

CONSTRUCTION DES CABLES DU PONT SUSPENDU
DE L'EAST RIVER.

Il nous paraît important de reproduire ici la publication faite par notre ami Wilhelm Hildenbrand, ingénieur attaché au pont de l'East River, dans le « Van Nostrand's eclectic engineering Magazine, » sur le nouveau mode de fabrication des câbles à fils parallèles employés pour la suspension de ce pont. La compétence et l'expérience que l'auteur a acquises dans ce genre de travail qu'il a suivi dans tous ses développements et tous ses progrès, d'abord sous la direction du célèbre ingénieur John A. Roebling, qui a conçu et construit le pont du Niagara, puis sous celle du fils de ce dernier, le colonel W. A. Roebling, ingénieur en chef du pont d'East River, donnent le plus grand intérêt à son travail, qui sera toujours consulté avec fruit par les ingénieurs et les constructeurs.

« Il y a trois méthodes différentes en usage dans la fabrication des câbles en fer :

1° Celle qui consiste à tordre ensemble les torons du câble.

2° Celle où les fils sont parallèles et les câbles faits sur le terrain, puis élevés et mis en place.

3° Celle où les câbles sont faits sur place, sur le pont même où les fils sont posés et tendus séparément ; puis, quand le faisceau est formé, sont entourés d'un fil de fer de manière à former un câble. »

C'est cette dernière méthode qui est employée au pont de l'East River, c'est aussi celle qu'employa l'ingénieur John A. Roebling, dans la construction des ponts suspendus sur le Niagara, à Cincinnati, à Alleghany, etc.

Chaque méthode a ses avantages qui en recommanderont l'emploi dans certains cas. La comparaison du premier mode avec les deux derniers donne lieu aux remarques suivantes. On manie facilement une corde de fer, et un câble de cordes peut être formé promptement et sans l'aide de machines. Par suite, pour les ponts légers et de peu de longueur, ces sortes de câbles sont reconnus les plus avantageux. Mais la résistance à la traction d'un fil non tordu est de 10 p. 0/0 plus considérable que celle d'un fil tordu ; d'où il suit que, dans un pont à larges travées, un câble de cordes ne serait pas économique, par cette raison qu'il exigerait plus de métal et serait plus lourd que celui en fils non tordus ; secondement, la circonférence du premier serait de 40 p. 0/0 plus considérable que celle du dernier, et offrirait par suite une surface proportionnelle plus grande au vent et à l'action corrosive de l'atmosphère. Ces considérations qui sont fort importantes, surtout dans le cas particulier du pont sur l'East River, qui est exposé aux grands ouragans et aux émanations de l'eau salée, suffiraient seules à recommander l'emploi du câble à fils droits. Enfin, on trouve une grande difficulté à rattacher d'une façon satisfaisante les lourdes cordes de fils à la chaîne d'ancrage, qui sera toujours, quoi qu'on fasse, faussée, et elles exigent, par suite, plus de maçonnerie que le câble compact formé de faisceaux de fils droits. Il résulte de ces observations qu'un câble de cordes de fer, dans le cas du pont sur l'East River, devait être rejeté.

Considérant maintenant la seconde méthode qui a été employée — par exemple — au pont de Wheeling, nous remarquons qu'elle n'est applicable qu'autant que, dans le prolongement de l'axe du pont, derrière chaque ancrage, il y a un terrain libre suffisant de la longueur du câble. Il est, en effet, absolument impraticable de fabriquer les faisceaux des câbles sur un point qui n'est pas à l'endroit même où ils doivent être posés, car un faisceau de fils droits ne peut pas être manié comme une corde, et on l'avarierait en le lovant.

Il est évident que, dans le cas qui nous occupe, alors que le pont réunit les quais de deux villes populeuses, un pareil chantier n'existe pas, et par suite, la nécessité oblige d'abandonner cette méthode. Mais, même si la place le permettait, il y a d'autres raisons qui s'opposent à la fabrication de ces faisceaux sur le rivage. Quand un faisceau de fils, placés parallèlement sans tension, est suspendu par ses deux extrémités, il prend une certaine flèche, et les fils qui sont à la partie inférieure, travaillent bien plus que ceux de la partie supérieure. Cette différence de tension dans les fils simples peut amener une déperdition de vingt-cinq pour cent dans l'effort de tension définitif. Par suite de l'élasticité du métal, il se produira une espèce de répartition de forces, mais personne ne peut dire dans quelle proportion, et ce n'est que par hypothèse qu'on peut déterminer la tension exercée sur

un fil. De plus, ce n'est pas une mince affaire que de manœuvrer un faisceau du poids de cinquante tonnes (50,000 kilog.), qui exigera un effort de quarante tonnes (40,000 kilog.), pour le hisser sur les tours afin de l'y installer. Toutes ces considérations, jusqu'ici, sont donc décidément en faveur du troisième système. Cependant il a un grand désavantage, c'est la perte de temps qu'il occasionne en imposant de construire définitivement les tours et les ancrages, avant de commencer la formation du câble. Cela n'est pas le cas alors que l'on emploie l'une des deux premières méthodes; les cordes de fils ou les faisceaux de fils parallèles et droits peuvent être fabriqués pendant que les travaux de maçonnerie progressent, et mis en place immédiatement après l'achèvement de ces travaux. Les avantages qu'on trouve néanmoins à fabriquer les câbles sur l'emplacement du pont même, sont, comme on l'a vu, si incontestables, qu'on ne pouvait hésiter un moment à adopter cette méthode pour le pont d'East River.

Il est à peine nécessaire de mentionner ici l'impossibilité de transporter le câble entier et terminé à la place qu'il doit occuper, bien que des personnes étrangères à l'art des ingénieurs semblent croire à cette possibilité. Sans parler de l'impraticabilité de sa fabrication, la seule considération de sa longueur 3,577 pieds (1,090^m450), et de son poids, 870 tonnes (88,396 kilog.), montre qu'il y aurait des obstacles insurmontables qui s'opposeraient au transport d'une pareille masse, et qu'aucune tour ne pourrait soutenir l'effort de renversement occasionné par le frottement, lorsqu'on tendrait le câble.

Avant d'entrer dans les détails, je débiterai par une description rapide de la façon dont les câbles sont faits, en employant les chiffres et les désignations adoptées pour le pont de l'East River. Cela facilitera la compréhension de l'outillage de la fabrication du câble, et servira, lorsqu'il s'agira de tout autre pont suspendu; on n'aura qu'à changer les dimensions et les noms, selon la longueur et l'emplacement.

Le tablier du pont de l'East River, qui a 85 pieds (2^m907) de largeur, et est destiné à porter toutes sortes de véhicules, y compris des wagons de chemins de

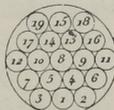


Fig. (14) Composition d'un câble.

Echelle $\frac{1}{24}$.

fer mûs au moyen de cordes sans fin, sera supporté par quatre câbles, suspendus sur trois travées: celle du milieu, ayant 1595,5 pieds (486^m295) entre les centres des tours, et les deux travées latérales chacune 930 pieds (283^m460) du centre des

tours à la face d'ancrage, soit à $954 \frac{1}{2}$ pieds (290^m922) du centre des tours au point d'attache du câble. Chaque câble contient 19 faisceaux, fig. (11), de 332 fils d'acier parallèles, et par conséquent, 6,308 fils, ce qui représente une force totale maxima de 10,730 tonnes. Chaque faisceau est maintenu par une cheville en fer de 7 pouces (0^m178) de diamètre à deux barres de la chaîne d'ancrage de $1 \frac{1}{2} \times 9$ pouces ($0^m036 \times 0^m229$). Les fils n'entourent pas directement les chevilles; ils sont placés autour d'un manchon en fonte, fixés sur elles, fig. (12 et 13), portant la courbe

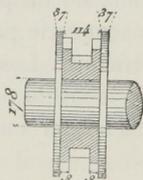


Fig. (12)

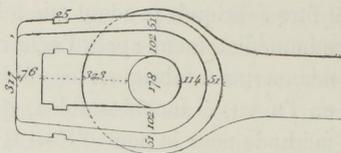


Fig. (13)

Manchon en fonte recevant les faisceaux.

Echelle $\frac{1}{24}$.

de contact des fils à 17 pouces (0^m432) de diamètre, au lieu de 7 pouces (0^m178). Le dernier élément de la double suite de barres à œils ou chaîne d'ancrage, à laquelle les fils sont attachés, est disposé en quatre étages, fig. (14); chacun des trois étages

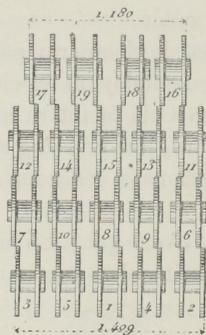


Fig. (14) Vue de face à l'extrémité de l'ancrage d'un câble.

Echelle $\frac{1}{48}$.

du dessous reçoit l'attache de cinq faisceaux, celui du dessus en maintient quatre seulement. Pendant la fabrication, le faisceau n'occupe pas sa position définitive dans le câble, mais il prend une courbe bien plus tendue et plus élevée. Cette différence entre les flèches, dans le cas qui nous occupe, est de 55 pieds (16^m764), au milieu de la portée. Elle est produite par deux causes : premièrement, sur les

tours, le faisceau repose sur des poulies provisoires, placées au-dessus de la selle ; deuxièmement, aux ancrages, le sabot mentionné plus haut est temporairement assujéti à 10 ou 12 pieds (3^m048 ou 3^m657) en arrière de la cheville d'ancrage sur une pièce en fonte, appelée la « jambe, » qui est spécialement affectée à cet effet, fig. (15, 16 et 17).

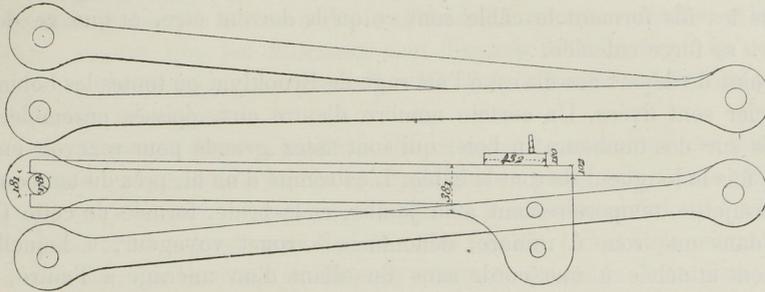


Fig. (15) Elévation à l'extrémité de l'ancrage d'un câble avec la jambe.

Echelle $\frac{1}{48}$.

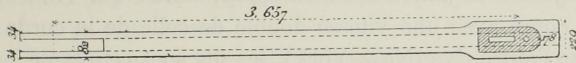


Fig. (16) Plan de la jambe.

Echelle $\frac{1}{48}$.

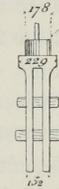


Fig. (17) Vue de face.

Lorsque le faisceau est achevé, les sabots sont détachés des jambes, qui sont enlevées, et mis à leurs places sur les barres à œils d'ancrage. En même temps, le faisceau est soulevé par un appareil spécial. On enlève les poulies provisoires, et le faisceau prend sa place sur la selle des tours. Cette double opération amène le point le plus bas de la courbe du faisceau à descendre dans sa position correcte, déterminée tout d'abord par le calcul.

Il y a plusieurs avantages à fabriquer le faisceau dans une position plus élevée et plus tendue, car, autrement, on serait forcé de tenir compte, pendant cette fabrication, du règlement du câble principal, ce qui augmenterait beaucoup la longueur de l'opération. De plus, le sabot, étant mis à plat, facilite ainsi le placement des fils, et dans cette position, il est bien plus commode d'y envider les fils. Cette opération se fait successivement pour tous les faisceaux.

Mais l'avantage principal tient à ce que la tension dans le fil est presque doublée et atteint environ les trois quarts de la tension maxima, à laquelle il sera toujours soumis, lorsque le pont sera achevé. Cette opération sert, en quelque sorte, d'épreuve de résistance ; elle fait disparaître toute ondulation, et elle conduit à s'apercevoir plus facilement de l'existence d'une épaisseur défectueuse ou de la mauvaise qualité d'un fil ; l'ingénieur acquiert ainsi la certitude à peu près absolue, que tous les fils formant le câble sont ce qu'ils doivent être, et que ce dernier atteindra sa force calculée.

Le point de départ des fils est à l'ancrage de Brooklyn, où toutes les bobines de fils d'acier sont fixées. Un certain nombre d'entre eux, épissés ensemble, sont enroulés sur des tambours en bois, qui sont assez grands pour recevoir environ 12 à 14 fois la longueur de tout le câble. L'extrémité d'un fil, près du tambour, est alors assujettie temporairement à la jambe, et la bride, formée de cette façon, placée dans une roue à rainure, dénommée « rouet voyageur, » laquelle est solidement attachée à une corde sans fin allant d'un ancrage à l'autre. Cette corde est appelée « corde voyageuse » ; elle passe, à chaque ancrage, sur deux poulies horizontales qui reçoivent leur mouvement d'une machine à vapeur. Le rouet, avec les deux brins du fil, est amené d'un ancrage à l'autre par la corde voyageuse. Le fil qui est assujéti à la jambe reste en repos, tandis que l'autre, qui se déroule du tambour, court avec une vitesse double de celle de la corde. A leur arrivée à l'ancrage sur l'autre rive (New-York), les fils sont retirés de la rainure du rouet et placés autour du sabot, de façon que tous les brins dormants occupent un côté, et tous les brins courants l'autre côté. La position des fils est alors régularisée d'après un « guide-fil » qui a d'abord été suspendu et ajusté suivant la flèche calculée. La même opération est répétée 166 fois, jusqu'à ce que tous les fils, formant un faisceau, aient été étendus. La direction des fils est mise d'accord avec celle du « guide-fil, » par des hommes se tenant sur de petites plate-formes appelées « berceaux ; » elles sont supportées par des cordes de fer et réparties sur toute la longueur de la ligne du câble. Il est, par conséquent, nécessaire que ces berceaux soient à une élévation telle que les fils du faisceau pendent à peu près à la hauteur de la poitrine de l'homme qui s'y tient, pour qu'il puisse comparer les flèches relatives des fils, par rapport à celle du « guide-fil. » Pour parvenir aux berceaux sans difficulté et pour obtenir une communication générale entre toutes les parties des travaux, il existe une passerelle légère et étroite au-dessus du fleuve. Les fils d'un faisceau sont liés provisoirement ensemble au moyen d'un fil en métal de 16 pouces en 16 pouces environ (0^m406 en 0^m406), puis le faisceau est abaissé dans sa position définitive. Un second faisceau est fait de la même manière, et ainsi de suite jusqu'au dix-neuvième ; le câble est alors

prêt à recevoir son enveloppe. Les faisceaux occupent dans le câble un certain ordre fixé, et les longueurs sont régularisées entre elles, en raccourcissant celles qui sont trop longues au moyen d'un segment en fer placé entre le sabot et la cheville des barres à œils de l'ancrage. Tous les câbles des grands ponts suspendus, bâtis jusqu'à présent, n'ont jamais contenu plus de sept faisceaux ; ceux de l'East River sont les premiers qui seront formés de dix-neuf faisceaux. Les nombres 7 et 19 sont choisis par la raison que le câble doit former un cylindre, et la coupe, fig. (11), montre que les faisceaux sont disposés de telle façon qu'un cercle tangent peut être tracé autour. Entre 7 et 19, il n'y a pas de nombre qui permette une disposition de ce genre.

Tous les faisceaux étant régularisés, les attaches temporaires, qui tenaient les fils ensemble, sont retirées ; on les contraint alors à prendre la forme cylindrique au moyen de puissantes pinces serrées à vis, et, le câble étant fini, on les recouvre d'un fil de fer n° 10, enroulé sans discontinuité. Les fig. (18 et 19) montrent la position des cordes, des berceaux et du pont volant, en élévation et en plan ; et aussi celle du tambour, chaînes d'ancrage et la corde voyageuse avec son fil pendant son trajet. Le guide-fil ou les faisceaux, dans la première position surélevée, sont seulement indiqués sur le plan, afin de ne pas surcharger le dessin et le rendre confus. Dans l'élévation, ils devraient pendre parallèlement aux cordes de berceaux et un peu au-dessus.

