

PONT SUR LA RIVIÈRE DE TAY, PRÈS DUNDEE,

Par M. J. MORANDIERE, Ingénieur.

Pl. XII et XIII.

Le pont sur la rivière de Tay, livré à la circulation dans le courant de 1878, déjà célèbre par sa grande longueur de plus de 3 kilomètres et les difficultés de sa construction, vient d'acquérir une nouvelle et triste notoriété par l'accident du 28 décembre 1879. Ce jour-là, à 7 h. 1/4 du soir, pendant une effroyable tempête de vent, et au moment où l'express se rendant d'Edimbourg à Dundee venait de s'engager dans les plus grandes travées, ces dernières, au nombre de 13, ont été toutes précipitées dans l'abîme, avec la presque totalité de leurs piles métalliques et en occasionnant la mort de plus de 80 personnes.

Deux opinions se trouvent en présence sur les causes de cette chute ; d'après la première, la pression du vent aurait amené le renversement des piliers métalliques dont l'établissement ne paraîtrait pas présenter toutes les garanties de solidité voulues ; d'après la deuxième, le train ayant déraillé par l'effet du vent aurait détruit des pièces importantes de l'une des travées qui se serait rompue, entraînant dans sa chute le train, les autres travées et les piles.

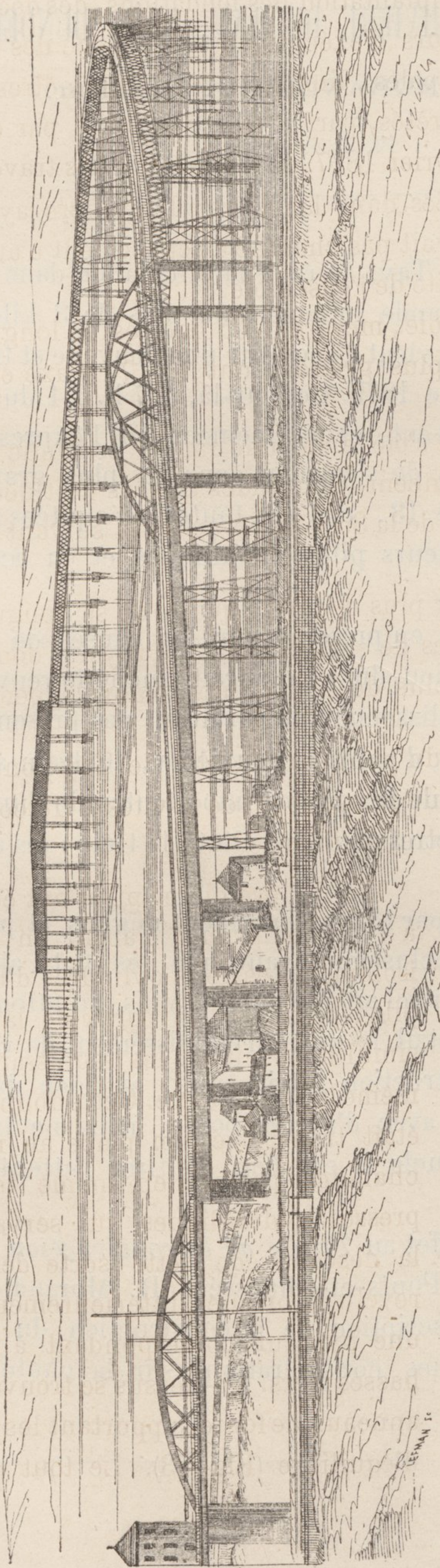
Une enquête a été ouverte par le gouvernement anglais et par suite il est impossible d'émettre des conclusions avant que les faits aient été tous recueillis et que le rapport officiel ait été publié. Mais, en attendant, il nous est loisible d'examiner en détail le mode d'établissement de ce pont, et de rechercher si, dans sa construction intrinsèque, ou bien dans la comparaison qui peut en être faite avec d'autres ponts, nous ne trouvons pas à signaler des points sur lesquels il est bon d'attirer l'attention des ingénieurs.

Nous emprunterons à cet effet au *Traité de la construction des ponts* de M. l'Inspecteur général des Ponts-et-Chaussées R. Morandiere, quelques pages donnant d'abord la description de la construction du pont de Tay et présentant ensuite quelques considérations sur la chute des grandes travées (1).

(1) 4^e fascicule. Actuellement sous presse.

§ I. — DESCRIPTION DU PONT.

Fig. 52. — Vue d'ensemble du pont sur la rivière de Tay, près Dundee.



