

Zeitschrift: Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes
Band: 15 (1889)
Heft: 7 & 8

Artikel: Pont sur le Firth of Forth près d'Edimbourg
Autor: Meyer, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-15048>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN

DE LA SOCIÉTÉ VAUDOISE

DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

PARAISANT 8 FOIS PAR AN

Sommaire : Pont sur le Firth of Forth, par J. Meyer, ingénieur. (Planches 35 et 36.) — Grandes fermes du palais des machines de l'Exposition universelle de Paris, par R. Kœchlin, ingénieur. (Planche 34.) — La conservation de l'énergie. — Bibliographie : Notes sur la raideur des cordages. — Congrès international de mécanique appliquée. — Septième congrès national et premier international des ingénieurs et des architectes à Palerme. — Travail de l'homme sur une manivelle. — Note sur l'emploi des traits élastiques dans l'attelage de chevaux. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes.

PONT SUR LE FIRTH OF FORTH PRÈS D'EDIMBOURG ¹

par J. MEYER, ingénieur.

(Planches N° 35 et 36.)

Dans notre Bulletin N° 3 de septembre 1881 notre collègue, M. J. Gaudard, professeur, a donné la description du projet primitivement adopté pour le passage de ce détroit, projet dû à M. Bauch, ingénieur, qui avait exécuté le pont de la Tay, écroulé en 1879.

La construction de ce pont, déjà commencée, fut abandonnée ensuite de la catastrophe de celui de la Tay, mais les compagnies de chemins de fer intéressées soit celles du Great Northern, Midland, North Eastern, North British, en présence de l'utilité majeure de ce passage, procurant un raccourcissement de plus de 40 kilomètres pour les relations d'Edimbourg avec le nord de l'Ecosse : Dundee, Inverness, Perth, Aberdeen, etc., ne tardèrent pas à se remettre à l'étude. Divers projets furent présentés, par MM. Harrisson, Barlow et Fowler, enfin un projet dû à MM. Fowler et Baker fut adopté. Ces projets sont décrits dans la note de M. Gaudard que j'ai rappelée.

Dans notre Bulletin N° 4 de décembre 1887, M. Gaudard a donné la description du projet définitif dû à MM. Fowler et Baker.

Ayant eu l'occasion de visiter à la fin de septembre ce gigantesque travail je tiens à vous en entretenir. Je tâcherai d'éviter de répéter ce qu'en a dit notre savant collègue M. Gaudard et me bornerai à en résumer les dimensions principales, insistant surtout sur les procédés de montage employés et l'organisation des ateliers.

La rivière du Forth, comme presque toutes les rivières d'Ecosse s'élargit en golfe (firth) à une grande distance de la côte, c'est ce qui opposait un grand obstacle au tracé direct des chemins de fer et occasionnait de grands détours, qu'ailleurs on avait cherché à abrégé par la construction de grands ponts (Mennie, Tay, etc., etc.). Mais à 12 kilomètres environ à l'ouest d'Edimbourg le golfe du Forth a un étranglement mar-

qué entre Quenserry et Fife. Entre ces deux points se trouve une île, Inch Garvie, qui permet encore d'y placer un point d'appui.

Comme l'a dit M. Gaudard, les grandes ouvertures de ce colossal viaduc sont franchies au moyen du système que les Anglais appellent « Cantilever » et que nous appellerons celui des consoles équilibrées ou avec M. Résal des « ponts grues » à cause de l'analogie de ces consoles avec un bras de grue. Ces consoles sont reliées à leurs extrémités par des travées médianes ou poutres de 106^m676 (350' anglais) de longueur.

Voici les dimensions principales de cet ouvrage :

Longueur totale de l'ouvrage	2528 ^m 500
se décomposant comme suit :	
1. Culée sud y compris une ouverture voûtée	14 ^m 020
2. Seconde ouverture voûtée.	11 ^m 277
3. à 11. Neuf ouvertures à poutres droites, du viaduc d'accompagnement sud, de 52 ^m 719	383 ^m 581
12. Une ouverture à poutres droites du viaduc d'accompagnement sud	54 ^m 558
13. Console ou cantilever sud s'appuyant sur la pile-culée	210 ^m 232
14. Largeur de la tour sud (4 pylônes)	44 ^m 195
15. Ouverture principale sud, composée de 2 consoles (cantilever) et d'une poutre médiane de jonction de 106 ^m 676	521 ^m 198
16. Largeur de la tour médiane (4 pylônes) sur l'île d'Inch Garvie	79 ^m 224
17. Ouverture principale nord comme N° 15	521 ^m 198
18. Largeur de la tour nord (4 pylônes)	44 ^m 195
19. Console ou cantilever nord s'appuyant sur la pile-culée	210 ^m 232
20. Première travée à poutres droites du viaduc d'accompagnement nord	54 ^m 558
21 à 24. Quatre travées du dit à 52 ^m 729	210 ^m 916
25. Ouverture voûtée sud	11 ^m 977
26. » » médiane	9 ^m 449
27. » » nord	14 ^m 020