La description générale, faite ci-dessus, montre que, pour fabriquer un câble en fils d'acier, il faut avoir terminé les constructions permanentes et auxiliaires, et disposer des engins et matières premières, nécessaires aux opérations indiquées dans le tableau suivant :

I. — Constructions permanentes

Ancrages et tours supportant les câbles.

II. — Constructions auxiliaires

- 1° Pose des fils, proprement dite : corde voyageuse, machine à vapeur, etc.
- 2° Emplacements pour l'ajustage : berceaux, etc.
- 3° Moyen d'accès à ces berceaux : passerelle, etc.
- 4° Réglage des fils : guide-fils, etc.

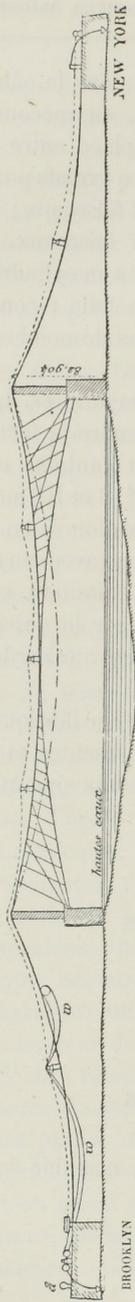


Fig. (18) Elévation.
Echelle $\frac{1}{600}$ pour les hauteurs et les longueurs.

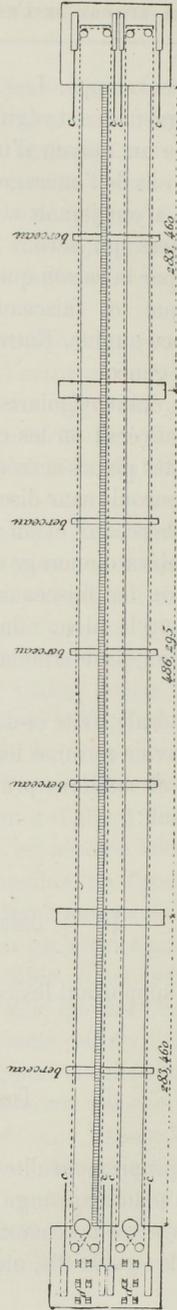


Fig. (19) Plan. — *d* tambours. — *w* fils. — *c* guide-fils.
Echelle $\frac{1}{250}$ pour les largeurs.

III. — Construction des câbles

- 1° Fils d'acier et leur préparation.
- 2° Réglage des fils et des faisceaux : instruments de précision.
- 3° Entourage du câble : fils de fer.

Dans l'étude de détail qui va suivre, nous avons suivi l'ordre indiqué ci-dessus. Tout ce qui est compris dans les chapitres I et II doit exister avant que la fabrication d'un câble puisse commencer. Le travail, au pont d'East-River, fut commencé le 26 décembre 1869 ; c'est à cette époque qu'on attaqua le terrain pour la construction du caisson formant la fondation de la tour de Brooklyn.

En août 1876, après plusieurs interruptions, les tours et ancrages furent achevés, et la première corde (l'une des cordes voyageuses) fut mise en travers de la rivière. Pendant l'hiver 1876-1877, toutes les machines donnant le mouvement aux cordes voyageuses, etc., étaient mises en place à l'ancrage de Brooklyn. La construction des berceaux et de la passerelle, la suspension des guide-fils et les autres préparatifs demandèrent encore neuf mois, jusqu'au 29 mai 1877 ; c'est alors que le premier fil, pour la fabrication du câble actuel, fut tendu. On estime qu'il faudra 2 ans ou 2 ans et demi pour compléter les quatre câbles.

I. — Tours et ancrages

La construction des hautes tours en pierres et des murs massifs d'ancrage, travaux d'une importance sans précédents, a déjà été décrite en détail dans différentes publications et rapports scientifiques. Je puis donc me borner à ne donner ici que quelques-unes des principales dimensions, particulièrement de celles qui se rattachent à la construction du câble.

Les tours, contenant chacune 40,000 yards cubes (30,508 mètres cubes) de maçonnerie, sont construites entièrement en granit venant de vingt carrières différentes du Maine. Leur section, au niveau des hautes eaux, est de 140 pieds (42^m671) sur 59 (17^m983), et, au niveau de la corniche, de 126 pieds sur 43 (38^m404 sur 13^m106). L'extrême sommet est à 272 pieds (82^m904), et les selles sur lesquelles reposent les câbles à 267 pieds 6 $\frac{1}{2}$ pouces (81^m544) au-dessus des hautes eaux. Les selles en fonte fig. (20), pesant chacune 12 tonnes, sont posées sur 43 galets, en fer de 3 $\frac{1}{2}$ pouces (0^m088) de diamètre, se mouvant sur un lit en fonte de 4 $\frac{1}{2}$ pouces (0^m114) d'épaisseur, pesant 11 tonnes. Sur chaque selle, à la partie supérieure, se trouvent six supports en fonte à fourche, servant de coussinets pour les trois galets sur lesquels repose le faisceau pendant sa construction. Le galet central est placé à 6 pouces (0^m152) en dehors de

l'axe de la selle, l'axe de la selle à 7 pouces (0^m178) en dehors de l'axe de la plaque en fonte où posent les galets, et l'axe de cette dernière à 12 pouces (0^m305) en dehors de l'axe de la tour, Tous trois sont dans la direction de la rive.

Nous donnons, fig. (20), une élévation au sommet d'une des tours; on voit les positions relatives des axes de la tour, de la selle et de la plaque de fonte, ainsi que le mode d'attache des haubans.

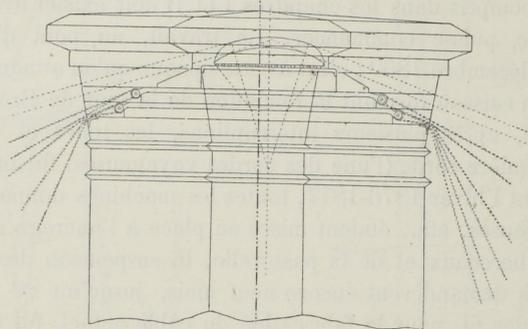


Fig. (20). Sommet d'une tour.

Echelle $\frac{1}{72}$.

Cette précaution a pour but de se mettre en garde contre le mouvement possible de la selle du côté de la rivière, et pour que l'intersection de la résultante des efforts de compression avec la base de la tour, à la fondation, ne soit rejetée plus loin de l'axe, comme cela se produirait naturellement, en raison de la différence d'inclinaison de la partie du câble entre la pile et l'ancrage, et de la partie entre les deux piles. On verra par la suite que ce mouvement n'excède pas deux pouces (0^m051).

Les sections des massifs d'ancrage, bâtis en pierres calcaires avec des arêtes en granit, sont, à la fondation, de 132×119 pieds 4 pouces ($40^m233 \times 36^m373$), au niveau du sol, de 124×111 pieds ($37^m794 \times 33^m832$) et au niveau supérieur, de 117×104 pieds ($35^m661 \times 31^m699$). Sur le front, ces largeurs indiquées ont 10 pieds (3^m048) en moins. Deux arches relient les 3 piles de maçonnerie dans lesquelles les maillons des chaînes d'ancrage sont emprisonnés.

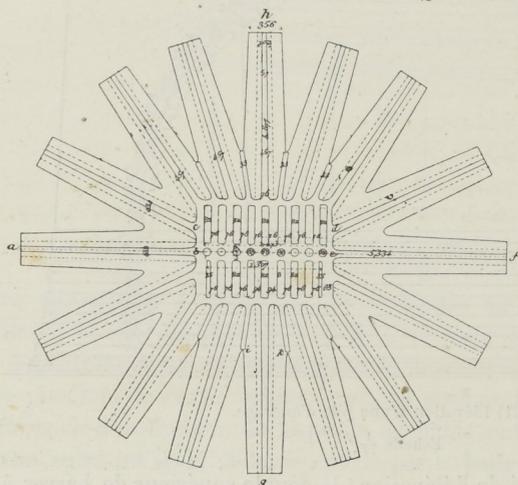
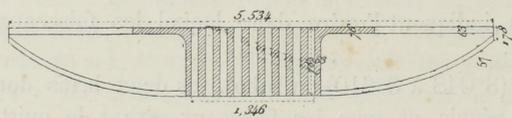
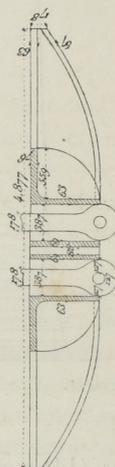
La fig. (21) représente l'élévation d'une pile d'ancrage. La hauteur totale de l'ancrage au-dessus des hautes eaux est, vue de face, de 89 pieds (27^m127), avec une pente de $3 \frac{1}{4}$ pieds p. 0/0 vers le terrain (environ $\frac{1}{30}$).

Les chaînes d'ancrage sont formées de deux rangées superposées de barres à œils.

Dans la projection verticale, ces deux rangées sont composées de dix chaînons, disposés de telle sorte que les deux premiers, partant de la plaque d'ancrage,

est d'un seul morceau, en forme de maillon, dans le vide duquel il faut laisser une longueur suffisante qui permette de régulariser la longueur du faisceau. Les avantages qu'offre le sabot sont variés. Il accroît le diamètre de la courbe que contourne le faisceau, et il le maintient solidement entre ses ailes, empêchant tout glissement. En transportant le faisceau de sa position temporaire à sa position définitive, le sabot est particulièrement d'une grande utilité, puisque tous les efforts de tiraillement, dans cette manœuvre, sont faits sur le sabot, sans toucher au faisceau dont les fils sont ainsi préservés de tout dommage ou déplacement.

PLAQUE D'ANCRAGE.

Echelle $\frac{1}{72}$.Plan.
Fig. (22).Coupe a, b, c, d, e, f.
Fig. (24).Coupe g, h.
Fig. (23).Coupe i, k.
Fig. (25).

Dans sa position première, le sabot repose sur la « jambe », dont nous allons ici donner la description, bien qu'elle ne soit que d'un usage temporaire :

La jambe, employée pour l'ancrage, est une pièce de fonte de 12 à 13 pieds (3^m657 à 3^m692) de longueur. Elle est terminée en avant par une encoche dans laquelle entre la cheville d'ancrage, et en arrière par un talon en fonte sur lequel est le sabot. La fig. (15) montre l'élévation latérale de la jambe dans sa position

sur la barre d'ancrage, et les fig. (16, 17) la représentent, vue en plan et par bout. Afin d'éviter que l'extrémité d'arrière ne s'élève et ne suive l'impulsion du faisceau, une cheville traverse les flancs, à cheval sur la barre à œils.

Un point important, quand on construit la jambe, est de déterminer sa longueur. Le moyen le plus sûr et le meilleur est de l'essayer en opérant d'abord avec le guide-fil, et ensuite avec le faisceau. Le guide-fil est soulevé de la selle dans les galets, et les deux extrémités sont tirées jusqu'à ce qu'il atteigne l'élévation que doivent avoir les faisceaux. Les distances qu'ont parcourues les extrémités, dans cette manœuvre, donnent la longueur des jambes.

Cependant il est souvent désirable d'avoir les jambes toutes fondues avant de faire cet essai qui occasionne toujours une perte de temps. En ce cas, cette mesure doit être déterminée par le calcul.

Par conséquent le problème est le suivant :

Un fil, fixé en $m m$ et supporté en $g g$, prend la forme d'une courbe $m g g m$, dont la flèche est f . On suppose qu'il n'existe pas de frottement aux points g ; donc les trois parties prennent un état d'équilibre stable et la tension dans le fil, des deux côtés d'un point g , est la même. Si les supports g sont élevés à g_1 et les points m mis en mouvement sur une horizontale jusqu'en n , le fil, fig. (26), prendra

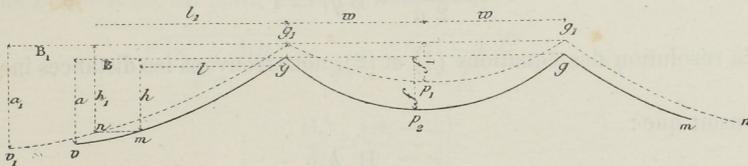


Fig. (26)

la position de la courbe pointillée avec une nouvelle flèche déterminée f_1 . La distance $m n$ est l'inconnue de la question. Il sera d'abord nécessaire de calculer la longueur de tout le fil dans sa première position, ou, comme la courbe est symétrique par rapport à la ligne centrale, la moitié de sa longueur : $m g + g p_2$.

Si le fil, dans sa composition, était absolument homogène, il pendrait en courbe de chaînette. Cela n'étant pas le cas, nous avons le droit de supposer que le poids est également distribué sur la projection horizontale de la courbe, ou, en d'autres termes, qu'elle forme une parabole. Cette supposition est d'autant plus juste que le câble en projet est chargé uniformément et d'un poids assez considérable pour que les différences entre son propre poids, calculé par pied courant, et les projections horizontales, puissent être négligées.

Le point m est un point de la parabole, qui, si elle est prolongée, aura son

sommet en v . Prenant le point v comme origine de coordonnées, et appelant les coordonnées de g : a et B , celles de m : $(a - h)$ et $(B - l)$, nous aurons d'abord comme première condition :

$$\frac{B^2}{a} = \frac{(B - l)^2}{a - h}. \quad (1)$$

L'égalité des tensions sur chaque côté de g donne la seconde condition :

$$\frac{\sqrt{B^2 + 4a^2}}{2a} B q_1 = \frac{\sqrt{w^2 + 4f^2}}{2f} w q.$$

q et q_1 indiquent les poids du fil, par unité de longueur, au milieu de la portée et aux extrémités du fil. La tension actuelle étant sans importance, nous prenons q égal à 1, et q_1 comme conséquence de la courbure plus raide, égal à 1,01.

w = moitié de la portée centrale = 799,65 pieds (243^m613);

f = flèche = 121 pieds (36^m880).

Le second membre de cette dernière équation est égal, par conséquent, à une constante T , et nous pouvons écrire

$$\frac{\sqrt{B^2 + 4a^2}}{2a} B q_1 = T. \quad (2)$$

Par la résolution des équations (1) et (2), nous trouvons les distances inconnues a et B .

Il s'ensuit que :

$$a = \frac{B h}{2 B l - l^2},$$

$$B = \frac{l}{2(l^2 + h^2)} \pm \sqrt{\frac{h^2 T^2}{q_1^2} - \frac{l^2}{4} + \left(\frac{l}{2(l^2 + h^2)}\right)^2}$$

Les valeurs de l , h et T , dans notre cas, sont :

$$l = 952,54 \text{ (290}^m\text{325),}$$

$$h = 188,3 \text{ (57}^m\text{392),}$$

$$T = 2,760,8 \text{ (831}^m\text{470);}$$

ce qui donne :

$$a = 188,48 \text{ (37}^m\text{451),}$$

$$B = 983,3 \text{ (299}^m\text{705).}$$

Avec la position du sommet v , déterminée par a et B , nous pouvons maintenant exprimer la longueur s de la courbe $mg + gp_2$ dans une formule :

$$s = w \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f}{w} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{f}{w} \right)^4 \right\} + B \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{a}{B} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right\} - (B - l) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{a-h}{B-l} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{a-h}{B-l} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

$a - h$ étant très-petit, le dernier membre peut être simplifié et devient $B - l$, sans qu'il y ait une grande erreur. Nous trouvons donc :

$$S = 1,787.74 \text{ pieds (544}^m\text{889)}.$$

Le fil dans la position supérieure forme la courbe ng_1p_1 , dont la longueur est aussi égale à s (négligeant ainsi l'allongement auquel le fil est sujet sous la tension plus grande), d'où

$$w \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f_1}{w} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{f_1}{w} \right)^4 \right\} + B_1 \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{a_1}{B_1} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{a_1}{B_1} \right)^4 \right\} - (B_1 - l_1) = s. \quad (3)$$

Dans cette équation sont les trois valeurs inconnues a_1 , B_1 et l_1 ; il nous faut donc conséquemment, pour résoudre le problème, deux autres équations, et nous les trouverons en exprimant par équations que la tension de deux courbes doit être la même et que n est un point de la parabole v_1g_1 :

$$\frac{\sqrt{B_1^2 + 4a_1^2}}{2a_1} B_1 g_1 = \frac{\sqrt{w^2 + 4f_1^2}}{2f_1} w g = T_1 \quad (4)$$

$$\frac{B_1^2}{a_1} = \frac{(B_1 - l_1)^2}{a_1 - h_1}. \quad (5)$$

(1) Nota. — Cette formule donne approximativement la longueur cherchée. La formule exacte de cette longueur est la suivante

$$s = \frac{p}{2} \left\{ \sqrt{\frac{2f}{p} \left(1 + \frac{2f}{p} \right)} + \text{Log.} \left(\sqrt{\frac{2f}{p}} + \sqrt{1 + \frac{2f}{p}} \right) \right\} + \frac{p_1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{2a}{p_1} \left(1 + \frac{2a}{p_1} \right)} + \text{Log.} \left(\sqrt{\frac{2a}{p_1}} + \sqrt{1 + \frac{2a}{p_1}} \right) \right\} - \frac{p_1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{2(a-h)}{p_1} \left(1 + \frac{2(a-h)}{p_1} \right)} + \text{Log.} \left(\sqrt{\frac{2(a-h)}{p_1}} + \sqrt{1 + \frac{2(a-h)}{p_1}} \right) \right\}$$

dans laquelle

$$p = \frac{w^2}{af} p_1 = \frac{B^2}{2a} = \frac{(B-l)^2}{2(a-h)}.$$

Pour des courbes planes, ces deux formules sont presque identiques; en tout cas, dans les circonstances qui nous occupent, l'erreur commise est plus petite que $\frac{2}{1000}$ de pied.