Le golfe de Tay (*Firth of Tay*) sur la côte Est de l'Écosse, forme une échan-crure profonde et très large que les chemins de fer avaient dû contourner à l'o-rigine. Plus tard un service spécial de bateaux avait été organisé à Broughty-Ferry (Fig. 1, Pl. XIII), en atten-dant l'établissement d'un pont dont l'idée première, remontant dit-on à 1849, fut émise en 1854 par M. Bouch, alors chef d'exploitation de la ligne du chemin de fer d'Edimbourg à Dundee. Le projet fut sérieusement repris en 1864, et la Compagnie dite du « North-British », fut enfin autorisée par un acte du Parlement de 1870, à entreprendre ce gigantes-que travail qui a été livré à la circulation le 31 mai 1878.

Dans la réalisation du projet, il a fallu toute la ténacité anglaise pour lutter avec les difficultés matériel-les et avec les éléments.

La détermination de la position du pont, basée prin-cipalement sur la considé-ration de ne pas gêner le mouvement du port de

Dundee, ville très commerçante, de 120,000 âmes, n'avait été précédée que de rares sondages. De là, dans l'implantation des fondations, des déconvenues, qui ont conduit à changer, en cours d'exécution, et le mode des fondations et la longueur des travées principales, limitée d'abord à 60 mètres.

Les travaux ont été souvent arrêtés, parfois même détruits par de violents ouragans. C'est ainsi que le 2 février 1877, deux des grandes travées et une travée de 44 mètres sont tombées dans la rivière, les piliers ayant cédé, l'ouvrage étant inachevé, on n'avait pas cherché à cet accident d'autre explication que le manque de solidarité de l'ensemble.

Le pont qui n'a qu'une seule voie, mesure 3155 mètres de longueur, et se compose de 85 travées dont les plus grandes ont 74^m.70 d'axe en axe des piles (Planche XII).

En partant de la rive sud, on s'élève par une rampe continue de 0^m0087 jusqu'à la pile N° 28, où commencent les grandes travées destinées à livrer passage à la navigation; à partir de la 36^e pile on descend suivant une pente de 0^m.0137 vers la rive nord.

Le pont est en ligne droite sur plus des trois quarts de sa longueur; aux deux extrémités sont des courbes de 400 mètres de rayon, dont la plus longue, celle de la rive nord, a plus de 600 mètres de développement.

FONDATIONS. — Les fondations du pont sur le golfe de Tay, ont présenté beaucoup de difficultés par suite de la marée, et de la vitesse du courant, qui dépasse ordinairement 6 kilomètres à l'heure.

