier tout effort longitudinal sur le fil; puis les mesures commencent dans l'ordre suivant. L'observateur de droite annonce : *prêt!* l'observateur de gauche donne sa lecture, puis celui de droite indique la sienne. Les réglottes ayant été déplacées d'une quantité quelconque, on fait un nouveau couple de lectures, et ainsi de suite. Le secrétaire inscrit les lectures et fait immédiatement leurs différences. En général, cinq lectures sont suffisantes; toutefois, si une lecture diffère des autres au point de faire croire à une inadvertance d'un observateur, ou à une erreur d'écriture, le secrétaire ferait faire une sixième lecture. Les cinq différences successives étant normalement concordantes (les écarts de  $0^{\text{mm}},3$  sont exceptionnels; ceux de  $0^{\text{mm}},5$  indiquent, en général, non un écart fortuit, mais une erreur), le secrétaire indique *terminé*. Il s'occupe immédiatement du nivellement de la portée suivante, tandis que le reste de l'équipe reprend en mains le fil et les piquets tenseurs et marche en avant.

Les observateurs doivent échanger leurs places périodiquement, par exemple de dix en dix portées, pour que les équations personnelles s'éliminent dans l'ensemble.

La température du fil, supposée la même que celle de l'air, est mesurée au moyen d'un petit thermomètre porté par le secrétaire, par un des observateurs ou par un auxiliaire soigneux. Comme, avec un fil d'invar provenant d'une opération métallurgique bien réussie, une erreur de température de plusieurs degrés serait nécessaire pour affecter le chiffre du millionième de la portée qu'on mesure, la détermination de la température ne nécessite aucune précaution particulière; et, dans les journées où les conditions atmosphériques ne sont pas extrêmement variables, ses mesures peuvent être largement espacées. On comprendra le progrès apporté à la mesure des bases par l'emploi des fils d'invar, en se souvenant qu'avec un fil d'acier, le chiffre du millionième est modifié par une erreur d'un dixième de degré sur la température.

Le raccord au second terme de la base est effectué au moyen du fil de 8<sup>m</sup> et du ruban de 4<sup>m</sup>, dont il a été parlé plus haut. Le fil arrive, soit par excès, soit par défaut, à moins de 4<sup>m</sup> de l'extrémité de la base, et la division du ruban permet ensuite de comprendre le trait du repère fixe entre deux traits millimétriques de l'un des décimètres divisés. Ainsi, toute fraction résiduelle inférieure à 24<sup>m</sup> peut être rapidement et aisément mesurée.

Les conditions du terrain, les diverses aptitudes des observateurs, la vitesse de marche des deux équipes, peuvent imposer une distribution du travail un peu différente de celle qui vient d'être esquissée. En particulier, l'observateur de droite, ou le chef de l'équipe d'avant, peut être chargé du nivellement; mais ce sont là des conditions plutôt exceptionnelles.

Dans un terrain moyen, chacune des équipes peut achever son travail en moyenne dans le même temps. Toutefois il se produit, dans la vitesse instantanée de marche des équipes, des variations qui occasionneraient des retards du travail si elles se succédaient sur la base d'assez près pour se gêner mutuellement. Mais ces écarts de la vitesse moyenne se compensent le plus souvent sur quelques portées, de telle sorte que les deux équipes ne réagissent pas l'une sur l'autre si elles ont entre elles deux ou trois repères mobiles, donnant beaucoup d'élasticité à tous les mouvements.

Cette condition fixe le nombre des repères mobiles dont il faut

être muni si l'on veut pouvoir travailler rapidement et avec une parfaite sécurité. La distribution des repères est la suivante : à l'arrière, un repère témoin ; puis les deux repères de la portée qu'on mesure ; deux ou trois repères entre les équipes ; deux pour l'équipe d'avant, et un ou deux que l'on transporte de l'arrière à l'avant. Une telle organisation du travail exige donc de huit à dix trépieds. Mais, surtout en terrain facile, on opère déjà commodément avec six trépieds, en serrant davantage les équipes, et en n'ayant qu'un trépied en transport.

*Expériences pratiques.* — Il nous suffira d'ajouter quelques mots concernant les expériences réellement faites, pour montrer, par des exemples pratiques, ce que l'on peut attendre des nouvelles méthodes.