Dans les trois dernières équations :

$$f_1 = 66 \text{ pieds } (20^m116),$$

$$h_1 = h + g g_1 = 190,42 \text{ } (58^m039),$$

$$T_1 = 4,909.8 \text{ } (1,493^m336),$$

w_1 , q et g_1 ont les valeurs précédentes ;

si nous les introduisons, il suit que :

$$B_1 = 1,406.05 \text{ } (428^m554),$$

$$a_1 = 210.07 \text{ } (140^m091),$$

$$l_1 = 964.65 \text{ } (294^m010),$$

$$\text{d'où } m n = l_1 - l = 964.65 - 952.55 = 12.1 \text{ pieds} \\ (294^m010 - 290^m325 = 3^m695),$$

représentant la longueur de la jambe. En raison d'une traction un peu plus grande sur les cordes de berceau qu'elle n'avait été prévue, la flèche de 66 pieds (20^m116), citée plus haut, a été légèrement accrue, afin de suspendre le faisceau plus convenablement pour l'homme chargé de le régler.

Cela a nécessité une longueur un peu moins considérable de la jambe que celle qui avait été calculée et qui, en dernier ressort, a été fixée à 11 pieds 10 $\frac{3}{4}$ pouces (3^m625).

II. — Constructions auxiliaires

I. La corde voyageuse. — La « corde voyageuse » consiste en une corde de fils d'acier de $\frac{3}{4}$ de pouce (0^m018) qui forme une corde sans fin passant sur certaines roues et poulies placées à chaque ancrage.

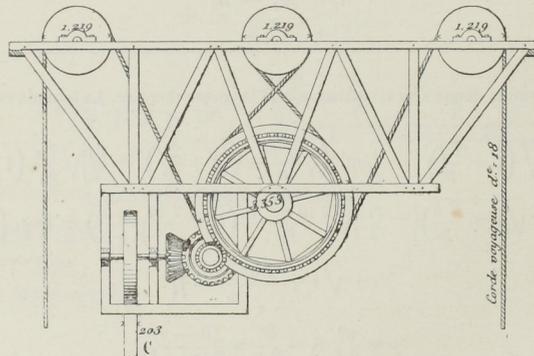


Fig. (27) Commande de la corde voyageuse.

Echelle $\frac{1}{120}$.

La fig. (27) montre sa disposition sur la rive de Brooklyn. La corde s'enroule d'abord deux fois autour d'une double poulie à gorge de 11 pieds (3^m353) de diamètre, appelée « poulie conductrice », puis autour de deux plus petites, dénommées « poulies-guides », destinées à maintenir les brins de la corde à la distance requise l'un de l'autre. Deux poulies semblables agissent de la même façon sur la rive du côté de New-York; elles sont placées dans un cadre mobile, qui permet de régler la tension de la corde. La poulie conductrice a sur sa circonférence un engrenage conduit par un pignon de 15 pouces (0^m381) de diamètre. Sur l'arbre de ce pignon est calée une roue d'angle, engrenant avec deux autres roues coniques, rendues alternativement folles ou fixes par l'intermédiaire d'un levier. Le mouvement de la roue conductrice et de la corde voyageuse peut ainsi être renversé. Une poulie de 3 pieds (0^m914), clavetée sur l'arbre de ces roues d'angle, reçoit son mouvement, au moyen d'un courroie de 8 pouces (0^m203), d'un autre arbre horizontal qui court le long de la face de l'ancrage, et qui est mis en communication par une courroie de 16 pouces (0^m406) avec une machine à vapeur placée sur un chantier au-dessous. La courroie de 8 pouces (0^m203) est lâche sur la poulie et est rendue adhérente par des poulies de frein qui permettent de mettre la corde voyageuse en mouvement, ou de l'arrêter sans que la machine soit elle-même arrêtée.

Le cylindre de la machine a 12 pouces (0^m305), avec un piston de 24 pouces (0^m610), qui reçoit une pression de 60 à 75 livres (27 à 34 kilog.) de vapeur, et fait environ 70 courses par minute. Cela correspond à une vitesse de $4\frac{2}{10}$ pieds (1^m280) par seconde pour la corde voyageuse, qui accomplit ainsi son voyage d'un ancrage à l'autre en 14 minutes. La fabrication des quatre câbles se fait simultanément. Dans ce but, il y a deux transmissions, correspondant chacune à deux câbles et commandant deux rouets voyageurs. La puissance est donnée par le même moteur à vapeur. Pendant son voyage d'un ancrage à l'autre, la corde voyageuse est guidée sur les tours et sur chaque berceau par des galets convenablement placés. Le « rouet voyageur » est attaché à la corde voyageuse.

Ce « rouet voyageur » est une roue légère en bois de 5 pieds (1^m524) de diamètre, avec une rainure de zinc dans laquelle entre le fil pendant la traversée; le rouet est attaché à la corde voyageuse par une petite pièce en fer recourbée en col de cygne, qui permet le passage libre de la corde sur tous les galets des supports. Une tringle de fer terminée par une masse pesante, fixée au moyen du rouet, le maintient dans sa position verticale et empêche qu'elle soit renversée par le vent. Chaque corde voyageuse porte deux rouets voyageurs, placés de façon à ce que, l'un étant à la rive d'ancrage de New-York, l'autre soit à celle de Brooklyn. Quand, par exemple, le rouet de gauche porte un fil de Brooklyn à New-York,

de précaution contre le déplacement des fils par le vent. Enfin, ils servent à répartir de chaque côté d'une barre fixe les brins courants et les brins dormants qui doivent former le câble, en tâchant de les disposer en deux demi-cylindres.

Il y a en tout cinq doubles berceaux, trois sur la travée du milieu, et un sur chaque travée latérale. Par la raison que les câbles sur les travées latérales ne pendent pas parallèlement à l'axe du pont, mais se rapprochent de l'ancrage vers la tour, les berceaux simples ont différentes longueurs, ceux de la travée principale ayant 7 pieds (2^m134) de plus que ceux des travées latérales. Les fig. (31, 32, 33) montrent l'un de ces derniers.

Ils sont tout en chêne et consolidés par de légères tringles de fer. La plus grande partie de la plate-forme consiste en un grillage en fer, laissant libre passage au vent, auquel ils sont dangereusement exposés dans le sens vertical.

Les câbles qui supportent les berceaux consistent en cordes d'acier de $2\frac{3}{8}$ pouces (0^m060), d'une force maxima de 180 tonnes chaque. Une des cordes appartient en même temps à la suspension de la passerelle, et a $2\frac{3}{8}$ pouces (0^m066) de diamètre, et peut porter 240 tonnes. Le poids sur chaque corde de berceau est le suivant :

Son propre poids (9 livres par pied)	14,580 livres (19 kilog. par mètre courant)	6,613 ⁹¹
Moitié du poids de 3 berceaux simples	6,000	—
Corde voyageuse	600	—
Six ouvriers, environ	960	—
	22,140	10,043 ¹²

La flèche est de $73'3''$ (22^m326), et la plus grande tension dans la corde, est : $22,140 \frac{\sqrt{800^2 \times 4 \times 73.25^2}}{4.73.25} = 61,000$ livres = $30\frac{1}{2}$ tonnes (27,669 kilog.

près de 30 tonnes), ce qui donne un coefficient de sécurité de 5.8.

Sur le sommet des tours, les cordes de berceau reposent sur des blocs en bois et, à chaque ancrage, elles sont attachées à des barres d'ancre au moyen de pièces en fer forgé et d'étriers, comme on le voit dans les fig. (34, 35 et 36).

III. La passerelle. — La passerelle n'a pas une utilité directe dans la fabrication proprement dite du câble, mais ses services sont tels que, pour la construction de grands câbles, son érection est d'une absolue nécessité. Toutes les passerelles employées par l'ingénieur Roebling père, étaient construites sur le modèle des ponts suspendus ; elles consistaient en une plate-forme suspendue à deux câbles. C'est à l'auteur de la brochure que nous traduisons ici, qu'est due l'idée de placer la plate-forme directement sur les câbles ; il fut guidé par cette considération

$1\frac{3}{4}$ pouce (0^m043) et $1\frac{1}{4}$ pouce (0^m031) de diamètre, la corde la plus lourde étant du côté qui supporte aussi les berceaux. Les liaisons de ces cordes avec le plancher sont indiquées, fig. (38).

Les fig. (34, 35, 36) montrent l'ancrage des cordes de la passerelle.

La pièce qui reçoit l'extrémité de la corde est faite du fer forgé le plus dur, contrairement à l'usage adopté qui est de la faire en fonte. Cette précaution a été prise pour éviter tout danger de rupture, ce qui, dans un cas comme celui qui nous occupe, serait suivi des plus grands malheurs.

Pour défendre la passerelle contre les ouragans, on a construit avec des cordes de $1\frac{1}{4}$ pouce (0^m031) des paraboles dont les branches sont en sens inverse de celles des câbles, et qui s'attachent aux tours. Des tirants inclinés parallèles joignent ces cordes paraboliques aux câbles, fig. (18). A ces « cordes d'ouragan » sont joints un certain nombre « de haubans d'ouragan » qui, de la tour, s'étendent jusqu'aux premiers berceaux. Sur les travées latérales, les « tirants d'ouragan » sont ancrés dans le sol. Ce système de contreventement a donné les meilleurs résultats, car, même après de violentes tempêtes, le mouvement de la passerelle s'est résumé en un déplacement latéral insignifiant.

Le poids maximum agissant sur un câble de la passerelle est de 62123 livres (28,178 kilogrammes), créant une tension d'environ 86 tonnes à laquelle résistent les forces réunies des cordes de $2\frac{5}{8}$ pouces (0^m066) et $1\frac{3}{4}$ pouce (0^m043) qui pourraient supporter 318 tonnes ; d'où un coefficient de sécurité de 3.7.

Toutes les cordes pour la passerelle, les berceaux, etc., ont été fabriquées dans la manufacture des ingénieurs « Les fils de John A. Roebling, à Trenton, New-Jersey. »

Les cordes de la passerelle furent d'abord suspendues avec une flèche de 64.4 pieds (19^m608) qui s'accrut à 74.2 pieds (22^m606), quand le poids y fut attaché à un pied (0^m308) de plus que les prévisions : cet accroissement de flèche correspond à un allongement de 2.26 (0^m689) dans toutes les cordes ou à $\frac{1}{11500}$ de la longueur, par pouce carré (525 millim. carrés) de section et par tonne de tension.

L'érection de toutes ces constructions a été une tâche aussi difficile que périlleuse, si l'on pense que le point le moins élevé est à 200 pieds (60^m960) du niveau de l'eau, et que 100 barques ou bateaux de tous genres traversent, par heure, l'emplacement du pont.

La première corde transportée d'une rive à l'autre fut une des voyageuses. Mise en pelotte sur un dévidoir, on la plaça sur un bac au pied de la tour de Brooklyn. Un des bouts fut hissé au haut de la tour et porté de là à l'ancrage de Brooklyn, où il fut attaché provisoirement au milieu de la longueur de la corde. Le bac fut ensuite conduit vers l'autre tour en laissant tomber la corde au fond de la

rivière ; le reste de la corde fut alors dévidé et l'extrémité, après avoir été hissée sur la tour, fut fixée à un tambour mù par une machine à vapeur. L'observation montra que, presque chaque jour, une coïncidence fortuite de circonstances tenait pendant 6 à 7 minutes la ligne au-dessous du pont débarrassée de vaisseaux. On profita d'un de ces intervalles et, dans l'après midi du 14 août 1876, un coup de canon donna le signal pour couper l'amarre provisoire sur le chantier de Brooklyn et mettre la machine en mouvement. Quatre minutes après, la corde vint au-dessus de l'eau, et en six minutes elle fut suspendue au-dessus des plus hauts mâts, laissant le passage libre ; elle formait le premier lien entre les cités de New-York et de Brooklyn. Si simple qu'elle fût, cette opération amena la plus grande animation et le plus grand intérêt parmi la population ; des milliers de spectateurs s'étaient portés sur les rives.

Il sembla qu'à ce moment tous les doutes sur la possibilité d'érection et la stabilité postérieure du pont s'évanouirent comme une fumée, et que l'établissement du pont d'East River fut considéré comme un fait accompli.

L'autre moitié de la corde voyageuse fut posée de la même façon et les deux extrémités, transportées à l'ancrage de New-York, y furent épissées, constituant ainsi la corde sans fin.

Pour étendre la seconde corde voyageuse, on se servit de celle déjà en position. La nouvelle corde lui fut attachée et tirée par la machine à vapeur : on coupa ensuite ces attaches, ce qui fut fait par des ouvriers suspendus à la première corde voyageuse dans une cage consistant, fig. (40), en une plate-forme de 4 pieds

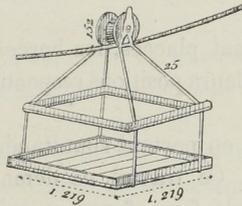


Fig. (40)

carrés ($37^{\text{mm}}16$), suspendue par quatre tringles de fer à une poulie de 6 pouces ($0^{\text{m}}152$) courant sur la corde.

Une corde auxiliaire, appelée porteuse, de $1\frac{3}{4}$ pouce ($0^{\text{m}}043$) de diamètre, fut ensuite mise en place ; elle avait pour objet de porter le poids des cordes de la passerelle et des berceaux, qui était trop lourd pour être porté par la voyageuse. Cette porteuse fut élevée hors de l'eau d'après la première méthode. Les cordes de la passerelle et des berceaux furent mises en place ainsi qu'il suit : chaque corde

était atterrie à la tour de Brooklyn, ses extrémités soulevées, passées autour d'une poulie attachée à la voyageuse, et liées à une corde de chanvre fixée au tambour d'une machine à vapeur placée à l'ancrage de New-York.

Tous les 50 à 60 pieds (15 à 18 mètres), fig. (41 et 42) une suspension suppor-

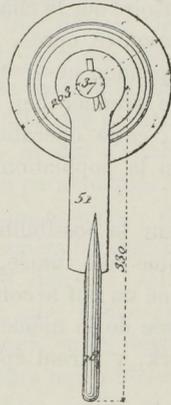


Fig. (41)

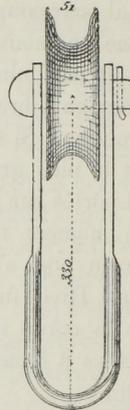


Fig. (42)

Echelle $\frac{1}{8}$

taît la corde ; elle consistait en une agrafe à fourche sur laquelle reposait la corde. Cette agrafe était attachée à une poulie qui courait sur la corde porteuse. Ces suspensions furent ensuite enlevées, laissant la corde suspendue simplement à la porteuse.