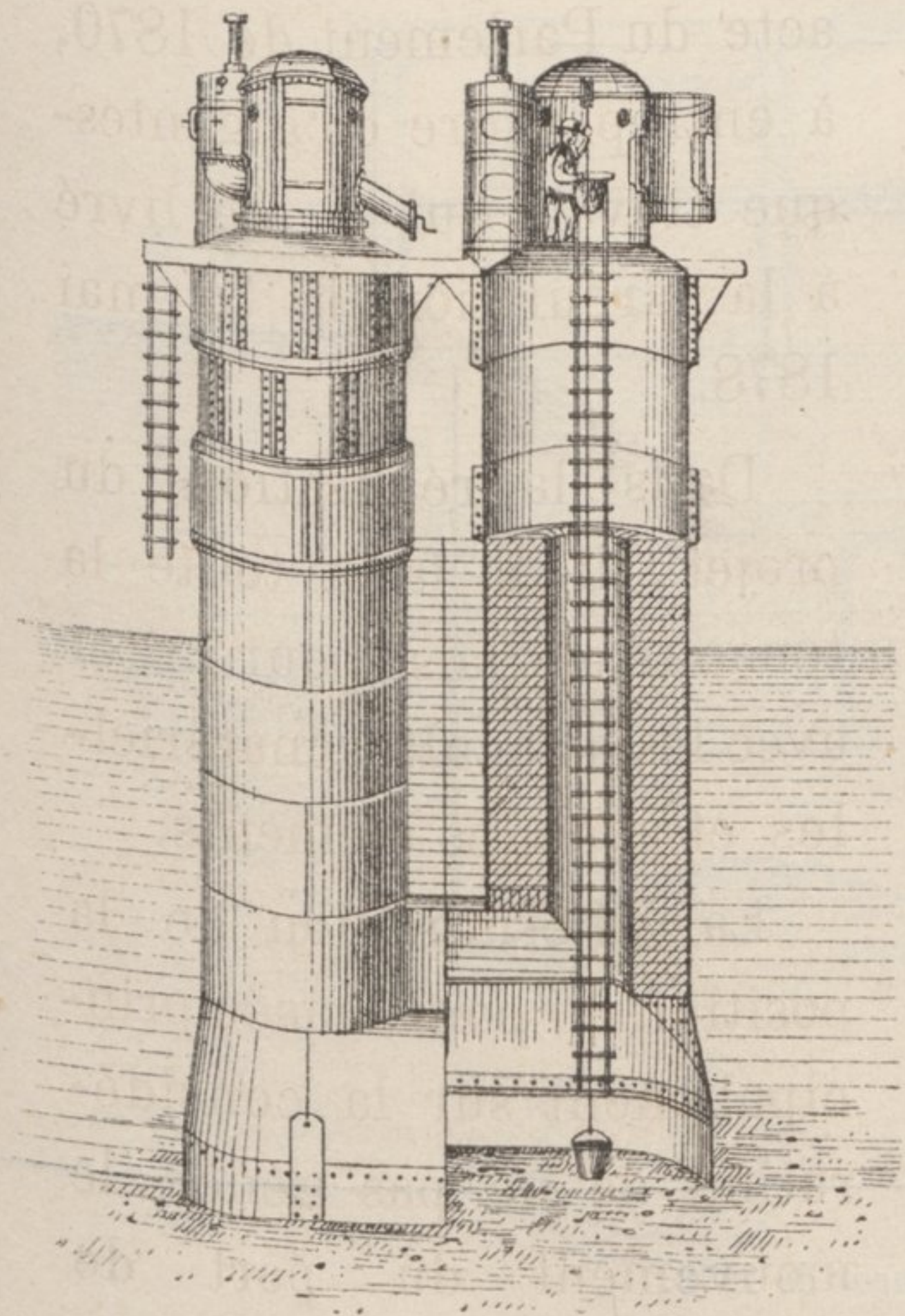


Fig. 53.

Les 14 premières piles ont été fondées à l'air comprimé, d'abord en enfonçant isolément les deux cylindres d'une même pile, plus tard, à partir de la dixième, simultanément en les réunissant sur une même base oblongue. Cette double colonne était transportée en place au moyen de chalands portant en même temps des presses hydrauliques qui servaient pour la descente de cette sorte de caisson, revêtu de briques, intérieurement, jusqu'à une hauteur correspondant à celle des basses mers. Au-dessus se trouvaient trois anneaux de fonte supportant les chambres d'équilibre (Fig. 53). Le tout pesait en-

viron 140 tonnes. Deux équipes de 6 hommes travaillaient à la fois au fond du caisson.

Lorsque la pile était descendue à la profondeur voulue, les anneaux de fonte étaient remplacés par une sorte de batardeau en tôle, s'élevant à 1^m.80 au-dessus du niveau des hautes mers et on complétait la maçonnerie.

La quinzième pile avait été aussi fondée par ce procédé; mais comme le rocher disparaissait en plongeant sous la mer, la pile s'inclina, et il fallut la démolir pour la remplacer par une autre bâtie sur pilotis. En même temps on se décida à faire des piles métalliques à partir du niveau des hautes mers (1).

On fit venir de Hollande des ouvriers spéciaux pour enfoncer des pieux atteignant quelquefois 14 mètres de longueur.

Un caisson sans fond en tôle, ayant 12^m.20 de hauteur, de manière à dépasser toujours légèrement le niveau des hautes mers, ayant 7^m.20 de long sur 4^m.20 de large, était construit sur la berge, et garni à mi-hauteur d'un revêtement de briques de 0^m.38 d'épaisseur. Il était alors transporté par l'intermédiaire de pontons et descendu jusqu'au fond du lit de la rivière, au moyen de presses hydrauliques. L'intérieur du caisson était ensuite dragué à l'aide d'une sorte de pompe à sable spéciale due à M. Reeves (Fig. 54).