En ce qui concerne les hauteurs, la face supérieure des rails est à 51^m063 au-dessus du niveau de la mer (0 du limnimètre de Greenwich). Les plus hautes eaux sont à 2^m737 et les plus hautes marées à 3^m353. Sous chacune des travées centrales

¹ Pour la présente note, outre les renseignements recueillis sur place, j'ai puisé aux sources ci-après indiquées : 1° dans la brochure : Sketsches of the forth Bridge by R. Philip Phillips Grant et Son, Edinburch; 2° Revue générale des chemins de fer N° 2 de 1889; 3° Die Forthbrücke von G. Barkhausen. Separatabdruck aus der Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1888.

il y a par les plus hautes marées un passage libre pour la navigation de 45^m819 de hauteur sur une largeur de 125^m377. La hauteur des tours au-dessus de la maçonnerie est de 100^m582 (330') et cette hauteur y compris la maçonnerie jusqu'à la fondation est de 137^m295.

La hauteur des poutres médianes reliant les consoles (cantilever) est de 15^m240 (50') au milieu et de 12^m192 (40') aux extrémités à la jonction des cantilevers. C'est cette dernière hauteur qu'ont aussi les cantilevers à leurs extrémités qui s'y joignent. La hauteur des poutres des viaducs d'accompagnement est de 6^m016 (20') avec la voie au-dessus.

En ce qui concerne les largeurs on adopta une plus grande largeur aux points d'appui des travées centrales qu'en leur milieu, pour mieux tenir compte de la résistance contre le vent, de manière à ce que le vent le plus violent frappant le pont à vide, les assises en maçonnerie, sans tenir compte de l'ouvrage, présentassent une sécurité double contre le renversement. La largeur ainsi choisie est de 36^m575 (120'). Mais dans le sens de la hauteur les parois des consoles aussi bien que les pylônes sont inclinés, de telle manière qu'au sommet leur largeur ou éventrement n'est plus que de 10^m058 (33'). Ce qui correspond à une inclinaison de 1^m75.

A l'extrémité des consoles l'écartement des nervures inférieures est de 9^m60 (31' 6'').

L'écartement des pylônes est de 36^m575 (sens de la largeur) et 44^m194 (sens de la longueur) aux deux piliers de Quens ferry (sud) et Fife (nord) et de 36^m575 et 79^m247 au pilier central d'Inch Garvie.

Piliers en pierre. — Les piliers des viaducs d'accompagnement atteignirent, dans des fouilles à sec, l'argile stratifiée (boulder clay). Pour le dernier pilier de la partie sud on fut obligé d'établir un batardeau.

Les quatre pylônes cylindriques du pilier de Fife ont, au ras du sol, 18^m288 (60') de diamètre. Le groupe du côté de la terre fut fondé en créant, au moyen d'échafaudages en fer, une surface plane dans le roc, à la mine sous l'eau, mais comme cela était trop long, on établit un batardeau.

Pour les deux pylônes du côté de l'eau, on descendit des manteaux en tôle jusqu'aux basses eaux, manteaux surmontés d'une rallonge jusqu'aux hautes eaux. Après avoir aplani la surface on coula du béton.

Au pilier d'Inch Garvie les deux pylônes nord furent traités de la même façon, mais comme les pylônes sud étaient déjà en eau profonde, soit à 24^m689 (81') au-dessous des hautes eaux sur un rocher incliné à 1 : 4 1/2 à découper en gradin, on dut recourir aux fondations pneumatiques par caissons. Le travail fut dirigé par M. Caiseau de la maison Hersent et Couvreur.

Les caissons en tôle fabriqués à Glasgow ont un diamètre inférieur de 21^m336 (70'), un fruit de 1 : 46, et à la partie supérieure un diamètre qui est de 18^m288 (60') soit celui des maçonneries. Le couteau à la partie inférieure est renforcé par un ruban d'acier sur 0^m45 de large et 0^m025 d'épaisseur.

Les fondations pneumatiques durent être aussi employées au pilier de South Quensferry du côté de l'intérieur du golfe. Mais là un accident survint le 1^{er} janvier 1885.