Quand toutes les cordes furent placées, les berceaux furent élevés sur les tours et on les laissa glisser jusqu'à leurs positions respectives, où ils furent assujettis au moyen de ligatures solides.

La pose du plancher se fit en partant simultanément des deux ancrages et du centre de la travée principale. Ce travail ne demanda que peu de jours. Deux cordes légères, servant de garde-fous, furent ensuite placées et complétèrent la passerelle qui depuis a été traversée par des milliers de personnes.

IV. Le guide-fil. — Le guide-fil sert comme guide, ainsi que son nom l'indique, aux fils d'un faisceau qui lui est parallèle ; ces fils, suspendus au guide, sont successivement ajustés dans le faisceau. C'est là un travail de quelques minutes, tandis que la pose du guide-fil exige des jours et quelquefois même des semaines : il est vrai qu'une fois ajusté, il guide tous les fils d'un même câble. Au commencement de chaque nouveau faisceau, il est plus long d'un pouce ou deux, par mesure de précaution, afin d'assurer une longueur suffisante, car il n'y a pas de remède

pour un faisceau trop court, tandis qu'il serait toujours facile de le raccourcir, s'il était trop long.

Le câble, qui d'abord pend parallèlement au guide-fil, occupe, quand le pont est terminé, une position beaucoup plus basse, motivée par le poids de la superstructure, etc. Cette dernière position doit être déterminée à l'avance, et, dans le cas d'East River, on s'est basé sur les considérations suivantes :

Les règlements administratifs exigent que le point le plus bas du pont, au milieu de la portée, ne soit en aucun cas à moins de 135 pieds (41^m147) au-dessus du niveau moyen des hautes eaux. Il est obligatoire de calculer et de déterminer exactement à l'avance la position du point de courbure maximum du câble, car une surélévation du câble n'accroîtrait pas seulement sa tension, mais aussi la pente du plancher qui s'élève déjà de $3\frac{1}{4}$ pieds (0^m996) pour 100.

Cette difficulté pourrait être surmontée en allongeant les suspensions, mais cela encore priverait le pont de l'avantage obtenu par les suspensions courtes, à savoir, une connexion rigide entre le câble et le plancher dans le centre de la travée, ce qui prévient les oscillations.

La flèche dans le pont achevé sera de 124,74 pieds (38^m019) au-dessous des plaques de selles, ou 127,64 pieds (38^m904) au-dessous du point d'intersection des deux tangentes, communes au câble et à la selle de chaque côté de la tour. Examinons maintenant les influences qui, agissant sur le câble, tendent à modifier son élévation au-dessus des hautes eaux. Elles sont variées :

1° Le poids de la superstructure produit un allongement des fils et, de là, un abaissement de la courbe dans toute sa longueur, et tend ainsi à augmenter la flèche.

2° Les haubans aident le câble, dans le voisinage des tours, à supporter une partie de sa charge, en produisant un soulèvement à ces endroits et une dépression de la partie centrale.

3° L'inclinaison sur la verticale, du côté de la travée centrale, de la résultante de compression, cause un mouvement de selles dans la même direction, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi entre les tensions horizontales des câbles du côté du milieu et du côté de la rive. Ce déplacement produira un abaissement nouveau du câble dans la travée centrale, et un soulèvement dans les travées latérales.

4° Les câbles sont fabriqués dans un plan vertical, mais ensuite ils sont amenés, tirés dans une position inclinée qui motive un nouveau relèvement du sommet de la courbe centrale.

5° Les changements de température tendent alternativement à faire élever ou descendre le câble.

I. A l'égard du premier point : *l'allongement des fils*. — On a fait des expé-

riences nombreuses concernant l'allongement sous un certain poids. Le module d'élasticité était en moyenne 29,000,000, ce qui correspond à un allongement de $\frac{1}{14500}$ de sa longueur par tonne d'effort réel, et par pouce carré (6^{cm^2} 541) de section.

2. *Effets des haubans.* — La méthode usuelle pour calculer la force des haubans consiste à supposer un certain poids également distribué sur chacun d'eux, et en calculant chacun selon la part proportionnelle du poids qu'il supporte, et l'angle que la verticale forme avec le hauban. Cette hypothèse repose sur une supposition incertaine de la proportion du poids que les haubans supportent réellement, et, en conséquence de cette incertitude, quelques ingénieurs ont condamné absolument leur emploi. Ils négligent cependant de prendre en considération que l'objet principal des haubans ne réside pas dans leur puissance comme supports, mais dans la rigidité qu'ils donnent au plancher. Si ce n'est par ce moyen, cette même rigidité ne peut être obtenue qu'au moyen de poutres lourdes et élevées, qui, bien que produisant un bon résultat, sont bien plus coûteuses, et de plus, ajoutent un bien plus grand poids et plus de prix aux câbles. Par conséquent, les haubans pour les grands ponts sont une économie.

La recherche suivante montrera quelle influence les haubans, chargés d'un certain poids, ont sur la forme du câble. Donc, en obligeant le câble à prendre la forme calculée, on forcera réciproquement les haubans à supporter un poids déterminé, c'est-à-dire que, de la forme du câble, on pourra déduire inversement la tension de chaque hauban. Par conséquent, la première objection contre l'application des haubans devient futile. Mais il y en a une seconde plus sérieuse, à savoir : que, sous l'influence de températures différentes, ils ne travaillent pas à l'unisson avec le câble. Cette objection est justifiée en grande partie, et différents avis ont été proposés pour surmonter la difficulté. E. W. Serrell propose de placer un levier faisant corps avec les selles des tours sur lesquelles posent les câbles, et d'attacher les haubans à une série de pivots placés sur ce levier, disposé de façon que ses mouvements compensent les différentes contractions ou dilatations des chaînes et haubans.

Charles Bender propose de faire d'une seule pièce la tige de suspension et le hauban, qui passerait dans ce cas sous un rouleau sous la poutre du plancher. Sans nul doute cette disposition est bonne, mais on pourrait peut-être y apporter une modification avantageuse, si, au lieu de faire la suspension et le hauban continus, on les attachait séparément à un levier, tournant sur un pivot, dont les bras seraient calculés de manière à transmettre au hauban et à la tige de suspension les proportions d'efforts convenables.

Les travées du pont de l'East River sont pourvues de joints, permettant la dila-

tation à l'extrémité des systèmes de haubans, et le mouvement résultant de ses effets dans les poutres de plancher compense les allongements et les contractions dans les haubans et dans le câble. Ceci est, cependant, dans le cas présent, plutôt le résultat d'un heureux concours de circonstances qu'une prévision inhérente au projet. Dans tous les cas semblables, il est donc préférable d'examiner le mouvement de certains points d'attache des suspensions, haubans et poutres de plancher sous différentes températures. Ces points étant communs aux trois parties, leurs positions définitives doivent résulter du mouvement de chaque partie séparée ; sinon, l'équilibre antérieur des forces est troublé, et l'une des parties est trop chargée ou ne travaille pas.

III. Mouvement des selles. — Ce fait se produit théoriquement quand la tension horizontale du câble sur l'un des côtés de la tour excède celle qui se produit sur l'autre côté. Mais le frottement des galets entrave ce mouvement, et réduit considérablement le déplacement de la selle. Toutes les formules du frottement sur les galets, telles qu'elles sont données dans les livres, sont basées sur la supposition qu'il s'opère en proportion directe du rayon des galets et de la compression. Mais elles ne concordent pas avec les expériences actuelles sur lesquelles seules on peut se reposer à peu près. En général, les connaissances sur le frottement des galets sont limitées et, par conséquent, les calculs concernant ce frottement sont plus ou moins sujets à erreur.

W. Nordling, dans son mémoire sur les piles en charpente métallique des grands viaducs, dit qu'en expérimentant sur des galets de dix centimètres de diamètre, il trouva que le frottement correspondant à une compression de 1000 kilog. était de $3\frac{1}{2}$ kilog. Le résultat de quelques expériences faites par l'auteur était de 4.6 livres (2^k086) pour 1000 livres (454 kilog.) sur des galets de 2 pouces (0^m051), et de 5 livres (2^k500 environ) sur des galets de 1 pouce (0^m025). Des expériences très-complètes et très-importantes ont été faites par Shaler Smith sur le frottement dans les ponts tournants. (Voir Transactions of the American Society of Civil Engineers, August. 1874.) Il les fit sur onze ponts tournants différents et, sur chacun, il les répéta de 25 à 70 fois et trouva, comme moyenne, sur six ponts avec galets de 2 pieds 8 pouces (0^m831) de diamètre, que le frottement était de 6.7 livres (2^k993) pour 1000 livres (454 kilog.) de compression, et de 7.5 livres (3^k401), en moyenne, sur cinq ponts avec des galets de 1 pied 6 pouces (0^m457) de diamètre. Les galets, sous les selles du pont d'East River, ont $3\frac{1}{2}$ pouces (0^m088) de diamètre ; le poids sur chaque selle est d'environ 1250 tonnes. Comparant ce cas avec les expériences de Shaler Smith, et supposant que le frottement s'accroît en raison inverse des diamètres des galets dans la proportion qu'il a

trouvée, le frottement sera de $9\frac{1}{2}$ (4^h309) à 10 livres (4^h536) pour 1000 livres (454 kilog.)

IV. Inclinaison des câbles. — Les câbles étant déplacés de la position d'un plan vertical, dans le sens du pont, à celle d'un plan incliné, oblique au pont, ce changement produira un facteur négatif dans les causes de dépression.

En d'autres termes, cela élèvera le sommet des câbles extérieurs de 0.455 pieds (0^m138) et celui des câbles intérieurs de 0.163 pieds (0^m049). D'où il suit que les câbles peuvent être abaissés de cette quantité et la flèche de 127.64 pieds (38^m904), indiquée plus haut, pourra être élevée à 128.095 pieds (39^m042).

V. Changements de température. — Une différence de trois degrés Fahrenheit occasionne une chute ou une élévation de 1 pouce (0^m025) au point le plus bas d'un câble de la portée centrale. Dans le calcul qui suit, on ne tiendra pas compte des changements produits par la chaleur ou le froid ; il suffit de se baser sur une certaine température fixe maxima, et nous supposons que la flèche donnée se produira à quatre-vingt-dix degrés Fahrenheit. Dans la construction, le guide-fil peut être corrigé selon la température du jour pendant lequel il est réglé.

Cette circonstance, que le mouvement des selles est inconnu d'avance, ou, en d'autres mots, que la longueur des câbles, du côté des ancrages et dans la portée centrale, n'est pas définie, rend impossible la solution exacte du problème. Mais en faisant certaines suppositions, dont l'exactitude devra être ensuite prouvée, nous pouvons procéder de deux manières :

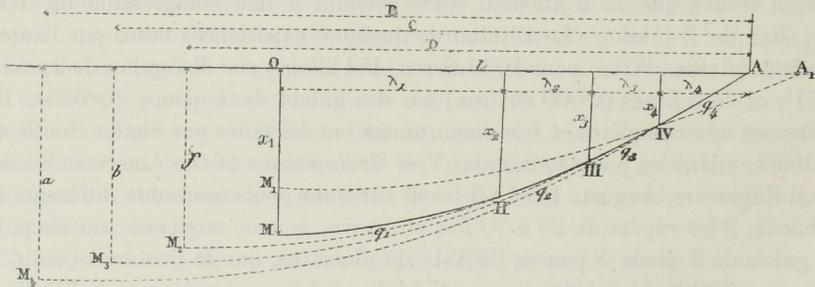


Fig. (43).

1° Supposer connue la position du guide-fil et admettre que, sous les différentes influences, il prendra une flèche de 128,095 pieds (39^m042).

2° Supposer connue la position définitive des selles et leur déplacement, en tenant compte du relèvement du câble qui aurait lieu, si la superstructure était

retirée. La position supposée des selles doit ensuite être vérifiée, ce qui généralement exigera deux ou trois essais et tâtonnements du calcul. Nous procéderons selon la seconde méthode, et considérerons donc le problème suivant.

Soit A M la moitié du câble dans sa position définitive sur la portée $2l$ et sa flèche x_1 , sous une charge uniformément et symétriquement répartie par pied courant; q_1, q_2, q_3 et q_4 étant les poids agissant dans les espaces $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 . Le poids q_1 représente le poids de la superstructure par pied courant; q_2, q_3 et q_4 les mêmes poids moins l'action des haubans, dans les espaces $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. Cette action est plus grande près de la tour, et diminue vers les haubans extrêmes, en raison de leur plus grande longueur et de leur plus petit angle. Pour simplifier, nous supposons seulement trois variations et considérons le poids également distribué entre deux points. Naturellement il change d'un hauban à l'autre, mais la variation est si petite que, pratiquement, elle ne produit pas d'effet et rendrait seulement les formules inutilement plus longues et plus embarrassantes.

Dans cette supposition, chaque partie comprise entre les points I et II, II et III, etc., est un arc d'une parabole qui, si elle est prolongée, aura son sommet en M, M₂, M₃, M₄ et les sommets en M, M₂, M₃ et M₄ correspondent à des portées l, D, C et B et aux flèches x_1, f, b et a . Appelant les ordonnées des points M, I, II, III et IV, par rapport à une ligne horizontale passant par A: x_1, x_2, x_3, x_4 , et la longueur de la courbe A M : S, nous aurons à déterminer les dix parties inconnues suivantes: S, $x_2, x_3, x_4, B, C, D, a, b, f$, et aurons par conséquent besoin de dix équations. Le système entier est un polygone suspendu en équilibre dont tous les côtés sont des segments de paraboles. Expriment la longueur de la courbe entière avec les notations adoptées, nous aurons la première équation; nous en obtiendrons trois de plus en exprimant la condition que les points II, III et IV sont des points de ces paraboles. Les efforts horizontaux dans chaque côté du polygone suspendu sont partout égaux; ce qui nous donne trois autres équations. Enfin nous avons trois conditions, en exprimant que les tangentes aux points II, III et IV sont toutes communes aux deux paraboles. La longueur de la courbe A M est donnée par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 S = B \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{a}{B} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right\} - (B - \lambda_1) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{a - x_1}{B - \lambda_1} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{a - x_1}{B - \lambda_1} \right)^4 \right\} + \\
 + (C - \lambda_1) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{b - x_1}{C - \lambda_1} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{b - x_1}{C - \lambda_1} \right)^4 \right\} \\
 - (C - \lambda_1 - \lambda_3) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{b - x_3}{C - \lambda_1 - \lambda_3} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{b - x_3}{C - \lambda_1 - \lambda_3} \right)^4 \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (D - \lambda_4 - \lambda_3) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f - x_3}{D - \lambda_4 - \lambda_3} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{f - x_3}{D - \lambda_4 - \lambda_3} \right)^4 \right\} \\
& - (D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f - x_2}{D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{f - x_2}{D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2} \right)^4 \right\} \\
& + \lambda_1 \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{x_1 - x_2}{\lambda_1} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{x_1 - x_2}{\lambda_1} \right)^4 \right\}. \tag{1}
\end{aligned}$$

Condition, que les points A et IV sont les points de la même parabole :

$$\frac{B^2}{a} = \frac{(B - \lambda_4)^2}{a - x_4} \tag{2}$$

Les mêmes conditions pour les points III et II :

$$\frac{(C - \lambda_4)^2}{b - x_4} = \frac{(C - \lambda_4 - \lambda_3)^2}{b - x_2} \tag{3}$$

$$\frac{(D - \lambda_4 - \lambda_2)^2}{f - x_3} = \frac{(D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2)^2}{f - x_2} \tag{4}$$

Les égalités des forces horizontales donnent :

$$\frac{q_4 B^2}{2a} = \frac{q_3 (C - \lambda_4)^2}{2(b - x_4)} \tag{5}$$

$$\frac{q_4 B^2}{2a} = \frac{q_2 (D - \lambda_4 - \lambda_3)^2}{2(f - x_3)} \tag{6}$$

$$\frac{q_4 B^2}{2a} = \frac{q_1 \lambda_1^2}{2(x_1 - x_4)} \tag{7}$$

La tangente au point II étant commune aux paraboles M II et II III on aura :

$$\frac{\lambda_1}{x_1 - x_2} = \frac{D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2}{f - x_2} \tag{8}$$