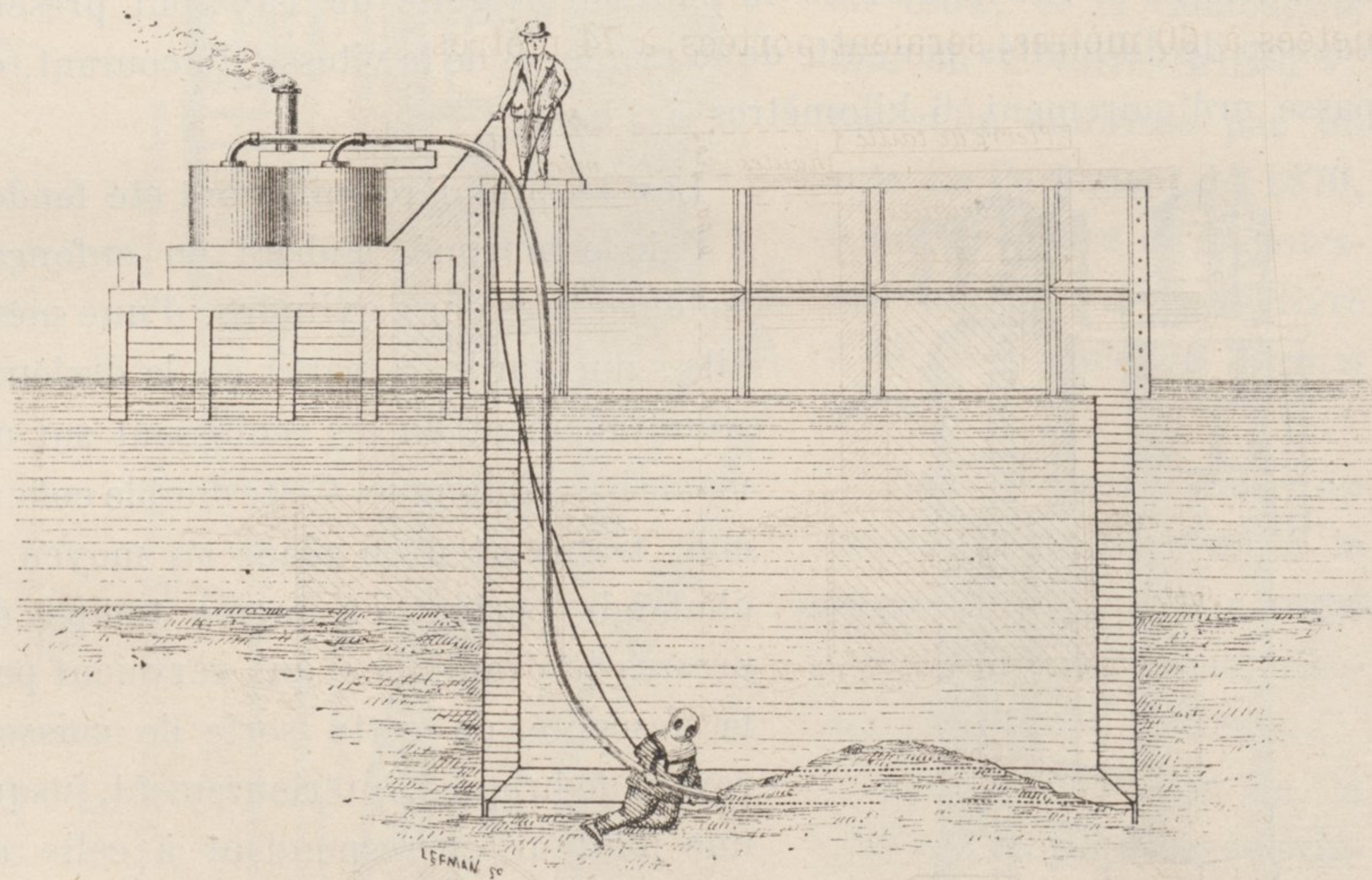


Fig. 54.

(1) Voir un compte-rendu de l'accident dans le journal *The Engineer* de 1873.

Cette pompe portée sur un ponton était constituée par des cylindres de 1^m,50 de diamètre, en tôle, cubant 1^m,70, dans lesquels on faisait successivement le vide au moyen d'une pompe à vapeur spéciale. Chaque cylindre vide était mis en communication avec le fond de sable au moyen d'un tuyau flexible guidé par un plongeur, et aspirait un mélange composé d'environ deux tiers d'eau et un tiers de sable. Deux minutes et demie environ suffisaient pour remplir un récipient, et le total des matériaux enlevés chaque jour, s'élevait en moyenne à 100 tonnes.

Une fois le draguage fait, on coulait un massif de béton sur lequel on amenait une pile creuse, en briques, construite sur la berge. La base de cette pile était alors encastrée de 1^m,20 environ dans un lit de béton, et le milieu était rempli de béton. Cette pile ayant 6^m,10 de longueur, sur 3^m,05 de largeur, dépassait le niveau des basses mers et elle était continuée, à chaque marée, entièrement en briques jusqu'au niveau des hautes mers; elle était alors couronnée, sur une hauteur de 1^m,50 environ, d'un socle en pierres de taille.

Cinq piles ont été fondées sur pilotis, les autres ont pu être assises sur une couche suffisamment solide d'argile et de gravier, à des profondeurs d'environ 4^m,50.

En cours d'exécution il fut décidé que l'ouverture des travées du milieu, projetées à 60 mètres, seraient portées à 74 mètres.