Le caisson avait été amené sur place où il devait être foncé, mais le sol, à cet endroit, étant composé de marnes très fluantes, le poids du caisson le fit pénétrer dans cette vase, et au

lieu de flotter à la marée montante, comme cela aurait dû normalement se faire, il resta fixé au sol par son adhérence. La partie supérieure s'est donc remplie d'eau, et à marée basse le poids d'eau ajouté à celui du caisson qui est du poids de 4000 tonnes, le fit incliner de 25° sur le talus rapide formé à cet endroit par la berge.

Pour le renflouer il a fallu l'entourer complètement d'un bordage parfaitement calfaté et mettre à l'intérieur une poutre circulaire consolidée par de forts étrésillons, pour résister à la pression extérieure de l'eau pendant l'épuisement qui a été fait au moyen de pompes rotatives Groëne.

Ce travail de renflouement, qui a nécessité beaucoup de précautions, a duré sept mois; depuis lors l'opération du fonçage a été poursuivie sans difficultés.

Ces caissons formaient à eux seuls des constructions remarquables et très intéressantes.

La construction métallique est fixée sur les piles au moyen de 48 boulons en acier de 0^m052 de diamètre et 7^m52 de longueur.

Les parements de toutes les maçonneries, leur couronnement et les assises courantes dans les piles sont en grès d'Arbroath et les parements sont en granit d'Aberdeen.

Le cube total des maçonneries s'élève à 107 000 m³, dont 15 000 m³ de granit pour parement.

Le poids des métaux entrant dans la composition de ce pont, presque en totalité de l'acier (plus de 44 000 tonnes), est de 46 180 tonnes.

Le mode d'adaptation de la voie (double voie) sur ce viaduc présente certaines particularités sur lesquelles M. Gaudard, dans ses notes, n'a pas insisté et que j'indiquerai ici.

Il n'y a pas de ballast. La voie est posée sur longrines enfermées dans des caissons.

Sur les viaducs d'accompagnement elle est placée à la partie supérieure des poutres; le caisson des rails extérieurs est placé sur la nervure supérieure des poutres de rail, et les trottoirs sont placés en encorbellement sur consoles. Cette disposition se maintient dans l'intérieur des grandes travées (cantilever) où les poutres portant la voie sont appuyées par des palées ou treillis sur la membrure inférieure tubulaire ou sur de fortes traverses placées entre les parois du couloir. Dans les travées-jonction entre les consoles (cantilever) la voie est placée à la partie inférieure toujours dans des longrines-caissons.

Les caissons sont remplis de béton pilonné sur lequel sont fixés par des boulons des longrines en bois. Les rails sont du type Brunel ou Bridge-rails, rappelant la forme des Zorès. Leur partie supérieure étant à 0^m045 en contre-bas des bouts des caissons, ceux-ci forment contre-rails et ainsi une protection efficace en cas de déraillement, pour ramener les roues dérailées.

Une disposition particulière est celle adoptée pour tenir compte de la dilatation à la jonction des consoles (cantilever) avec la travée médiane. Le jeu de cette dilatation peut aller jusqu'à 610 mm.

Dans cette partie-là le rail Brunel évidé est remplacé par des rails à section pleine ayant la même forme extérieure, identiques à ceux que l'on emploie en Allemagne et dans la Suisse allemande pour la construction des aiguilles. Ces rails sont taillés en biseau à la manière des aiguilles de changement de voie, avec