La même condition pour les points III et IV donnera :

$$\frac{D - \lambda_4 - \lambda_3}{f - x_3} = \frac{C - \lambda_4 - \lambda_3}{b - x_3} \tag{9}$$

$$\frac{C - \lambda_4}{b - x_4} = \frac{B - \lambda_4}{a - x_4} \tag{10}$$

La solution de ces dix équations semble d'abord laborieuse, mais peut être simplifiée beaucoup en introduisant les six inconnues auxiliaires suivantes :

$$\left. \begin{aligned} \frac{(B - \lambda_4)^2}{B^2} &= n \\ \frac{q_1 \lambda_1^2}{q_4 B^2} &= m \\ \frac{q_3 (C - \lambda_4)^2}{q_4 B^2} &= p \\ \frac{q_2 (D - \lambda_4 - \lambda_3)^2}{q_4 B^2} &= r \\ \frac{(D - \lambda_3 - \lambda_3 - \lambda_2)^2}{(D - \lambda_4 - \lambda_3)^2} &= s \\ \frac{(C - \lambda_4 - \lambda_3)^2}{(C - \lambda_4)^2} &= t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

De celles-ci, il suit :

$$\left. \begin{aligned} a - x_4 &= n a & x_1 - x_2 &= m a \\ b - x_4 &= p a & f - x_3 &= r a \\ f - x_2 &= r s a & b - x_3 &= t p a \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Substituant les équations (12) dans (1) cette dernière prend la forme :

$$\begin{aligned} & \frac{a^2}{B} - \frac{3 a^4}{5 B^3} - \frac{n^2 a^2}{B - \lambda_4} + \frac{3 n^4 a^4}{5 (B - \lambda_4)^3} + \frac{p^2 a^2}{C - \lambda_4} - \frac{3 p^4 a^4}{5 (C - \lambda_4)^3} - \frac{t^2 p^2 a^2}{(C - \lambda_4 - \lambda_3)^3} + \\ & + \frac{3 r^2 a^2}{5 (D - \lambda_4 - \lambda_3)} - \frac{3 r^4 a^4}{5 (D - \lambda_4 - \lambda_3)^3} - \frac{r^2 s^2 a^2}{(D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{3 r^4 s^4 a^4}{5 (D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2)^3} + \\ & + \frac{m^2 a^2}{\lambda_1} - \frac{3 m^4 a^4}{5 \lambda_1^3} = \frac{3}{2} (S - l) \end{aligned} \quad (1 a)$$

Posant maintenant :

$$\begin{aligned} \frac{3}{5} \left\{ - \frac{1}{B^3} + \frac{n^4}{(B - \lambda_4)^3} - \frac{p^4}{(C - \lambda_4)^3} - \frac{t^4 p^4}{(C - \lambda_4 - \lambda_3)^3} - \frac{r^4}{(D - \lambda_4 - \lambda_3)^3} + \right. \\ \left. + \frac{r^4 s^4}{(D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2)^3} - \frac{m^4}{\lambda_1^3} \right\} = v \end{aligned} \quad (13)$$

et :

$$\left\{ \frac{I}{B} - \frac{n^2}{B - \lambda_4} + \frac{p^2}{C - \lambda_4} - \frac{t^2 p^2}{(C - \lambda_4 - \lambda_3)} + \frac{r^2}{(D - \lambda_4 - \lambda_3)} - \frac{r^2 s^2}{(D - \lambda_4 - \lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{m^2}{\lambda_1} \right\} = u \quad (14)$$

et, substituant ces valeurs dans (1a), nous arrivons à :

$$a^4 + a^2 \frac{u}{v} = \frac{3}{2} (S - l), \text{ ou}$$

$$a = \sqrt{-\frac{u}{2v} + \sqrt{\frac{3}{2v} (S - l) + \left(\frac{u}{2v}\right)^2}} \quad (15)$$

En combinant les équations (2 et 3) avec l'équation (10), on obtient :

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{q_1}{q_2} \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 \\ C &= \frac{q_1}{q_3} \lambda_1 + \frac{q_2}{q_3} \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 \\ B &= \frac{q_1}{q_4} \lambda_1 + \frac{q_2}{q_4} \lambda_2 + \frac{q_3}{q_4} \lambda_3 + \lambda_4 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Si ces valeurs de D, C et B sont substituées dans les équations (11), nous trouvons n , m , p , v , s , et t , et conséquemment nous avons dans (12), six équations du premier degré pour déterminer les six dernières inconnues. Celles-ci sont : b , f , x_2 , x_3 , x_4 , et a ou x_1 , selon la supposition préliminaire sur laquelle le calcul est basé. Si la flèche du guide-fil était donnée, on aurait la longueur S en tirant a de l'équation (15); enfin (16) donnerait x_1 inconnue. Si, d'un autre côté, x_1 est connu au commencement, nous tirerons a de l'équation (16), et S en substituant sa valeur dans (1a).

Les valeurs numériques dans le cas présent, sont : $l = 799.55$ (243^m698); $\lambda_1 = 399.77$ (121^m847); $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 133.26$ (40^m617); $q_1 = 1212$ livres (549^k757); $q_2 = 1024$ livres (464^k474); $q_3 = 762$ livres (345^k638); $q_4 = 180$ livres (81^k647); $x_1 = 128.095$ (39^k042).

La portée $2l$ est égale à la distance entre les centres des tours, plus les distances entre celles-ci et les points d'intersection des tangentes.

Par le calcul trigonométrique, la première a été trouvée être de 1595.5 pieds (486^m296), et deux mesures expérimentales, faites avec soin, en travers la passerelle,

par deux méthodes différentes, donnèrent pour la même distance 1595.3 (486^m236) et 1595.4 pieds (486^m265), ce qui prouve l'exactitude de chaque résultat. Dans ce calcul le nombre 1595.4 (486^m265) était pris comme la valeur moyenne. Le poids total à supporter par les haubans sera de 222,500 livres (100.920 kilog.) divisées de façon que, la première partie entre les points A et IV supporte 137,500 livres (62.369 kilog.), la seconde 60.000 livres (27.216 kilog.) et la troisième 25.000 livres (11.340 kilog.) Ces poids, déduits du poids total et réduits au pied courant, donnent les valeurs ci-dessus pour q_1, q_2, q_3, q_4 .

En substituant ces valeurs dans l'équation (1), nous trouvons :

$$S = 812467 \text{ (427}^m\text{631)}.$$

Maintenant supposons tout le poids retiré, quand la selle ira de A à A₁, le point M s'élèvera à M₁, et la courbe pointillée A₁ M₁, sera la position du guide-fil. Afin de trouver sa flèche h_1 nous devons connaître la longueur de A₁ M₁. Elle est égale à A M moins la contraction produite en retirant tout le poids du câble et conséquemment toute tension.

Au point A la tension est un maximum, exprimé par :

$$q_1 \frac{B}{2a} \sqrt{B^2 + 4a^2} = 2892000 \text{ livres (1.311.798 kilog.)}$$

et en M au minimum

$$\frac{q_1 \lambda_1^2}{2(x_1 - x_2)} = 2794080 \text{ livres (1.267.366 kilog.)}$$

La moyenne entre ces deux tensions et la tension aux points I, II, et IV, est :

$$2.849.451 \text{ livres} = 1.424,72 \text{ tonnes}$$

Si q_1 était uniformément distribué sur tout le câble, c'est-à-dire, s'il n'y avait pas de haubans l'aidant à supporter la charge, la flèche x_1 serait de 125 pieds (38^m099) et la tension maximum en A serait de 3,237,858 livres (1,468,663 kilog.)

Ce chiffre comparé avec la plus grande tension ci-dessus, révèle ce fait curieux que, tandis que les haubans supportent $\frac{2}{9}$ de la charge totale, la tension dans le câble ne décroît que de $\frac{2}{17}$.

Appelant L la longueur du câble A₁ M₁, w sa section en pouces carrés, T la tension moyenne, en tonnes, du câble A M, nous trouvons L par la formule :

$$L + \frac{L T}{14500 - w} = 812.467 \text{ (247}^m\text{631)}$$

T = 1424.72 tonnes ; $w = 133.928$ pouces carrés (864 centimètres carrés) d'où
L = 811.871 (247^m449).

Si A_1O , la portée du guide-fil, est appelé l_1 , nous trouvons finalement sa flèche h_1 , par la relation :

$$l_1 \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{l_1}{h_1} \right)^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{l_1}{h_1} \right)^4 \right\} = L$$

$$h_1 = \sqrt[5]{\frac{5}{6} l_1^2 \pm \sqrt{\frac{5}{2} l_1^4 \left(1 - \frac{L}{l_1} \right) + \left(\frac{5}{6} l_1^2 \right)^2}}$$

Nous avons supposé la distance AA_1 égale à 0.1 pied, d'où

$$l_1 = 799.55 + 0.1 = 799.65 \text{ (243}^m\text{728)} \text{ et } h_1 = 121.926 \text{ (37}^m\text{173)}$$

qui détermine la flèche du guide-fil dans le cas où la valeur donnée à AA_1 est exacte, ce qui arrive quand, tout en tenant compte du frottement des galets, les tensions horizontales des câbles de la rivière et des rives sont égales. Pour déterminer la dernière, un calcul semblable à celui pour le câble du milieu, doit être fait mais il suffira de considérer la charge supportée par les haubans comme également distribuée. Bien que cette supposition doive apporter une différence sensible dans la forme de la courbe, elle changera si peu le total de la tension horizontale que cela n'aura aucune importance comme valeur pratique, tandis que, d'un autre côté, cela simplifiera beaucoup les formules. A cause de l'incertitude dans la valeur exacte du frottement de roulement, il n'est pas absolument nécessaire d'être très-exact dans ce calcul.

Dans le diagramme, fig. (44), la courbe ARM indique le câble de rive placé de façon à équilibrer le câble du milieu avant d'être chargé. Si maintenant les poids q_1 et q_2 sont suspendus, A ira en A_1 et la courbe prendra la position A_1PM , M restant sur la même horizontale.

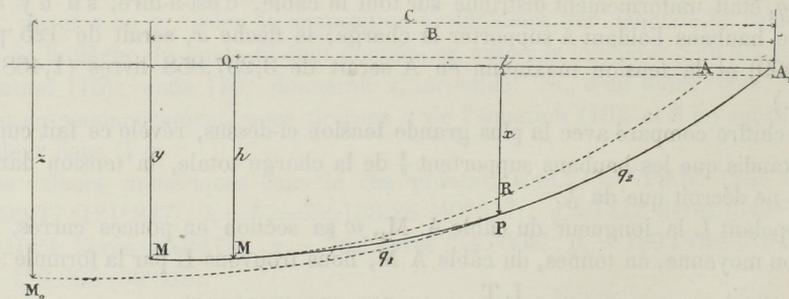


Fig. (44).

Notre tâche est de trouver une relation entre les abscisses et les ordonnées de la nouvelle courbe, ce qui nous permettra de déterminer la tension horizontale. La

tension moyenne dans la courbe $A_1 P M$ doit être égale à celle du câble du milieu, et, comme nous connaissons la longueur $A R M$, nous connaissons aussi la longueur $A_1 P M$. Si M_1 et M_2 sont les points les plus bas des deux paraboles $M P$ et $P A_1$, la longueur ci-dessus est ainsi exprimée par l'équation :

$$S = C \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{z}{C} \right)^2 \right\} - (C - \lambda) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{z - x}{C - \lambda} \right)^2 \right\} \\ + (B - \lambda) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{y - x}{B - \lambda} \right)^2 \right\} - (B - l) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{y - h}{B - l} \right)^2 \right\}$$

ou :

$$\frac{z}{C} - \frac{(z - x)^2}{C - \lambda} + \frac{(y - x)^2}{B - \lambda} - \frac{(y - h)^2}{B - l} = \frac{3}{2} (S - l) \quad (1)$$

Dans cette équation les plus hautes puissances des fractions $\frac{z}{C}$, etc., qui sont très-petites, ont été négligées, par la raison qu'il n'est pas besoin d'une plus grande exactitude. Les forces horizontales en A_1 et P devant être égales,

$$\frac{q_2 C^2}{z} = q_1 \frac{(B - \lambda)^2}{y - x} \quad (2)$$

Au point P , les deux paraboles $M P$ et $P A_1$ ont une tangente commune, on aura donc

$$\frac{C - \lambda}{z - x} = \frac{B - \lambda}{y - h} \quad (3)$$

A ces trois équations doivent être ajoutées celles des deux paraboles qui composent toute la courbe :

$$\frac{(B - \lambda)^2}{(B - l)^2} = \frac{y - x}{y - h} \quad (4)$$

$$\frac{C^2}{(C - \lambda)^2} = \frac{z}{z - x} \quad (5)$$

Avec ces cinq équations, nous pouvons déterminer les cinq inconnues B , C , x , y et z .

De (5) et (2) il suit que :

$$z - x = \frac{C^2}{z} (C - \lambda)^2 \quad (6)$$

$$y - x = \frac{q_1 z}{q_2 C^2} (B - \lambda)^2 \quad (7)$$

et en combinant l'équation (7) avec l'équation (4) :

$$y - h = \frac{q_1 z}{q_2 C^2} (B - l)^2 \quad (8)$$

Il résulte de ces dernières équations que :

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{q_2}{q_1} (C - \lambda) + \lambda \\ y &= \frac{z}{C^2} (C - \lambda) (B - C) + z \\ x &= z - \frac{z}{C_2} (C - \lambda)^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$z = \frac{C^2 h}{2 l C - 2 l \lambda - \frac{q_1}{q_2} - (l - \lambda)^2 + \lambda} \quad (10)$$

Substituant les valeurs de $z - x$, $y - z$, $y - h$ et B dans l'équation (1) et posant $\frac{3}{2} (s - l) = m$, nous arrivons, après les réductions, à :

$$\begin{aligned} z^2 \left\{ 3 l C^2 + C \left[(l - \lambda)^2 \left(3 - 3 \frac{q_1}{q_2} \right) - 3 l^2 \right] + \lambda^3 \left(3 \frac{q_1}{q_2} - 2 \right) + \lambda^2 l \left(3 - 6 \frac{q_1}{q_2} \right) \right. \\ \left. + 3 \frac{q_1}{q_2} l^2 \lambda + \left(\frac{q_1}{q_2} \right)^2 (l - \lambda)^3 \right\} = m C_1 \end{aligned} \quad (11)$$

Plusieurs expressions dans (11) et (10) sont constantes, et nous posons, par conséquent, pour simplifier :

$$(l - \lambda)^2 \left(3 - 3 \frac{q_1}{q_2} \right) - 3 l^2 = N$$

$$\lambda \left(3 \frac{q_1}{q_2} - 2 \right) + \lambda^2 l \left(3 - 6 \frac{q_1}{q_2} \right) + 3 \frac{q_1}{q_2} l \lambda + \left(\frac{q_1}{q_2} \right)^2 (l - \lambda)^3 = R$$

$$2 l \lambda - \frac{q_1}{q_2} (l - \lambda)^2 - \lambda^2 = p.$$

substituant la valeur de z dans (11), cette dernière prend la forme :

$$3 l C^2 + C N = \frac{m}{h^2} \left(4 l^2 C^2 - 4 l C p + p^2 \right) - R$$

d'où il suit :

$$C = - \frac{N + \frac{4 m}{h_2} l p}{6 l - \frac{8 m}{h^2} l^2}$$

$$\pm \sqrt{\frac{\frac{m p^2}{h^2} - R}{3 l - \frac{4 m}{h^2} l^2} + \left\{ \frac{N + \frac{4 m}{h^2} l p}{6 l - \frac{8 m}{h^2} l^2} \right\}^2}$$

La valeur de C une fois connue, il est aisé, au moyen des équations (9) et (10), de trouver B, x , y et z .