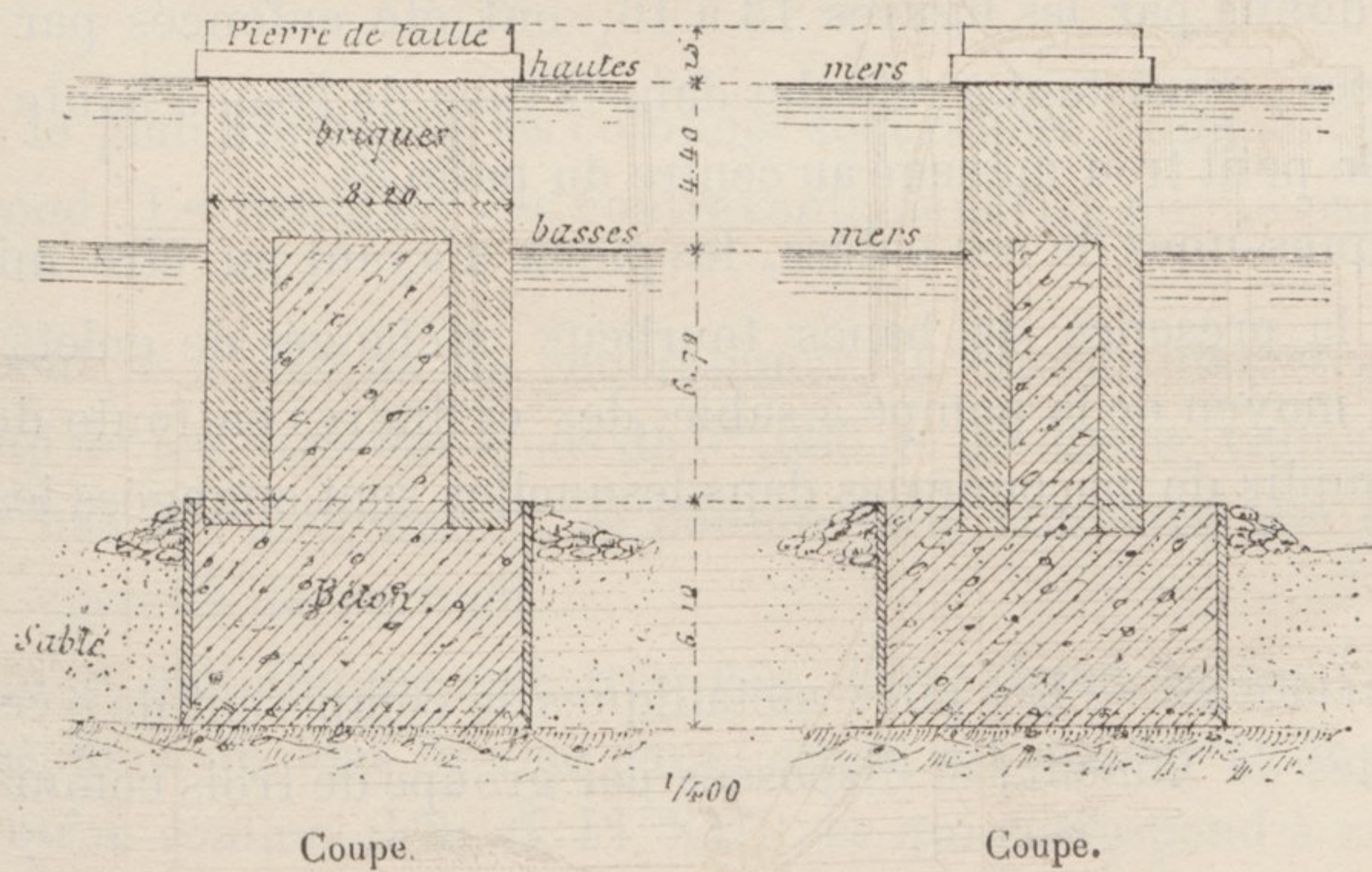
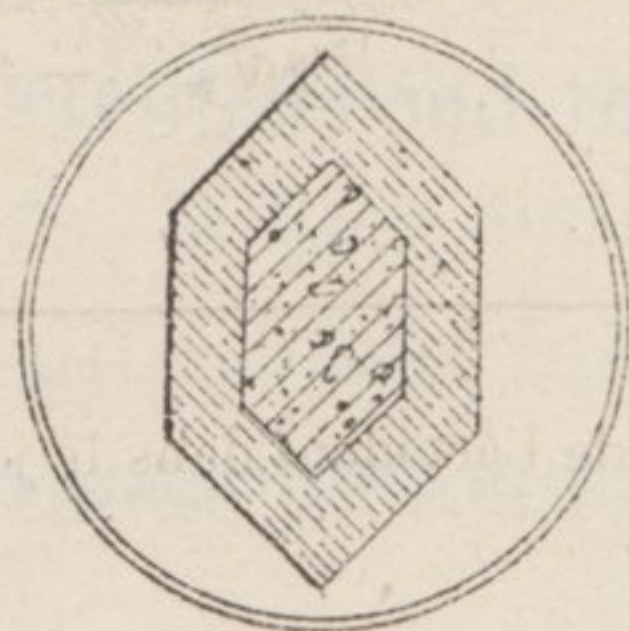
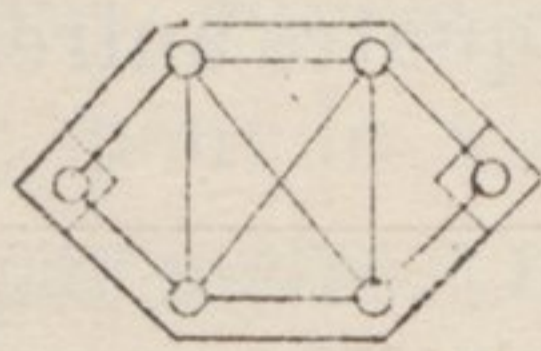