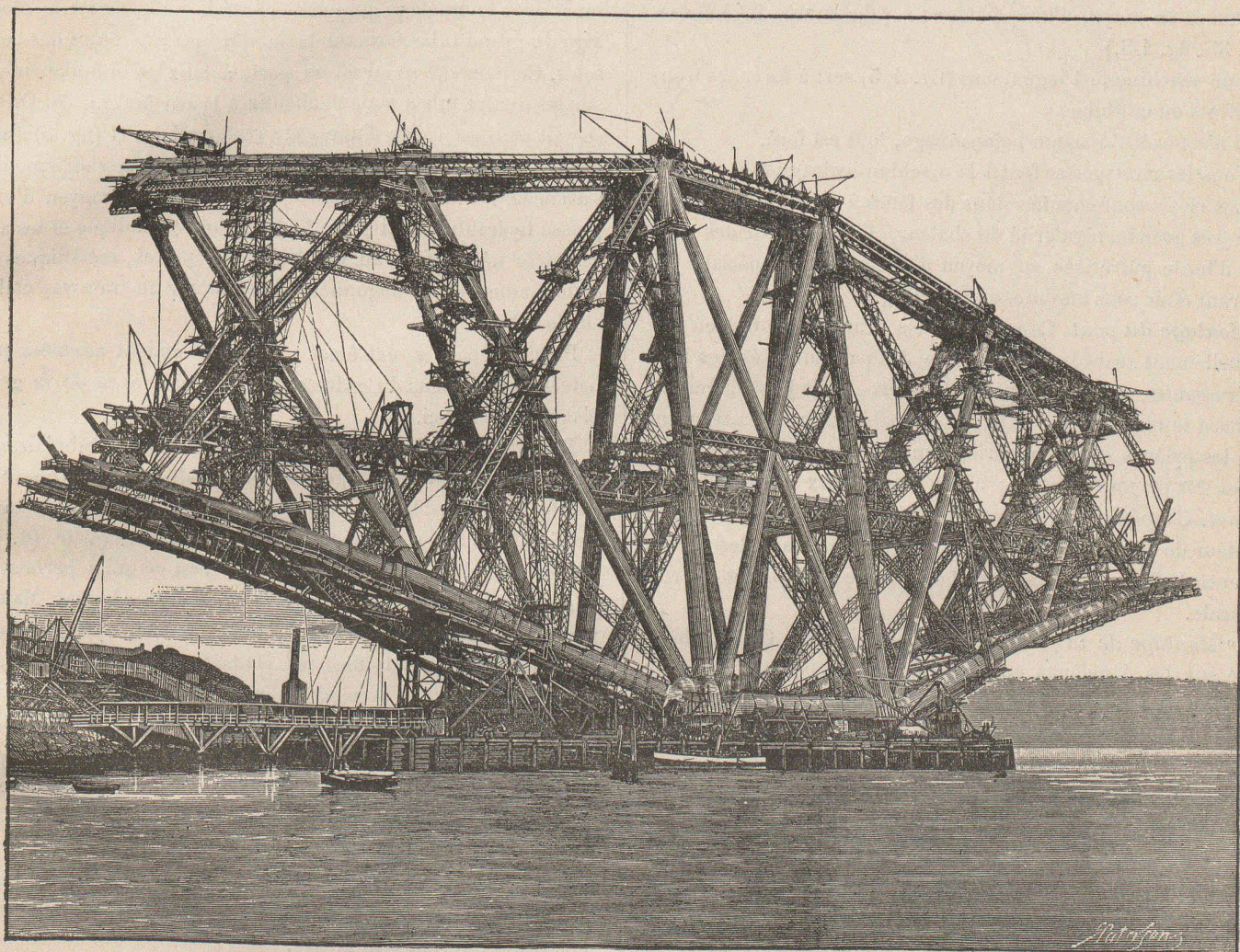
une inclinaison de 1 : 63 et glissent contre leurs faces verticales. Une disposition spéciale de coins faisant ressort, assure le plaquement de ces surfaces et l'écartement constant de la voie.

Nous donnerons maintenant quelques indications sur les procédés particuliers de construction et de montage de ce colossal ouvrage.

Les travaux ont été adjugés le 21 décembre 1881 à MM. Tancred, Arrol et Cie à Glasgow pour le prix à forfait de 1 600 000 livres sterling soit environ 40 000 000 francs. C'est

de travail de $11^{\text{kg}}18$ par mm^2 pour la membrure supérieure, 11 kg. pour les grandes diagonales, $6^{\text{kg}}3$ pour les contreventements horizontaux, 6 kg. pour les contreventements verticaux, $9^{\text{kg}}5$ pour les membrures de la poutre médiane reliant les consoles (cantilever).

Travail du fer à l'atelier. Les entrepreneurs s'étaient assuré sur le côté sud près de Quennsferry un espace de 20 hm^2 situé sur un plateau intermédiaire entre le niveau de la mer ou du golfe (Forth) et le chemin de fer de North British, de



dans leurs ateliers à Glasgow qu'ont été construits les caissons dont nous avons parlé plus haut.

Il n'a été employé que des aciers Siemens-Martin provenant des usines de Landoxe et de la Steel Co of Scotland.

Pour les pièces soumises à la traction on a demandé une résistance à la rupture de $47^{\text{kg}}20$ à 52 kg. par mm^2 , avec un allongement à la rupture de 20 % sur des barreaux d'essai de 203 mm. de longueur ; pour celles soumises à la compression une résistance de $53^{\text{kg}}50$ à $58^{\text{kg}}30$ par mm^2 avec un allongement de 17 % ; pour les rivets une résistance de $42^{\text{kg}}50$ avec un allongement de 30 % et au cisaillement de $34^{\text{kg}}6$ à $37^{\text{kg}}8$. Pour les plaques d'ancrage une résistance de $47^{\text{kg}}2$ avec 8 à 10 % d'allongement.