Les valeurs numériques des constantes sont, dans notre cas particulier :

$$l = 952.65 \text{ (290}^m\text{362)}, h = 188.3 \text{ (58}^m\text{215.)}$$

$$q_1 = 1212 \text{ livres (549}^k\text{757)} \quad q_2 = 748 \text{ livres (339}^k\text{287)} \quad \lambda = 400' \text{ (121}^m\text{918)}$$

ce qui donne les résultats suivants :

$$C = 1282.8 \text{ (391}^m\text{)}, z = 2221 \text{ (67}^m\text{694)}$$

d'où la tension horizontale :

$$H = q_2 \frac{C^2}{2z} = 2,770,592 \text{ livres (1,256,718 kilog.)}$$

ce qui fait 23,488 livres (10,643 kilog.) en moins que dans la travée du milieu; mais le poids sur une selle est de 1,250 tonnes (le poids total de la superstructure étant de 5,000 tonnes); par conséquent, si l'équilibre existe entre les deux travées, le frottement pour 1,000 livres (454 kilog.), doit être :

$$\frac{23,488}{2,500} = 9.4 \text{ livres } \left(\frac{10,643}{1,134} = 9.400 \right)$$

Ce résultat est identique à celui que nous avons obtenu par l'expérience et, conséquemment, notre supposition, que chaque selle se meut de 0.1 pouce vers la rivière, peut être considérée comme correcte, ainsi que la flèche calculée pour le guide-fil.

En régularisant les guide-fils pour le pont d'East River, on avait d'abord pensé qu'il suffirait d'ajuster la travée centrale et de supposer que le poids mort du fil suffirait à établir une courbe en équilibre sur chaque travée latérale. Mais le résultat fit voir que, bien que les fils fussent supportés sur de petits galets, le frottement était trop grand pour permettre à la courbe théorique de se produire naturellement, et on régla les câbles des rives, séparément dans chaque portée.

Pour régler les flèches des guide-fils, deux mires horizontales au même niveau, furent placées entre les arches dans les deux tours, et un niveau à lunette, sur un échafaudage derrière, fut placé de façon que la ligne des réticules de la lunette coïncidât avec les bords supérieures des deux mires, tandis que la lunette elle-même était fixée rigoureusement de niveau par des vis de pression. Par cette disposition, il fut possible de voir les quatre fils de la même position, puisqu'un déplacement angulaire du télescope ne changeait pas la hauteur de la ligne de vue.

Les mires étaient mobiles dans un cadre en fer, afin de régler leur hauteur selon la température. Une disposition semblable fut employée pour les travées latérales. Un plancher fut fixée dans la maçonnerie de chaque tour à quarante pieds (12^m192) au-dessous de la plaque de selle. Une tangente, menée de ce plancher à la courbe du câble de rive, coupera la face de l'ancrage à une certaine hauteur, qui, déterminée par le calcul, servira à établir une ligne de mire pour la régularisation.

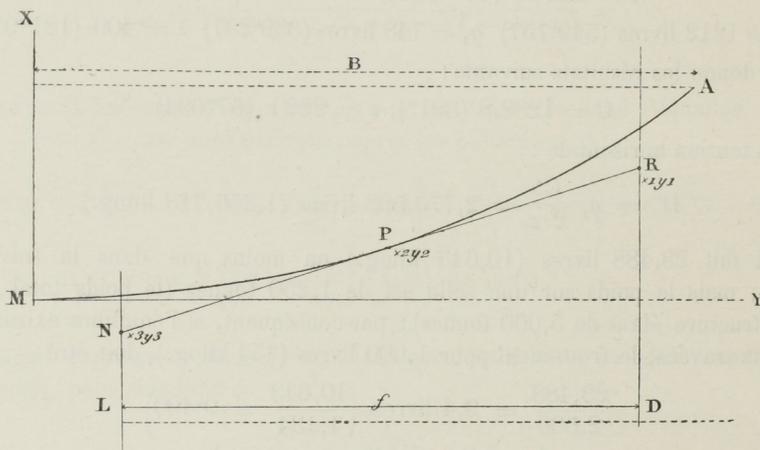


Fig. (45).

A P M (voir fig. 45), représente la courbe du câble de rive, N R la tangente au point P, N L la face d'ancrage, et R D, celle de la tour. Prenant M (le sommet de la courbe) comme origine des coordonnées, M Y comme axe des ordonnées, et M X comme axe des abscisses, et appelant les coordonnées de R, P et N : $x_1 y_1$, $x_2 y_2$ et $x_3 y_3$, nous avons d'abord les deux équations linéaires :

$$y_1 = a x_1 + b$$

$$y = a x_2 + b;$$

d'où il suit que :

$$y_1 - y_2 = a(x_1 - x_2) \quad (1)$$

x_2, y_2 étant aussi un des points de la parabole, nous avons la relation :

$$y_2^2 = 2 p x_2 \quad (2)$$

et différentiant, par rapport à x_2 , nous aurons :

$$\frac{d y_2}{d x_2} = 2 p$$

$$\frac{d y_2}{d x_2} = \frac{p}{y_2},$$

ce qui est l'équation pour la tangente au point P; mais a est le coefficient angulaire de cette tangente dans l'équation (1), d'où nous avons $a = \frac{p}{y_2}$, et (1) prend la forme :

$$y_1 - y_2 = \frac{p}{y_2} (x_1 - x_2)$$

$$y_2 = \frac{2 p x_2}{y_1} + \frac{p}{y_1} (x_1 - x_2)$$

La position du point R étant fixe, ses coordonnées sont constantes, et nous pouvons établir que :

$$y_1 = c x_1 = d$$

d'où :

$$y_2 = \frac{2 p x_2}{c} + \frac{p}{c} (d - x_2)$$

$$y_2^2 = \frac{p^2}{c^2} (d^2 + 2 d x_2 + x_2)$$

ou

$$2 p x_2 = \frac{p^2}{c^2} d^2 + \frac{p^2}{c^2} 2 d x_2 + \frac{p^2}{c^2} x_2$$

$$x_2 = \frac{c^2}{p} - d \pm \sqrt{-d^2 \left(\frac{c^2}{p} - d \right)^2}$$

dans laquelle

$$p = \frac{B^2}{2 h}.$$

x_3 étant connue, la valeur de y_2 est trouvée au moyen de l'équation (2) et x_3 par la relation : $y_1 - y_2 = (x_1 - x_3)$, et comme $y_1 - y_2 = f$,

$$x_3 = \frac{a d - f}{a}.$$

Un règlement doit être accompli seulement par un temps parfaitement calme, et l'on doit, en conséquence, veiller avec soin pour saisir ce moment, car il peut se faire attendre plusieurs semaines. Ce cas s'est présenté au pont d'East River, où, pendant trois semaines, tous les essais n'ont donné aucun résultat, car une légère brise suffit pour déplacer considérablement un fil d'une telle longueur; l'exactitude la plus minutieuse étant rigoureusement nécessaire, l'importance d'un jour opportun est évidente. Les fils employés pour les guide-fils ont été choisis soigneusement d'un diamètre régulier et de poids égal par unité de longueur. Il fut nécessaire d'examiner cinquante rouleaux différents de fil, avant que de pouvoir en trouver trois qui satisfassent aux conditions voulues. Cela prouve les précautions prises pour le choix du guide-fil. Le réglage commença sur la travée latérale du côté de New-York et continua de là sur celle du milieu, et se termina par la travée latérale de Brooklyn. Ensuite, les fils furent abandonnés à eux-mêmes et restèrent en parfait équilibre. Dans d'autres cas moins importants, où une différence de flèche de 1 pied (0^m305) ou 18 pouces (0^m457) n'a pas de conséquence, le calcul peut être simplifié en négligeant les plus hautes puissances des petites fractions.

III. — Les matériaux et la manière de les travailler pour en faire un câble.

I. Les fils du câble. — Dans tous les câbles de ponts construits avant ceux destinés au pont d'East River, le fil de fer au charbon de bois n° 10 ou n° 9, (jauge anglaise), était exclusivement employé. Les câbles du pont de chemin de fer du Niagara, par exemple, contiennent 3,640 fils n° 10, ayant une force maxima de 2,658 tonnes, formant un câble de 10 pouces (0^m254) de diamètre. Ceux du pont de Cincinnati, qui est jusqu'à ce jour le plus grand pont suspendu qui ait été construit, ont 12 pouces (0^m305) de diamètre et contiennent 5,200 fils n° 9, donnant une force totale de 4,212 tonnes. Si nous comparons avec ceux-ci les câbles du pont d'East River, nous trouvons que la force exigée pour ce dernier

dépasse de deux fois et demie celle des premiers. S'il était composé des mêmes matériaux, leur volume et le temps exigé pour les faire seraient accrus dans la même proportion; ce sont deux quantités qu'il était désirable de réduire autant que possible. On décida, en conséquence, que ces câbles seraient fabriqués en fils d'acier. Afin de déterminer la grosseur du fil et la qualité d'acier la plus avantageuse, des expériences très-minutieuses, qui ont duré pendant plusieurs années, furent faites avec toutes qualités de fils d'acier de différentes grosseurs pour déterminer leur force de tension et leur ductilité. C'est d'après le résultat obtenu à la suite de ces épreuves, que le fil fut choisi tel qu'il est décrit dans l'extrait suivant du cahier des charges :

« Le fil doit être fait en acier de qualité supérieure; il doit être galvanisé.

» Le fil aura la grosseur n° 8, jauge de Birmingham. Une longueur de 14 pieds (4^m267) doit peser exactement une livre (0^k454) avant la galvanisation.

» Chaque fil doit avoir une force de résistance d'au moins 3,400 livres (1,542 kilog.). Cela correspond, dans un fil de 14 pieds (4^m267), du poids d'une livre, à 160,000 livres par pouce carré (112 kilog. par millim. carré) de section pleine. La limite élastique ne doit pas être moindre de $\frac{47}{100}$ de la force de résistance, ou 1,600 livres (725 kilog.). Dans cette limite d'élasticité, il doit se casser sous un effort uniforme, correspondant à un coefficient d'élasticité non moindre que 27,000,000 livres (12,247,000 kilog.), et n'excédant pas 29,000,000 livres (13,154,000 kilog.)

» Tout fil doit être un fil droit; c'est-à-dire que, lorsqu'un rouleau est déroulé sur un plan, le fil doit être couché parfaitement droit, sans tendance à se redresser en arrière en forme arrondie, comme cela arrive ordinairement. Cette condition de droiture ne doit pas être produite par l'emploi d'une machine à dresser, mais par un procédé particulier, breveté, qui consiste à conduire le fil, d'un point du baquet de galvanisation, en ligne droite, en le soumettant à une tension considérable, jusqu'au tambour d'enroulage, et en plaçant ce tambour à une distance déterminée, qui permet au fil de se refroidir avant son enroulement. »

Il y a deux sortes d'essais :

» *Premier essai.* — On place sur une machine verticale d'essai un échantillon de 60 pieds (18^m288) de long, pris dans un rouleau quelconque par quarantaine. La machine a un vernier permettant de lire $\frac{1}{10,000}$ de pied (0^m0003), et qui est fixé de façon à indiquer l'allongement de 50 pieds de fil (15^m240). Une force initiale de 400 livres (181 kilog.) est alors appliquée, et par augmentations successives, on la porte à 1,600 livres (725 kilog.). L'allongement correspondant à chacune de ces augmentations sera le même, et l'allongement total, entre la force initiale et la force finale, ne sera pas moindre de $\frac{97}{1,000}$ de pied (0^m305), soit à $\frac{194}{100,000}$ des

50 pieds (15^m240). Et bien plus, en réduisant la force à 1,200 livres (544 kilog.), il se produira un allongement permanent n'excédant pas $\frac{1}{100,000}$ de sa longueur.

La force minima du fil, s'il est soumis à un effort brisant, ne sera pas inférieure à 3,400 livres (1,542 kilog.), et l'allongement minimum, lorsqu'il aura été cassé, aura été de deux pour cent dans cinquante pieds, et le diamètre du fil, au point de fracture, n'excédera pas $\frac{13}{100}$ de pouce (0^m00385).

Un échantillon de 16 pouces (0^m406) de longueur, coupé dans chaque rouleau, et un de 6 pieds (1^m829) de longueur, pris dans un rouleau sur cinq, seront soumis aux mêmes essais et doivent satisfaire aux mêmes épreuves.

Second essai. — Chaque rouleau est soumis à un essai de courbure. On coupe de chacun d'eux un morceau de fil d'un pied de long, et on l'enroule fortement, et d'une façon continue, autour d'une tige d'un demi-pouce (0^m012) de diamètre; s'il casse, il doit être rejeté. »

Le contrat fut passé dans ces conditions avec J. Loyd Haigh, de Brooklyn, à raison de 8 $\frac{7}{10}$ cents par livre (le cent vaut environ 0'05); mais avec cette restriction qu'il ne serait pas fait usage d'autre acier que fondu au creuset. Les fils qu'il livra dépassaient de beaucoup la force ultima exigée, puisqu'ils donnaient en moyenne une résistance de 172,000 livres par pouce carré (12,093 kilog. par centim. carré). Deux faisceaux ayant été construits complètement avec ce fil, on décida de fixer la longueur des fils à 11 pieds (3^m353) par livre (0^k454), ce qui correspond au n° 7. Ce fil a une résistance un peu moindre à la cassure, la moyenne étant 170,000 livres par pouce carré (11,953 kilog. par centim. carré), mais il a une plus grande ductilité. De plus, il offre cet avantage principal, qu'au lieu de 332 fils dans un faisceau, 282 suffisent, ce qui donne une économie de temps de fabrication de presque un sixième.

Le fil est livré en rouleaux de 60 à 70 livres (27 à 32 kilog.), contenant de 800 à 1,000 pieds (245 à 305 mètres) du plus petit module, et de 600 à 800 pieds (180 à 245 mètres) du plus grand.

Avant d'être employé, chaque rouleau reçoit trois couches d'huile; on le trempe d'abord dans une auge contenant de l'huile de lin commune, puis deux fois dans une autre auge contenant de l'huile de lin bouillie, mais froide. Chaque couche d'huile doit être absolument sèche, avant qu'une autre soit appliquée. Lorsque l'huile s'est bien solidifiée, les rouleaux sont prêts pour l'épissage.

L'épissure employée d'abord pour le fil de fer consistait à marteler en pointe les extrémités des fils sur environ 2 $\frac{1}{4}$ à 3 pouces (0^m063 à 0^m076), en posant les côtés plats l'un sur l'autre, et en entourant le tout de fil de fer fin. Par un coup sur un moule d'acier préparé spécialement, la circonférence du fil recevait un certain nombre de petits crans, qui empêchaient le fil enveloppant de glisser. Cette

épissure donna une force égale à celle du fil de fer n° 9; mais, appliquée à de lourds fils d'acier, elle présente, si elle est bien faite, une force moyenne de seulement 2,400 à 2,700 livres (1,088 à 1,224 kilog.); donc elle est insuffisante pour un fil devant résister à 3,400 livres (1,542 kilog.). Des expériences, faites avec différents modes d'épissure, firent donner la préférence à un accouplement à vis qui, malgré sa minime grosseur, donnait la résistance la plus grande. Ce fut cette épissure qui fut finalement adoptée pour les câbles du pont d'East River, fig. (46).



Fig. (46).

Les filets de la vis, à l'extrémité des fils d'acier, offrent cette particularité, qu'au lieu d'être entaillés dans la section du fil, ils sont extérieurs à son diamètre normal. Ce résultat est obtenu en applatissant légèrement au marteau les extrémités des fils, et traçant alors les pas de vis sur ce cône. De cette façon, les pas de vis sont interrompus par des parties plates, avec une partie filetée de $\frac{1}{2}$ pouce (0^m012) pour chaque fil; cet accouplement possède encore environ 95 pour cent de la force du fil. Lorsque les extrémités des fils sont fixées dans la virole, l'accouplement est décapé avec une solution de potasse, puis trempé dans du zinc fondu, mélangé avec un peu d'étain, et enfin peint avec du vermillon.

Pour éviter que le fil se dévise de sa virole pendant son passage au travers de la rivière, ce qui est arrivé quelquefois, on donne un petit coup sur chacune de ses extrémités, qui sont enduites de zinc adhérent au fil, pour empêcher que la virole tourne.

II. Construction d'un faisceau. — Après qu'un certain nombre de rouleaux de fil ont été épicés ensemble, le fil est enroulé sur le tambour, en traversant d'abord un morceau de peau de mouton enduit d'huile. Tout ce qui concerne la corde voyageuse, le sabot et la jambe, etc., ayant été préparé, on fût prêt à étendre les fils pour former le faisceau.