Fig. 55



Pour ces grandes travées, le poids à supporter devenant plus considérable, le massif des fondations a été élargi. Un caisson en tôle de 9^m,50 de diamètre et de 13^m,70 de hauteur, portant sur 6^m,10 de hauteur un revêtement intérieur en briques, le tout pesant environ 200 tonnes, était amené à demi immergé, et supporté par des pontons jusqu'à l'emplacement désigné; il était alors dragué et rempli de béton. Sur cette base s'élevait une pile hexagonale en maçonnerie ayant 8^m,20 de longueur sur 4^m,90 de largeur, couronnée au-dessus du niveau des hautes mers, par 6 colonnes en fonte, formant pile métallique.

Après les grandes travées, en se dirigeant vers le nord, les piles, jusqu'au numéro 53, ont été fondées sur le principe des doubles cylindres se tenant par la base, d'un diamètre de 4^m,70 surmontés également par six colonnes en fonte.

PALÉES MÉTALLIQUES. — A partir de la pile n° 54, on est dans la courbe de 402 mètres de rayon, et les piles sont remplacées, à peu près une fois sur quatre, par des palées composées d'une seule rangée de colonnes: celles-ci sont fichées dans la maçonnerie remplissant les cylindres en fonte de grand diamètre qui ont servi aux fondations, et se terminent à 1 mètre au-dessus du niveau des hautes mers.

Enfin, en approchant du rivage, on trouve des palées formées de pieux à patins en fonte, et munies de jambes de force (Fig. 7, Pl. XIII). Ces pieux, dont le détail est donné par les figures 13 à 16, ont été enfoncés par le procédé de M. Brunlees, consistant à refouler dans le tube de l'eau à haute pression, qui sort par le petit trou ménagé au centre du patin (1).

Pour quelques-unes de ces palées, les pieux n'ayant pu être mis en place par suite de la présence de bancs tourbeux mélangés de galets, on a dû enfoncer, au moyen de la pompe à sable, des cylindres en fonte de 1^m,80 de diamètre, remplis de maçonneries dans lesquelles sont engagées les colonnes en fonte.

PILES MÉTALLIQUES. — Les piles métalliques se composent de 6 colonnes en fonte, remplies de ciment, et disposées par groupe de trois comme l'indique la figure 55.

Pour les grandes travées le diamètre est de 0^m,046 dans les colonnes extrêmes ou d'avant-bec et de 0^m,038 pour les quatre autres. L'épaisseur de

(1) R. Morandière. *Traité de la Construction des Ponts*, page 142.

la fonte est de $0^m,025$. Ces colonnes fondues en longueurs de $3^m,30$ sont assemblées avec des brides (Fig. 56), traversées chacune par 8 boulons de $0^m,028$. A leur extrémité inférieure elles reposent sur des embases en fonte fixées seulement aux deux assises supérieures de pierres formant le socle de la pile. Au sommet chacun des groupes de trois colonnes est relié par un sommier triangulaire en tôle sur lequel sont fixés les supports des travées.

Les colonnes portent des oreilles venues de fonte et destinées à recevoir les pièces de contreventement qui existent dans huit plans différents (Fig. 55).