Les mesures effectuées sur notre base du Parc de Saint-Cloud, dans des conditions encore insuffisantes au point de vue du chiffre du personnel, mais excellentes au point de vue du terrain, nous ont montré qu'on peut certainement faire, en moyenne, en 1 minute et demie ou 2 minutes, une portée comprenant la mise en station, cinq mesures et le transport à la portée suivante. Une vitesse de 500<sup>m</sup> à l'heure en bon terrain doit donc être considérée comme un minimum, et il pourra n'être pas rare que l'on mesure près de 1<sup>km</sup> en 1 heure.

En confirmation de cette évaluation, nous avons reçu communication, de M. le Professeur Borrass, des expériences faites au cours de la mesure de la base de Schubin, et où une vitesse supérieure à 5<sup>km</sup> par jour, avec la fixation de deux points intermédiaires, a été atteinte pendant 9 jours consécutifs, dans lesquels des pluies fréquentes et même de véritables orages ont beaucoup dérangé le travail.

La concordance des mesures à l'aller et au retour s'est trouvée souvent, dans nos mesures, de l'ordre du millionième, et cette même concordance a été obtenue dans des déterminations faites récemment en Serbie sur des bases atteignant 6<sup>km</sup>.

Dans les mesures de Schubin, la concordance a été seulement de l'ordre de  $\frac{1}{500000}$  en moyenne, ce qu'il faut attribuer sans doute aux conditions dans lesquelles ces mesures ont été faites, et qui avaient pour but de se rendre compte de la rusticité de la méthode et des conditions climatiques que le travail pouvait supporter à la rigueur, bien plutôt que de déterminer la limite de précision



qu'il comporte dans les conditions les meilleures. Ajoutons, à ces indications, le fait que la mesure a été effectuée avec des fils de notre premier modèle, qui laissaient encore un peu à désirer. Il nous semble qu'avec nos nouveaux fils, dans un bon terrain et par beau temps, une concordance du millionième devrait être la règle.

*Expansion de la méthode.* — Les communications provisoires que nous avons faites au Comité international, au fur et à mesure de l'avancement de notre travail, et surtout la Note que nous avons adressée à l'Association géodésique internationale dans sa Conférence de 1903 à Copenhague, ont fait connaître aux géodésiens à la fois les perfectionnements que nous avons apportés à la méthode de M. Jäderin, et la possibilité de faire, pour les Services géodésiques, les études de fils qui seraient demandées au Bureau international.

Ainsi qu'il a été dit dans les Rapports présentés au Comité, les demandes d'études qui nous sont parvenues ont été nombreuses, et sont arrivées assez rapidement à créer, au Bureau, un courant ininterrompu d'occupations, tant par la nécessité de compléter les études d'intérêt général dont nous avons rendu compte, et pour lesquelles les fils très nombreux dont nous avons disposé nous ont été d'une grande utilité, que pour la simple détermination de l'équation des fils, consécutive au traitement que nous leur avons fait subir pour les amener dans l'état de stabilité nécessaire à la conservation de cette équation.

La liste suivante des Services géodésiques ou métrologiques, qui se sont adressés jusqu'ici au Bureau pour demander la détermination d'un nombre plus ou moins grand de fils, montre bien que les travaux dont nous venons de rendre compte répondaient à une nécessité urgente, et sont appréciés par ceux qui y ont eu recours :

*Allemagne* : Institut géodésique prussien; Landesvermessung; École technique supérieure de Stuttgart.

*République Argentine* : État-Major de l'Armée, Institut géographique militaire.

*France* : Service géographique de l'Armée; Service hydrographique de la Marine; Section technique de l'Artillerie; Service du cadastre; Expéditions coloniales.



*Grande-Bretagne et Irlande* : Board of Trade, Standards Department; National Physical Laboratory.

*Colonies britanniques* : Observatoire du Cap; Université de Sydney.

*Japon* : Commission géodésique.

*Mexique* : Commission géodésique; Commission de géographie exploratrice; Observatoire de Tacubaya.

*Roumanie* : Service géographique de l'Armée.

*Russie* : Chambre centrale des Poids et Mesures; Section topographique de l'État-Major général.

*Serbie* : Section géographique de l'État-Major général.

*Norvège* : Section topographique de l'État-Major général.

*Suisse* : Commission géodésique.

Ces appareils, utilisés ainsi en divers pays, dans des conditions différentes de terrain, de climat, avec des habitudes de travail très diverses, sont éminemment propres à soumettre à une épreuve sévère les fils et tout le matériel de mesure des bases. Il en résultera la possibilité de se faire, en très peu d'années, une idée très complète des services qu'ils peuvent rendre, et de remédier aux défauts qu'ils pourraient encore présenter.



---

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,  
3780 Quai des Grands-Augustins, 55.

---