Les fig. (47 et 48) montrent l'arrière-partie de la jambe, avec le sabot et le guide-fil en position.

L'extrémité du fil, avec lequel le faisceau est commencé, est attachée au côté de la jambe, il passe autour du sabot, sur le rouet voyageur, et revient au tambour. Le fil le plus bas, allant du sabot au rouet voyageur, est appelé le « fil fixe »; le fil supérieur, qui se développe du tambour et marche avec une vitesse double de celle de la corde voyageuse, est dénommé, « le fil courant ». Afin d'éviter la

confusion, il est nécessaire de conserver cette distinction pour tout le faisceau, et de garder toujours la même disposition de ces deux sortes de fils de chaque côté du sabot.

Le fil fixe occupe l'intérieur, et le fil courant, l'extérieur de la fig. (48).

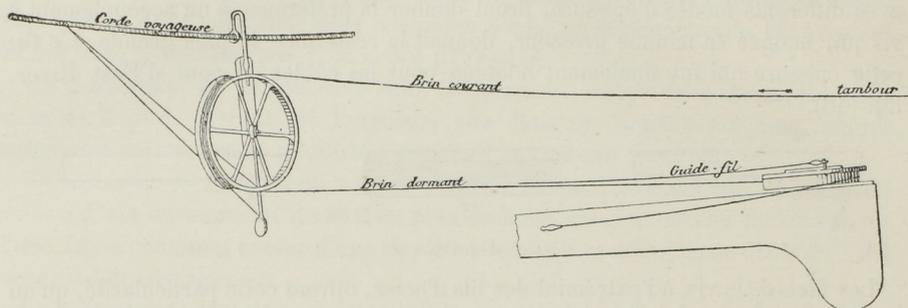


Fig. (47). Rouet voyageur. — Élévation.

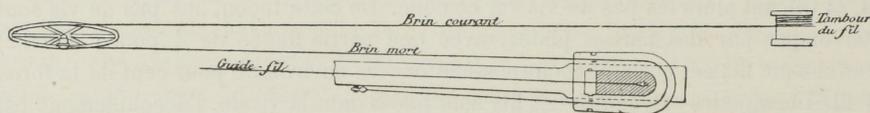


Fig. (48). Plan.

La tension dans les fils, pendant la traversée, est réalisée par un frein placé sur le tambour. Aussitôt que le rouet voyageur a dépassé la première tour, le fil fixe est placé sur la selle et réglé dans la première travée. Cela est fait en le tirant simplement sur la tour jusqu'à ce qu'il pende parallèle au guide-fil, et en le maintenant dans sa place au moyen d'une attache temporaire sur ou près de la selle. Pendant ce temps, le fil courant continue son voyage, supporté par des petits galets en bois en dehors de la selle. Après que le rouet voyageur a passé la seconde tour, le fil fixe est immédiatement réglé dans la travée du milieu de la même façon, de sorte qu'à son arrivée à l'ancrage, il n'y a plus à l'ajuster que dans la dernière travée. Cela fait, le fil courant contourne le sabot et alors se trouve régularisé de même que le fil fixe, en le tirant à l'autre extrémité du pont. Au pont de l'East River, l'ancrage de Brooklyn est le point de départ, d'où tous les fils fixes sont régularisés de Brooklyn vers New-York, et les fils courants de New-York vers Brooklyn. On se sert, pour ajuster les fils, d'une paire de pinces semblables à celles du dessin, fig. (49 et 50), et le tirage est fait avec un petit palan attaché sur la chaîne d'ancrage. Pendant le règlement de ces deux fils, le

rouet voyageur qui les a transportés revient vide, et un autre rouet, attaché au côté opposé de la corde voyageuse, porte les deux fils pour le faisceau du second

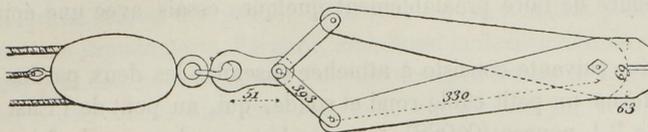


Fig. (49).

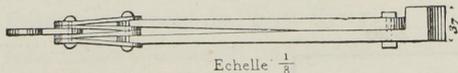


Fig. (50). Pinces de réglage des fils.

câble. Il faut environ neuf à dix jours pour établir un faisceau de 280 à 300 fils, s'il ne survient pas de retards. Lorsque le dernier fil du faisceau est en place, il est

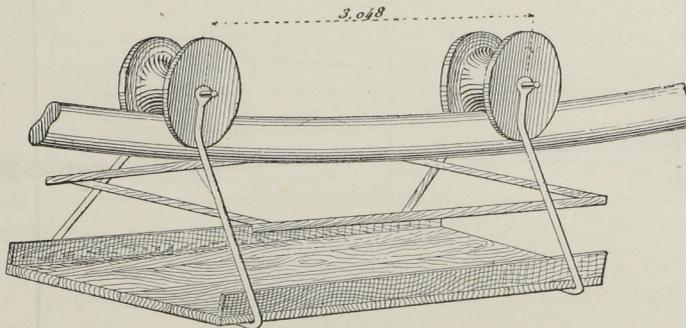


Fig. (51). Chariot pour les attaches des faisceaux.

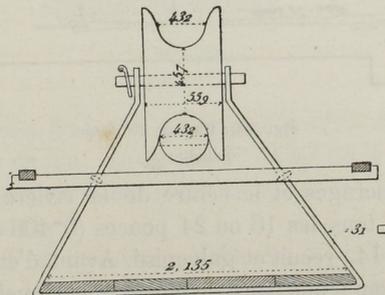


Fig. (52).

coupé et épissé à l'extrémité du premier fil, de sorte que tout le faisceau est formé d'un fil continu. La dernière opération est délicate, parce que les extrémités doivent

être coupées de façon que les longueurs viennent s'ajuster d'une façon absolument exacte, et que la tension soit uniforme, comme dans les autres fils. Il est donc nécessaire de faire préalablement quelques essais avec une épissure provisoire.

L'opération suivante consiste à attacher ensemble les deux parties du faisceau pour qu'il forme un petit câble rond et solide, qui, au pont de l'East River, a un diamètre de $3\frac{1}{2}$ pouces (0^m088). Dans ce but, on place sur le faisceau, au sommet des tours, un chariot, fig. (51 et 52), dans lequel quelques hommes descendent

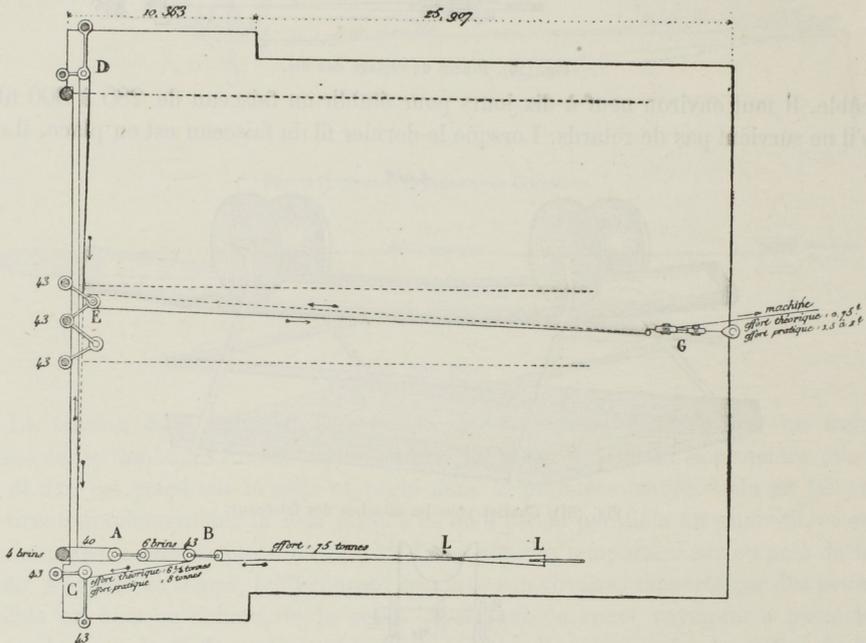


Fig. (53). Plan de l'ancrage.

Echelle $\frac{1}{360}$.

doucement vers les ancrages et le centre de la rivière, attachant le faisceau, pendant le passage, à tous les 16 ou 24 pouces (0^m406 ou 0^m610), avec quatre tours de fil de fer n° 14, recuit et galvanisé. Avant d'être attachés, les fils sont serrés ensemble au moyen d'une paire de pinces, sur laquelle un anneau en fer, que l'on repousse au marteau vers l'extrémité des bras de levier, exerce une grande force de serrage.

Le faisceau est alors prêt pour être dégagé, c'est-à-dire qu'on retire le sabot de

son siège temporaire sur la jambe, et qu'on le conduit à sa position finale, à l'extrémité de la chaîne d'ancre. C'est une opération qui, pour des faisceaux lourds, exige le plus grand soin et une grande attention, car un accident pourrait causer, non seulement une grande perte d'argent, mais aussi la destruction de richesses, de navires et, qui plus est, causer la mort de beaucoup d'hommes. Il faut donc ne pas se borner à des calculs bien certains, mais encore essayer scrupuleusement toutes les cordes et tous les fers employés dans cette opération.

La fig. (53) représente la vue supérieure de l'ancrage, avec la disposition de l'installation des tendeurs des faisceaux du pont de l'East River.

Deux lourdes barres de fer LL, fixées solidement aux parois du sabot, et retenant, au moyen d'écrous, une double plaque d'acier en avant du sabot, forment l'attache. Les fig. (54 et 55) la font voir sur une plus grande échelle.

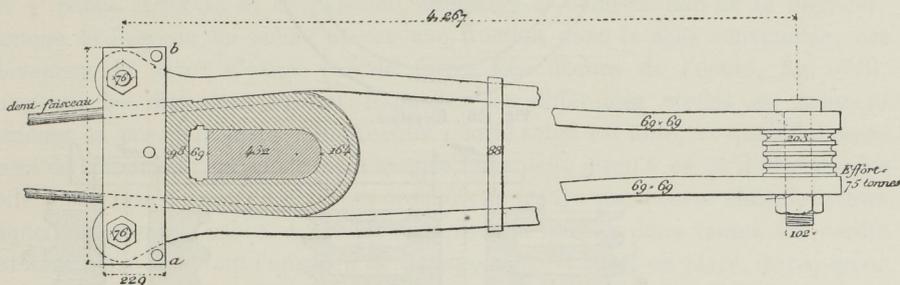


Fig. (54).

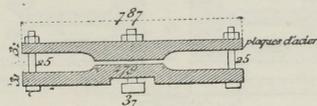


Fig. (55).

Echelle $\frac{1}{24}$.

A l'extrémité des barres de fer, il y a quatre poulies de 8 pouces (0^m203) qui sont réunies au moyen de huit cordes en fil de fer de $1 \frac{3}{8}$ pouces (0^m040), aux quatre petits rouets à rainure d'une paire de palans B et A. Les fig. (56 et 57) montrent un de ces palans.

Le palan A est fixe ; il est maintenu solidement à un autre fort palan, en arrière de l'ancrage, au moyen de quatre cordes en fil de fer de $1 \frac{3}{8}$ pouces (0^m040). Il contient six poulies en fer de 23 pouces de diamètre unies aux rouets du palan courant B au moyen d'une corde d'acier de $1 \frac{1}{4}$ pouce (0^m031) repliée douze fois, et dont les extrémités, après qu'elle a passé autour de différents rouleaux C, D et E,

sont attachées à un palan en bois à 4 poulies G, placé à l'autre extrémité de l'ancrage. Celui-ci est manœuvré par une corde de chanvre de $1\frac{1}{2}$ pouce (0^m037) qui correspond au tambour d'une machine à vapeur. Cette disposition peut être naturellement modifiée selon les emplacements ; dans le cas qui nous occupe, elle présente les avantages suivants : d'abord, le palan en bois G ne se meut que dans

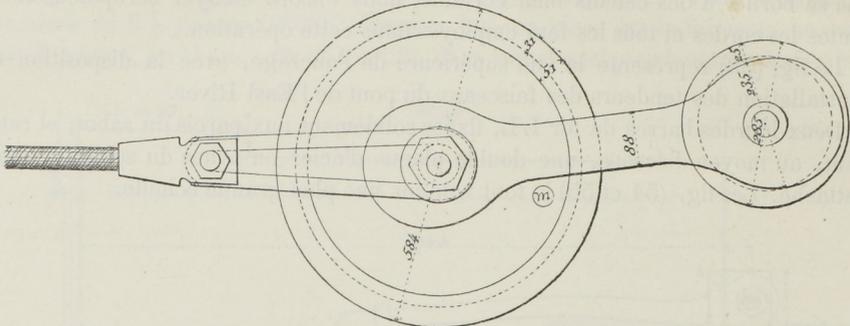


Fig. (56). Elévation.

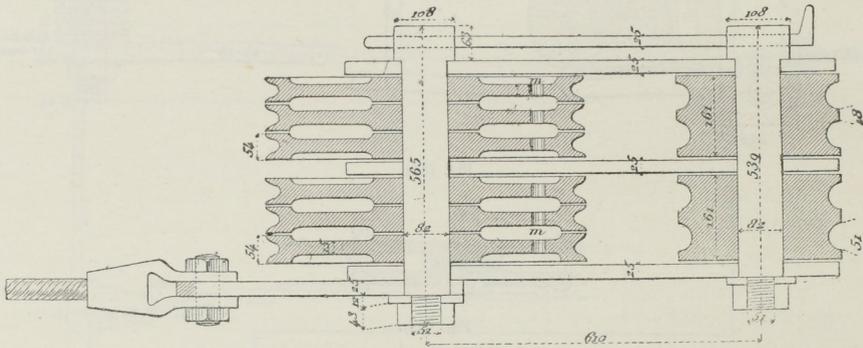


Fig. (57). Coupe horizontale. — Palan.

Echelle $\frac{1}{12}$.

l'axe du pont pour dégager chaque faisceau des quatre câbles, cette partie du milieu étant la seule libre ; secondement, la longueur de l'ancrage n'étant pas suffisante pour faire parcourir au sabot, en une fois, la longueur de son déplacement entier, il est nécessaire de le faire en deux fois, c'est-à-dire d'arrêter le mouvement aussitôt que le palan en bois arrive à l'extrémité d'arrière du massif d'ancrage pour prendre la corde à douze brins du rouet intermédiaire E, et pour la placer directement de G sur E, occupant alors dans la fig. (53) la position indiquée par une ligne pointillée. De cette façon la double distance E D est gagnée

dans la longueur de la corde à douze brins et le palan en bois peut être reculé d'autant pour continuer l'opération. On peut aisément arrêter le mouvement de cette corde ou diminuer la tension, en attachant solidement ensemble les 12 cordes, entre les palans fixes et courants.

La tension dans le faisceau est de 75 tonnes; celle de la corde à 12 brins est conséquemment $\frac{75}{12} = 6 \frac{1}{4}$ tonnes, qui, augmentées du frottement, donnent un total d'environ 8 tonnes, et celle de la corde en chanvre $\frac{6 \frac{1}{4}}{8} = \frac{3}{4}$ tonne, et avec le frottement environ de $1 \frac{1}{2}$ à 2 tonnes. Le sabot doit parcourir 12 pieds (3^m657), d'où le palan en bois, $12 \times 12 = 144$ pieds (43^m890), et la corde en chanvre, $144 \times 8 = 1152$ pieds (351^m120).

L'opération commence en tirant le sabot en arrière de son siège sur la jambe de $\frac{1}{8}$ pouce (0^m003), et en l'élevant au-dessus de celle-ci, afin de le dégager. Comme le faisceau lui-même exerce une traction dans le sens convenable, cet élèvement du sabot n'exige pas de force. Les flèches de l'épure, fig. (53), montrent les directions suivant lesquelles les différentes cordes se meuvent pendant la première opération. Aussitôt que le sabot est libre, et que le mouvement de la machine est renversé, il avance lentement jusqu'à ce qu'il atteigne les œils des barres d'ancre, au travers desquels se trouve une courte cheville contre laquelle s'appuie le sabot. Le sabot ainsi fixé, la tension dans toutes les cordes est diminuée; mais tout l'appareil de dégagement est laissé en place, parce qu'on en a encore besoin pour régler le faisceau.