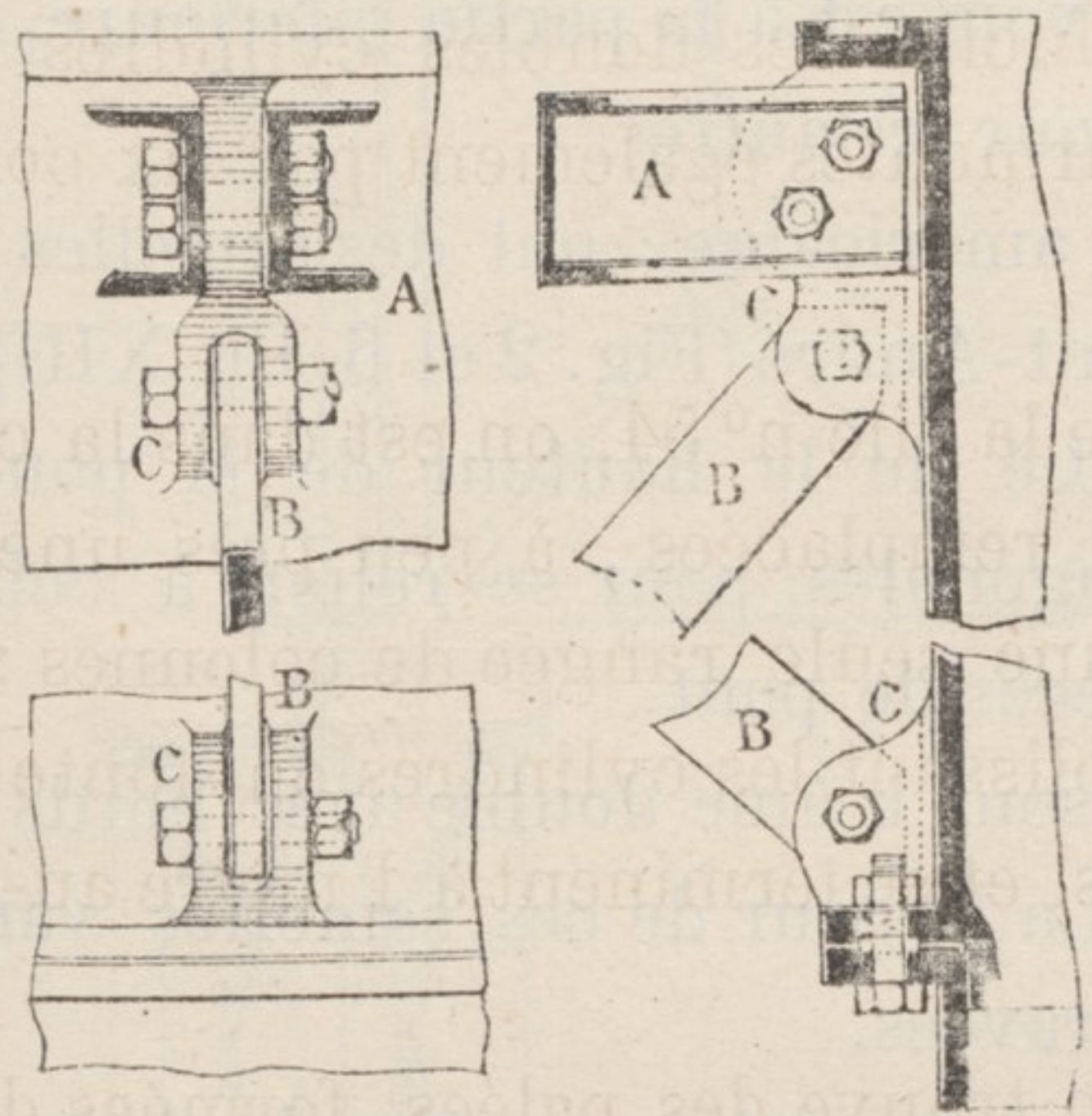


Fig. 56.