En tenant compte des efforts subis : poids permanent, surcharge mobile et effort du vent (au sujet duquel des expériences très remarquables ont été faites) on a admis des efforts

Ratho à Quennsferry sur lequel ils établirent leurs chantiers, magasins et ateliers. Ce terrain était relié avec le chemin de fer de North British par un plan incliné et par un autre plan incliné avec un pont de service sur pilotis allant jusqu'à la première pile de cantilever. Ces ateliers admirablement aménagés et outillés, avec un outillage nouveau et perfectionné marchant en grande partie à l'eau comprimée, furent éclairés à la lumière électrique et au lucigène. Ils occupaient 3 à 4000 ouvriers dont une partie étaient logés sur place dans des bâtiments affectés à cet usage et d'autres transportés chaque jour à Edimbourg par un bateau à vapeur frété spécialement pour ce service. (Trajet 1 heure environ.)

Tout le travail d'ajustage, de perçage, de traçage, de rivetage, etc. s'est exécuté sur place dans ces ateliers à raison de 1300 tonnes en moyenne par mois. On procède d'abord au dressage des tôles et des barres de fers spéciaux.

La courbure des tôles de 4^m867 de longueur destinées au tubes des membrures extérieures se fait à chaud. On avait essayé d'abord de le faire à froid, mais il y a eu des ruptures.

On les fait rougir d'une façon uniforme dans des fours à gaz et on leur donne leur concavité au moyen de la presse hydraulique, on les empile, on les recouvre de cendres et on les laisse refroidir lentement, les replaçant de nouveau dans la presse pour leur donner leur forme définitive.

Les extrémités des barres sont sciées à froid et rabattues.

Les tôles cintrées sont travaillées à froid sur leurs bords extrêmes au moyen d'une machine à raboter très ingénieuse. (Pl. 35, fig. 1-3.)

Une machine fort ingénieuse (fig. 4, 5) sert à forer les trous de rivets de ces tubes.

Il n'est exécuté aucun poinçonnage, tout est foré.

Tous les rivetages se font à la machine hydraulique.

Les rivets sont chauffés dans des fours à réverbères donnant une très grande régularité de chaleur, alimentés par des résidus d'huile pulvérisée au moyen d'une machine spéciale par courant d'air sous une pression de 9 kg.

Montage du pont. Ce montage des grandes poutres en encorbellement (cantilever) présente des particularités des plus intéressantes et se compose de deux périodes distinctes, d'abord le montage de la partie centrale des poutres reposant sur les pylônes en maçonnerie, composée des 4 colonnes tubulaires des diagonales et des tubes horizontaux reliant ces colonnes. Cette partie centrale a, nous l'avons dit plus haut, une hauteur de 110 m., la seconde partie est le montage des parties en encorbellement s'arc-boutant de chaque côté sur cette partie centrale.

1° *Montage de la partie centrale ou pylône.* On a d'abord posé sur les 4 pylônes en maçonnerie des plaques en acier destinées à recevoir tout le poids de cette énorme superstructure et à la répartir uniformément sur la maçonnerie. Sur ces plaques on a monté une pièce assez compliquée en forme de V formant la jonction des colonnes verticales, des diagonales, longitudinales et transversales du pont, des tubes horizontaux reliant les colonnes, et du gros tube formant la membrure inférieure de la poutre en encorbellement (cantilever). Le montage de ces différentes pièces a été continué jusqu'à 15 m. environ de hauteur au-dessus de la maçonnerie, c'est jusque-là que pouvaient atteindre les bras des grues établies sur le sol. A partir de cette hauteur de 15 m. le montage s'est effectué au moyen d'une plate-forme mobile AA (fig. 6 et 7) formée de 4 pieux tous en treillis et pouvant s'élever à mesure de l'avancement du montage. Elle est formée de 4 poutres en treillis AA entourant deux à deux les colonnes verticales. Ces 4 poutres placées dans le sens longitudinal sont supportées par des poutres transversales BB (fig. 7) traversant les montants verticaux du pont. Au-dessous de ces poutres les montants tubulaires aux colonnes sont munis d'un appareil de presse hydraulique qui permet de soulever la plate-forme au fur et à mesure de l'avancement du travail. Cette plate-forme avec ses 4 poutres et tous les appareils : machines, grues à levage, etc. qu'elle portait, pesait plus de 500 tonnes. Elle portait aussi des fours à chauffer les rivets, des machines hydrauliques à river montées sur des cadres circulaires C entourant chacun des tubes, et pouvant être levées au moyen de poutres fixées aux tubes (fig. 7

et 8). L'opération se faisait par hauteurs successives de 4^m80 correspondant à la portée des grues. On levait ensuite la plate-forme de 4^m80 par à coups successifs de 0^m30 au moyen des presses hydrauliques logées dans les colonnes tubulaires. Le rivetage s'achevait au-dessous, au moyen de cadres circulaires mobiles entourant les colonnes tubulaires, cadres sur lesquels étaient montées les riveuses hydrauliques. Les grandes diagonales étaient maintenues par des tirants temporaires pour en éviter le flambage.