Abaissement de la branche dans la selle. — Cette opération est indiquée dans les fig. (58 et 59.)

Deux poutres de 14×12 pouces (0^m356 \times 0^m305), supportées par des montants assis sur l'extrémité de la maçonnerie, forment une plate-forme au-dessus de l'espace dans lequel sont placées les selles. Elles maintiennent l'écrou d'une vis de $3 \frac{1}{2}$ pouces (0^m088) en fer forgé, à l'extrémité de laquelle est attachée une espèce de main en fer qui saisit la branche à quatre points différents, s'étendant d'environ six pieds. L'écrou, vu sur une plus grande échelle dans la fig. (60), est tourné au moyen d'une clef en fonte, fig. (61), qui s'adapte sur l'écrou et qui est pourvue de six trous pour l'introduction de leviers en bois servant à la faire tourner. Aussitôt que le faisceau est soulevé au-dessus des rainures des galets, ceux-ci, qui reposent sur des coussinets simples, sont retirés, et le faisceau est doucement descendu sur la selle.

Cette opération achève le travail pour un seul faisceau, qui doit être maintenant réglé. Théoriquement, le premier faisceau de chaque câble ne demande aucun réglage, étant tout du long parallèle au guide-fil; mais, pratiquement, il y aura

de rive qui passe par un certain point fixe (le point où le câble quitte l'anerage), nous sommes à même de calculer la longueur du faisceau entre ce point et le point où il touche la selle. Il faut ajouter à cette longueur la distance de la face de l'an-

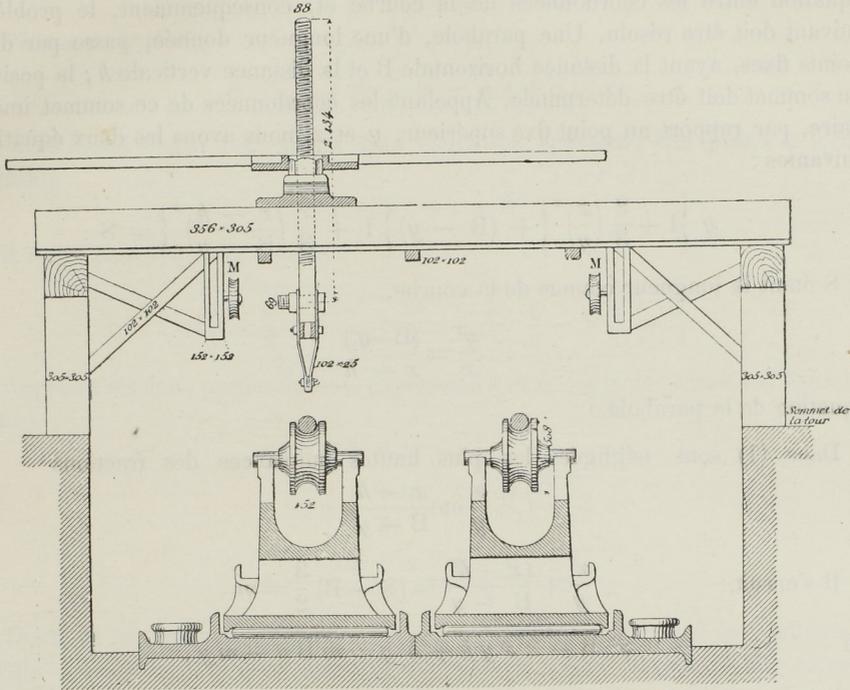


Fig. (59). Coupe transversale. — Pose des faisceaux sur les selles.

Echelle $\frac{1}{48}$.

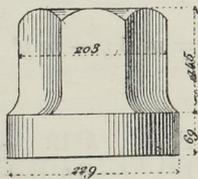


Fig. (60).

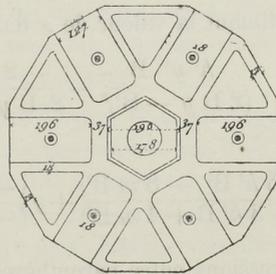


Fig. (61).

crage, au point d'attache à la chaîne. Ces deux valeurs réunies donneront la longueur totale du faisceau de rive, qui équilibrera le faisceau correspondant de la rivière. Au

lieu de mesurer maintenant cette longueur (ce qui serait impossible à faire exactement), nous établissons de nouveau des tangentes pour le réglage, comme nous l'avons fait pour le guide-fil. Par conséquent, il est nécessaire de trouver une équation entre les coordonnées de la courbe et, conséquemment, le problème suivant doit être résolu. Une parabole, d'une longueur donnée, passe par deux points fixes, ayant la distance horizontale B et la distance verticale h ; la position du sommet doit être déterminée. Appelant les coordonnées de ce sommet imaginaire, par rapport au point fixe supérieur, y et x , nous avons les deux équations suivantes :

$$y \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{x}{y} \right)^2 \right\} + (B - y) \left\{ 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{x - h}{B - y} \right)^2 \right\} = S \quad (1)$$

S étant la longueur connue de la courbe,

$$\frac{y^2}{x} = \frac{(B - y)^2}{x - h} \quad (2)$$

équation de la parabole.

Dans (1) sont négligées les plus hautes puissances des fractions

$$\frac{x}{y} \text{ et } \frac{x - h}{B - y}.$$

Il s'ensuit :

$$\frac{x^2}{y} + \frac{(x - h)^2}{B - y} = (S - B) \frac{3}{2} = m$$

ou

$$x^2 B - 2 x y h + h^2 y = m B y - m y^2.$$

de (2) il s'ensuit :

$$x = \frac{h y^2}{2 B y - B^2}$$

En substituant la valeur de x dans la précédente équation, nous obtenons :

$$\frac{h^2 y^4 B}{(2 B y - B^2)^2} - \frac{2 h^2 y^3}{2 B y - B^2} + h^2 y = m B y - m y^2$$

ou :

$$y^3 + y^2 \left\{ \frac{6 h^2 B^2 - 8 m B^3}{-3 h^2 B + 4 m B^2} \right\} + y \left\{ \frac{-4 B^3 h^2 + 5 m B^4}{-3 h^2 B + 4 m B^2} \right\} + \left\{ \frac{h^2 B^4 - m B^5}{-3 h^2 B + 4 m B^2} \right\} = 0.$$

Les expressions entre parenthèses sont constantes, et nous pouvons les appeler a , b et c , de sorte que l'équation prendra la forme :

$$y^3 + a y^2 + b y + c = 0.$$

C'est une simple équation du troisième degré, qui peut être résolue en introduisant une quantité inconnue auxiliaire z , qui est déterminée par l'équation :

$$y = z - \frac{a}{3}.$$

Posons pour abrégé :

$$b - \frac{a^2}{3} = u \text{ et } \frac{2}{27} a^3 - \frac{b}{3} a + c = v$$

et, substituant toutes ces valeurs dans l'équation ci-dessus, elle prend la forme suivante :

$$z^3 + u z + v = 0$$

d'où il suit pour l'une des racines :

$$z = \sqrt[3]{-\frac{v}{2} + \sqrt{\frac{u^3}{27} + \frac{v^2}{4}}} + \sqrt[3]{-\frac{v}{2} - \sqrt{\frac{u^3}{27} + \frac{v^2}{4}}}.$$

Appelant les deux parties de cette expression k et n , les trois racines de l'équation sont :

$$z_1 = k + n$$

$$z_2 = -\frac{k+n}{2} + \frac{k+n}{2} \sqrt{-3}$$

$$z_3 = -\frac{k+n}{2} - \frac{k+n}{2} \sqrt{-3}$$

Deux de ces racines étant imaginaires, naturellement celle qui est réelle est la valeur correcte de z . Mais si toutes les trois étaient réelles, la seule valeur correcte est celle qui satisfait à la fois aux équations (1) et (2). Ayant déterminé z , il est aisé de trouver x et y , ou l'équation de la courbe au moyen de laquelle les lignes tangentes peuvent être déterminées. Ce calcul est très-long ; mais, d'un autre côté, le bon réglage des faisceaux en dépend et, sans lui, l'action commune dans le câble n'existerait pas, ou, au moins, serait très-incertaine.

III. Entourage des câbles. — Aussitôt que le dernier faisceau est en position, le câble sera entouré. Tout l'appareil d'entourage consiste en trois parties : le chariot, les pinces et la machine proprement dite à entourer, fig. (62 et 63).

Un chariot est d'abord placé sur chaque câble aux deux côtés des tours. Il est semblable dans sa construction à celui employé pour attacher les faisceaux, mais ses galets sont assez larges pour courir sur le câble ; l'objet de ce chariot est de servir de plate-forme de travail pour les hommes qui manœuvrent la machine à entourer.

La pince consiste en deux bandes d'acier en demi-cercle, de $1 \frac{7}{8}$ pouces (0^m047).

d'épaisseur, sur $3\frac{1}{2}$ pouces (0^m088) de largeur, qui s'ajustent sur le câble, ou plutôt qui, lorsqu'elles sont placées sur les faisceaux déliés, forcent les fils du câble à prendre la forme circulaire. La partie supérieure de la pince est pourvue de quatre oreilles, boulonnées deux à deux. Elle est divergente quelque peu vers son extrémité inférieure, afin de faciliter son glissement sur les fils ou pour les saisir tous aisément. La compression est faite au moyen de deux écrous de 2 pouces

MACHINE A ENTOURER LES CABLES.

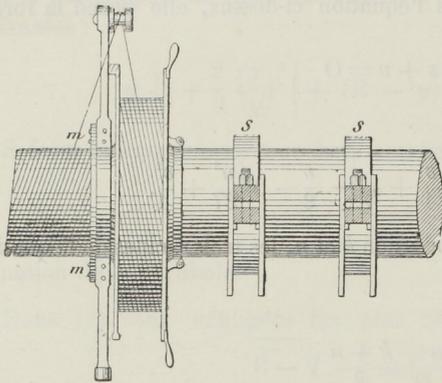


Fig. (62).

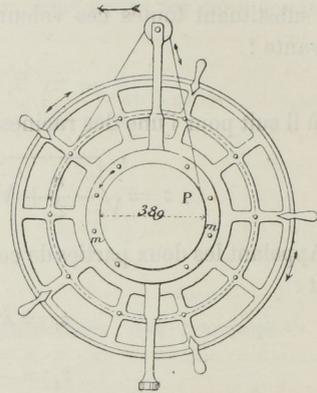
Echelle $\frac{1}{24}$.

Fig. (63).

(0^m051), qui passent à travers les parties coudées des demi-cercles. En exerçant des efforts répétés, il est possible de réaliser une énorme pression. Avant d'appliquer les pinces, les attaches temporaires des faisceaux sont enlevées, du moins toutes celles qui sont à portée. Aux câbles du pont de l'East River, cette compression et l'entourage seront faits en deux fois. On traitera, d'abord, les sept faisceaux intérieurs comme un câble séparé, comprimé et entouré provisoirement, avant que les autres faisceaux soient fabriqués. Ensuite, l'opération sera répétée pour le câble final, avec de plus grandes pinces et de plus grandes machines à entourer. De cette manière, les attaches temporaires de tous les faisceaux, excepté de celui du milieu, peuvent être coupées et enlevées, ce qui ne serait pas possible, si les faisceaux extérieurs de tout le câble avaient dû être enveloppés en une seule fois. En outre, cette double opération a l'avantage de permettre une compression plus forte avec moins d'efforts, et rend en outre le travail plus solide. La coupe des attaches du faisceau est faite à quelques pieds en avant des deux pinces, qui sont placées à environ 10 ou 12 pouces ($0^m254 \times 0^m279$) l'une de l'autre, la première aussi près que possible de la selle. Avant de serrer les vis des pinces, le câble est une fois de plus enduit d'huile, de telle sorte que tous les petits espaces entre les

fil sont complètement remplis et hermétiquement fermés. La machine à entourer est alors placée à une courte distance en arrière de la première pince, et, quand l'entourage l'atteint, cette pince est mise à 10 pouces (0^m254) en avant de la seconde, qui à son tour, est placée à la même distance en tête, aussitôt que l'entourage y est arrivé, et ainsi de suite.

La machine à entourer, fig. (62 et 63), consiste en un tambour, tournant sur un cylindre en fonte, qui ne peut glisser sur le câble que si on lui imprime une poussée considérable. Sur ce même cylindre, mais indépendant du tambour, tourne un anneau *m m* avec un revêtement d'acier; il a deux bras, l'un ayant à son extrémité un petit rouleau et l'autre un poids. Sur le revêtement en acier de l'anneau, il y a une petite rainure *p p*, qui court dans la ligne de la tangente de la circonférence commune au câble et au rouleau dont il vient d'être question.

L'appareil complet est en deux moitiés, vissées entre elles après avoir été placées sur le câble. Le fil d'entourage dévidé sur le tambour, passe de là sur le rouleau, à travers la rainure et au câble où son extrémité est fixée. Maintenant le tambour est tourné dans la direction indiquée par les flèches sur la fig. (63) et l'anneau à deux bras dans la direction opposée. Le premier mouvement déroule le fil entourant, tandis que le second l'enroule sur le câble et, en même temps, le tient par l'effet du contrepoids sous une grande tension. Comme le fil passe à travers la rainure dans l'anneau d'acier, il se serre de lui-même en raison de la pose en spirale, entre l'entourage achevé et le cylindre et, conséquemment, repousse ce cylindre d'une distance égale à l'épaisseur du fil d'entourage. Les extrémités de ces fils sont épissées de façon à ce que tout l'entourage dans une travée se fasse avec un fil continu. Quand les deux machines d'entourage se rencontrent au centre de la travée, elles sont retirées et les deux fils sont joints. On doit prendre soin d'entourer en sens contraire, afin que les extrémités des deux derniers fils soient sur les côtés opposés du câble et puissent être épissées régulièrement.

Le fil d'entourage est généralement du fil de fer recuit, du n° 11 ou du n° 10. On emploie au pont d'East River du fil n° 10 galvanisé. Près de la selle, où la machine à entourer ne peut pas être placée, le câble est enveloppé de bandes de fer placées à environ 5 pouces (0^m127) de distance. Au point de l'ancrage, d'où divergent les différents faisceaux, on place additionnellement un solide anneau en fer, afin de diminuer l'effort sur le fil d'entourage. Les faisceaux sont entourés à la main à partir de cet anneau, près du sabot. Immédiatement après avoir entouré le câble sur une certaine étendue, il est peint à plusieurs couches d'une bonne peinture à l'huile, de sorte que les petits espaces entre les fils soient complètement remplis, donnant au câble l'apparence d'un cylindre lisse et empêchant l'action oxydante de s'y produire.

Cette opération termine les câbles, qui sont prêts maintenant à recevoir la superstructure. Celle-ci doit être placée symétriquement aux tours, et simultanément dans les travées latérales et dans celle du centre, afin d'éviter une tension inégale dans le câble, et le tirage sur les tours.

Après que la plus grande partie est suspendue, les cales qui maintiennent les selles en place sont retirées, donnant ainsi au câble toute liberté de prendre sa position naturelle d'équilibre et de balance.

Nous avons montré que, sous une certaine température, ce mouvement sera d'environ deux pouces (0^m.076) vers la rivière. La température, sous laquelle le premier faisceau du câble du pont d'East River a été régularisé, était de 75 à 80° Fahrenheit (23° à 26° centig.). Si les cales des selles sont retirées par un temps plus froid, ce déplacement sera moindre en raison de la plus grande tension dans le câble de terre où les contractions sont plus grandes que dans le câble de la rivière. L'inverse se produira si les selles sont délivrées à une température plus élevée. Cependant il faut toujours pour cela que dans chaque travée le poids de la superstructure soit le même et symétrique à la tour.

Les longueurs des haubans doivent être calculées selon la courbe finale du câble, ce qui a lieu quand les tiges de suspension sont mises en place. Avant, le plancher aura une forme irrégulière, pourvu que les haubans aient leur longueur exacte. Une pente continue du plancher sera cependant établie aussitôt que les tiges de suspension auront été soumises à la tension, ce qui amènera le câble à prendre la courbe pour laquelle ont été calculés les haubans, amenant par là ces derniers aussi à travailler sous les efforts de tension pour lesquels ils ont été établis.