2° *Montage des poutres-consoles (cantilever).* Simultanément avec le montage du pylône central, on poussait le montage du grand tube formant la membrure inférieure des consoles. Ce montage se faisait en porte à faux et simultanément sur les quatre tubes venant aboutir à la partie centrale. On se servait pour cet usage d'une cage rectangulaire G (fig. 6) s'appuyant sur la partie déjà construite du tube, ce cadre mobile s'avancé au fur et à mesure du montage, au moyen d'une presse hydraulique ; il portait une grue hydraulique et les accessoires nécessaires au montage. Les pièces métalliques y étaient amenées en wagonnets circulant sur un tramway établi sur le tube.

Pour les parties extrêmes ces pièces étaient amenées par bateaux au-dessous du cadre et élevées au moyen de la grue placée sur celui-ci.

Pendant ce montage de la membrure inférieure tubulaire on s'occupait aussi du montage des grandes diagonales formant le treillis de la console (cantilever). Ces diagonales formant croix de Saint-André se coupent vers leur milieu. (Voir Pl. V, bulletin de décembre 1884, p. 40.) C'est ce qui a permis de faire en deux étapes le montage de ces énormes barres. Mais il fallait avant tout soutenir le tube inférieur sur lequel on s'appuyait et qui pesait de tout son poids à son point d'encastrement à sa jonction avec les colonnes verticales, y produisant un moment de flexion considérable. Pendant toutes ces opérations intermédiaires de porte à faux on a eu soin de ne pas soumettre le métal à des efforts plus considérables que ceux qui ont servi de base au calcul définitif et que nous avons indiqués plus haut. On soutint ce tube au moyen de câbles inclinés (haubaus) reliés deux à deux au moyen de tirants horizontaux. On pouvait alors s'appuyer avec sécurité sur cette membrure inférieure tubulaire.

On utilise des poutres en treillis destinées plus tard à former la pièce de pont ou ferme transversale supportant la voie, pour former un montant vertical K (fig. 10) et pour former une plate-forme s'appuyant sur ce montant et celui de la partie centrale, plate-forme analogue à celle décrite pour le montage de la partie centrale. Cette plate-forme pouvait également être soulevée par des presses hydrauliques au fur et à mesure de l'avancement du montage. Pour achever le rivetage on se servait de petites plate-formes I (fig. 10) suspendues par des câbles à des poulies fixées aux diagonales et se déplaçant le long de celles-ci.

Pour monter la membrure supérieure de l'encorbellement (cantilever) et les parties supérieures du treillis de celui-ci entre les deux membrures on assemblait d'abord, sur une certaine longueur, la membrure supérieure, à partir de son encastrement avec le sommet des colonnes tubulaires du pylône central, en se servant pour cela de grues installées sur la

Fig. 1 à 3. Machine pour raboter les extrémités des plaques courbes.

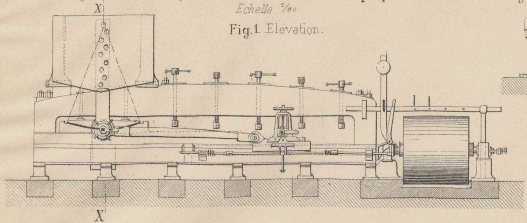
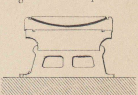


Fig. 1. Elevation.

Fig. 3. Elevation par bout.



Elevation laterale et coupe transversale par XX.

Fig. 2

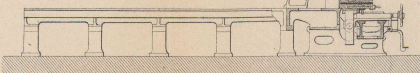


Fig. 4. Section transversale

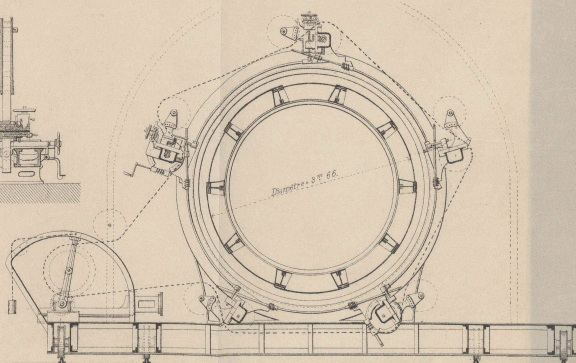


Fig. 12. Elevation générale.

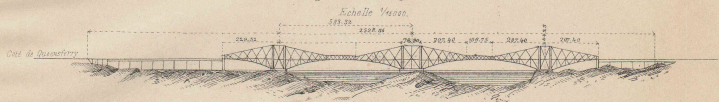


Fig. 6. Elevation longitudinale de la partie centrale inférieure.

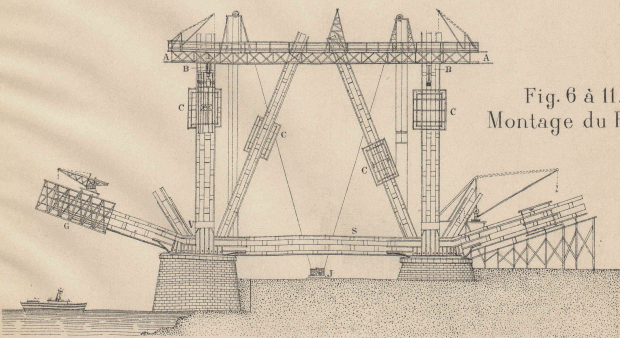


Fig. 7. Elevation transversale de la partie centrale inférieure.

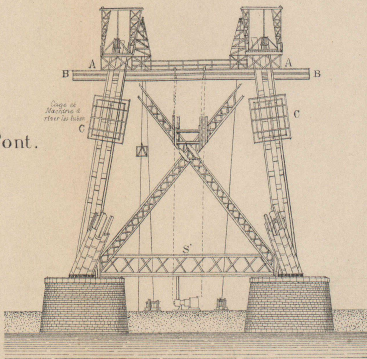


Fig. 4 et 5. Machine à percer les trous des rivets des tubes

Fig. 5. Elevation longitudinale

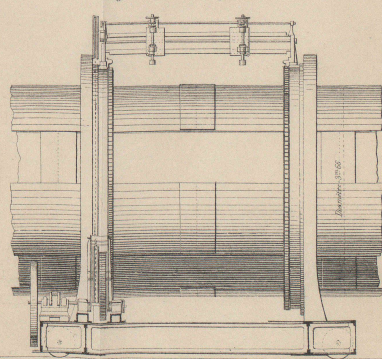


Fig. 6 à 11. Montage du Pont.

Lith. J. Chappuis.

Seite / page

leer / vide /
blank

Seite / page

leer / vide /
blank

plate-forme qui avait servi à monter ce pylône central. Puis à l'extrémité de cette membrure on a installé un chariot mobile ou porte à faux U (fig. 11) sur lequel se trouvent deux grues, l'une à vapeur, l'autre hydraulique, servant au montage des différentes parties de l'ossature de la partie supérieure de la poutre H (fig. 11). Une plate forme suspendue à ce chariot servait aux ouvriers et garant contre la chute d'objets sur les chantiers inférieurs. Ce chariot mobile était avancé au fur et à mesure du montage de la membrure supérieure. Les diagonales étaient, pendant le montage, maintenues temporairement par des supports pour éviter le flambage. Le support temporaire K (fig. 10) formé des treillis destinés à constituer plus tard les pieds du pont supportant la voie, a été élevé jusqu'à la membrure supérieure afin de la soutenir avant son assemblage avec le premier bracon c'est-à-dire avant qu'on eût ainsi constitué un nœud indéformable.

La partie centrale ou médiane reliant les deux consoles (cantilever) a également été montée en porte à faux en s'appuyant sur l'extrémité des consoles, l'extrémité de ces pièces étant soutenue par des câbles (haubans) arrimés sur la membrure supérieure. La jonction de ces pièces montées en deux parties s'est faite par le milieu.

Une machine à vapeur J (fig. 10) placée dans l'axe des pylônes et en bas, actionnait un treuil au moyen duquel, avec des câbles en fils d'acier, on montait les différentes pièces métalliques.

Quant à l'avancement des travaux, à la fin de septembre, la dernière travée-jonction de 106 m. entre les deux consoles du côté sud (Quennsferry) était en voie de montage et très avancée. Ce montage a été terminé dans le courant d'octobre et le pont ne doit pas tarder à être terminé et parcouru par les trains.

GRANDES FERMES DU PALAIS DES MACHINES

DE L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE PARIS

par R. Kœchlin, ingénieur.

(Planche N° 34.)

Le projet des fermes de 115 m. du Palais des Machines est dû à M. Contamin, ingénieur en chef, pour l'établissement des dimensions et des calculs, et à M. Dutert, architecte, pour la partie décorative. Ce projet a été présenté en septembre 1886 à la direction des travaux de l'exposition, qui l'accepta en le modifiant légèrement. En mars 1887 on procéda à une première adjudication en deux lots de la construction métallique de la nef centrale du Palais des Machines, chacun de ces lots comprenant la moitié de ce grand travail. La plus grande partie de la construction devait être en acier. La somme totale prévue était de 2 754 000 francs, le fer et l'acier de la construction proprement dite étant comptés à raison de 41 c. le kg., le fer des arcs verticaux à treillis, des parois latérales, des tympans et des planchers à 30 c. le kg. Cette adjudication n'ayant pas donné de résultat satisfaisant, on procéda au mois d'avril 1887 à une seconde adjudication, mais cette fois pour des fermes en fer. La somme totale prévue pour les deux lots était de 3 227 140 francs, le fer étant compté à 45 c. le kg. pour la construction proprement dite des fermes et à 38 c. pour les arcs verticaux, les parois latérales, les tympans et les plan-

chers. Le premier des deux lots fut adjugé à la Compagnie de Fives-Lille moyennant un rabais de fr. 0,20 %, le second à la Société des anciens établissements Cail, moyennant un rabais de fr. 0,10 %.

Nous donnons ici (fig. 1) une vue perspective de la Galerie des Machines. Nous ne parlerons pas des galeries adjacentes qui ne présentent qu'un faible intérêt et nous nous contenterons de donner quelques détails complémentaires sur la construction et le montage de la nef centrale.

Tracé de l'arc (fig. 2 de la planche 34). L'arc à trois rotules du Palais des Machines a la forme d'une ogive surbaissée. Sa portée d'axe en axe est de 110^m60, la hauteur du tourillon supérieur au-dessus du sol est de 44^m99. La courbe de l'intrados se compose d'abord d'une partie droite verticale, puis d'un arc de cercle de 22^m679 de rayon, d'un arc de cercle de raccord de 186^m836 enfin d'une partie droite jusqu'au sommet. L'extrados a une forme analogue à celle de l'intrados. Le premier cercle a le même centre et 26^m379 de rayon, le cercle de raccord a 222^m799 de rayon et n'a pas le même centre que celui de l'intrados, de façon à faire varier la hauteur de poutre de l'arc de 3^m70 à la naissance, à 3 m. au sommet.

L'arc est divisé en grands et petits panneaux se succédant alternativement. Cette disposition, tout en rompant la monotonie qu'aurait un arc à panneaux égaux, permet de placer les pannes, qui sont dans des plans verticaux, au droit des croisillons des petits panneaux. La division en panneaux est faite de façon à maintenir le même écartement de 10^m59 entre deux pannes consécutives. Les montants concourent tous au centre de courbure de la portion de l'arc dans laquelle ils se trouvent. L'espacement d'axe en axe des fermes est de 21^m50.

Sections des éléments de l'arc (fig. 3). Les membrures de l'arc se composent chacune de 2 âmes de 450 × 9 laissant entre elles un vide de 400 mm. Ces deux âmes sont reliées entre elles par une semelle de 750 × 7 et 4 cornières de 100 × 100 × 10. Cette section courante est renforcée entre la panne 4 et la naissance de l'arc par plusieurs semelles. A l'endroit le plus fatigué de l'intrados, là où vient se raccorder le tympan, les semelles sont au nombre de 6, la semelle courante de 750 × 7, 4 semelles de 750 × 8, enfin une semelle de 750 × 10 qui ne règne que sur une longueur de 9^m30. L'extrados présente les mêmes sections, mais la sixième semelle est remplacée par les cornières d'attache du tympan, qui n'a pas été pris en considération dans les calculs de l'arc.

Les montants, qui viennent se fixer entre les deux âmes des membrures, se composent d'une âme de 382 × 7 et de 4 cornières de 80 × 60 × 7. Cette section est renforcée, à partir de la panne 5 par deux semelles de 200 × 10. Les croisillons ont une section analogue aux montants. Au croisement de 2 croisillons, la barre comprimée est coupée pour laisser passer la barre tendue. L'assemblage se fait au moyen de deux couvre-joints et de 4 fers plats pliés en équerre à l'angle voulu.

Panneau supérieur et panneau inférieur (fig. 4 et 5). Le panneau supérieur qui vient s'appuyer sur le tourillon de 35 cm. de diamètre, présente la disposition indiquée dans la figure 4. La poussée horizontale agissant sur ce tourillon est de 74 950 kg. au cas ordinaire, de 114 300 kg. dans le cas d'une surcharge de neige et de 119 840 kg. dans le cas d'un vent d'une vitesse de 40 m. par seconde. Cette poussée est