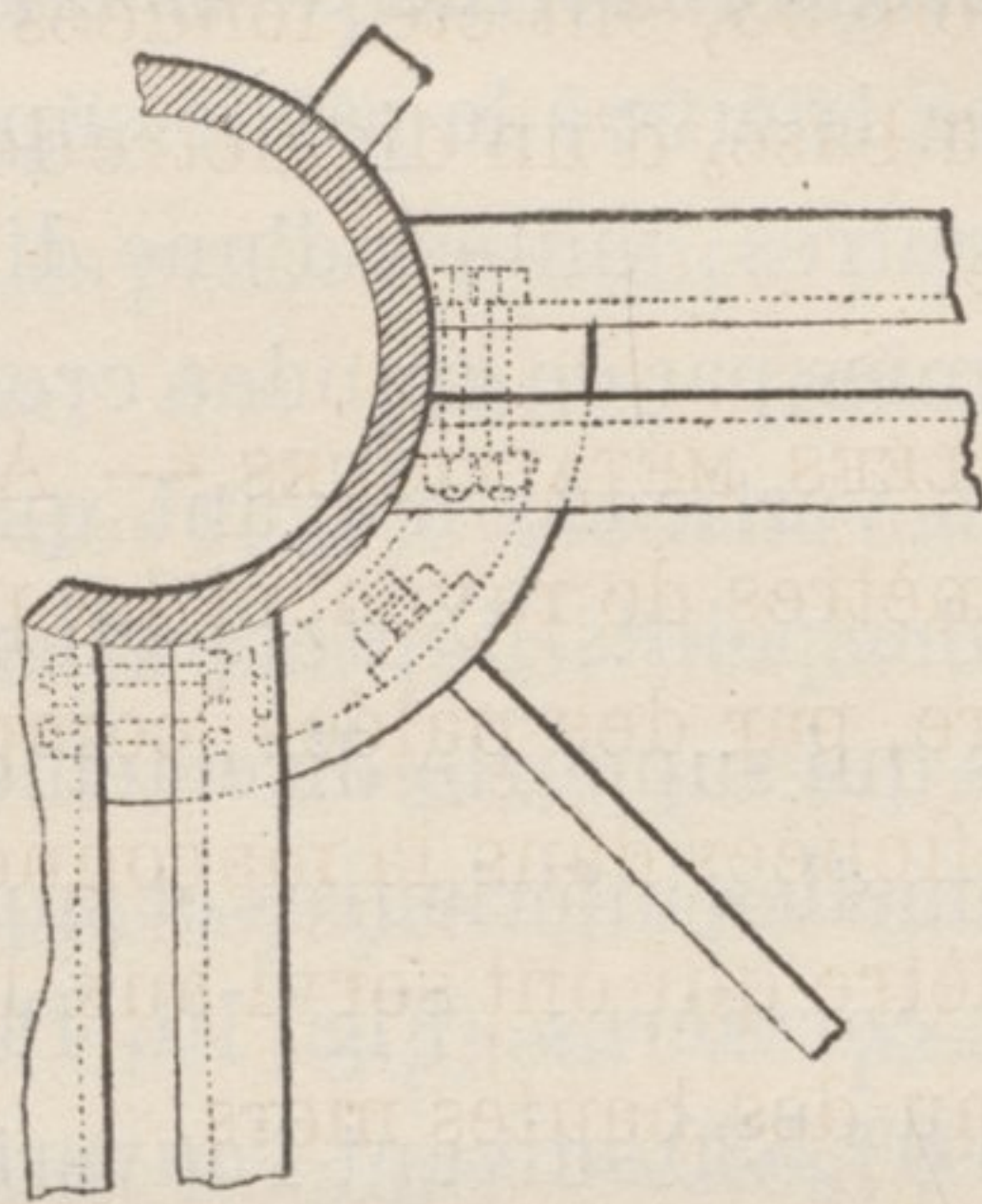


Fig. 57.

Dans le plan horizontal les colonnes sont reliées seulement par des tringles de fer rond. Le détail de ces contreventements est donné par les figures 56 et 57.

Les boulons d'attache ont généralement $0^m,028$ de diamètre, entrant avec beaucoup de jeu dans des trous de $0^m,035$ de diamètre, venus de fonte; mais dans le bas des diagonales, le boulon était remplacé par un emmanchement à clavette de serrage.

Ces piles métalliques ont très peu d'empatement, car l'écartement des colonnes, dans un sens comme dans l'autre, est seulement de $0^m,60$ de plus à la base qu'au sommet (Fig. 6, Pl. XIII), ce qui correspond à un fruit de moins de $0^m,03$ par mètre.

Pour le viaduc sur la Sarine près de Fribourg, à deux voies, ce fruit est de $0^m,085$; pour le viaduc de la Cère, à une seule voie, le fruit a été porté à $0^m,12$ par mètre. On aperçoit de suite, dans la faible largeur de base des piles du pont de Tay, l'influence du mode de fondation adopté; l'emploi

d'un caisson cylindrique ne permettant évidemment pas une bonne répartition de la surface totale.

Les piles métalliques des petites travées sont disposées de même que celles qui viennent d'être décrites ; toutefois le diamètre des colonnes est moindre, et il est respectivement de 0^m,380 et 0^m,305.

Les piles des grandes travées s'élèvent à 26^m,80 au-dessus de l'eau ; mais les piles les plus hautes au-dessus des fondations, ayant 52 mètres depuis la pointe des pieux, jusqu'aux rails, se trouvent du côté Sud.

TRAVÉES. — Pour toutes les travées destinées à la navigation ainsi que pour deux travées en forme de *bow-string*, la voie est à la partie inférieure, tandis qu'elle se trouve à la partie supérieure pour les autres.

Les poutres, imitées d'une disposition américaine, ont des semelles parallèles réunies par de grandes croix de Saint-André (Fig. 2 et 6, Pl. XIII), avec montants verticaux n'ayant que la moitié de la hauteur de la poutre et partant des points d'intersection des diagonales, pour se relier à celle des semelles qui supporte directement les pièces de pont.

Les semelles inférieures et supérieures sont à âme double avec bords raidis par des cornières (Fig. 10, Pl. XIII). La largeur de ces semelles varie de 0^m,305 à 0^m,530 suivant l'ouverture des travées.

Les diagonales travaillant à la compression, ont en section la forme d'un double T (Fig. 11, Pl. XIII). Celles qui travaillent à l'extension se composent seulement de deux lames de tôle de 13 millimètres d'épaisseur, qui embrassent les autres diagonales (Fig. 12).

Les pièces de pont des grandes travées affectent la forme d'un solide d'égale résistance, et viennent reposer sur les bords des semelles (Fig. 17).

Leur espacement est d'environ 1^m,53 d'axe en axe. Elles sont percées de deux en deux, d'une ouverture médiane destinée à laisser passer les barres plates des croisillons formant le contreventement horizontal.

Les pièces de pont étant relativement rapprochées, les longerons en métal n'existent pas et sont remplacés par de fortes longrines en bois supportant les rails et les contre-rails.

Pour les petites travées, les pièces de pont consistent en grosses traverses de chêne.

Des coupures sont ménagées en 21 points divers pour la dilatation, les grandes travées étant divisées, croit-on, en trois groupes, le premier composé de 5, les deux autres formés de 4 travées chacun. A la jonction des grandes travées avec les petites, la pile était surmontée d'une sorte de coffrage métal-

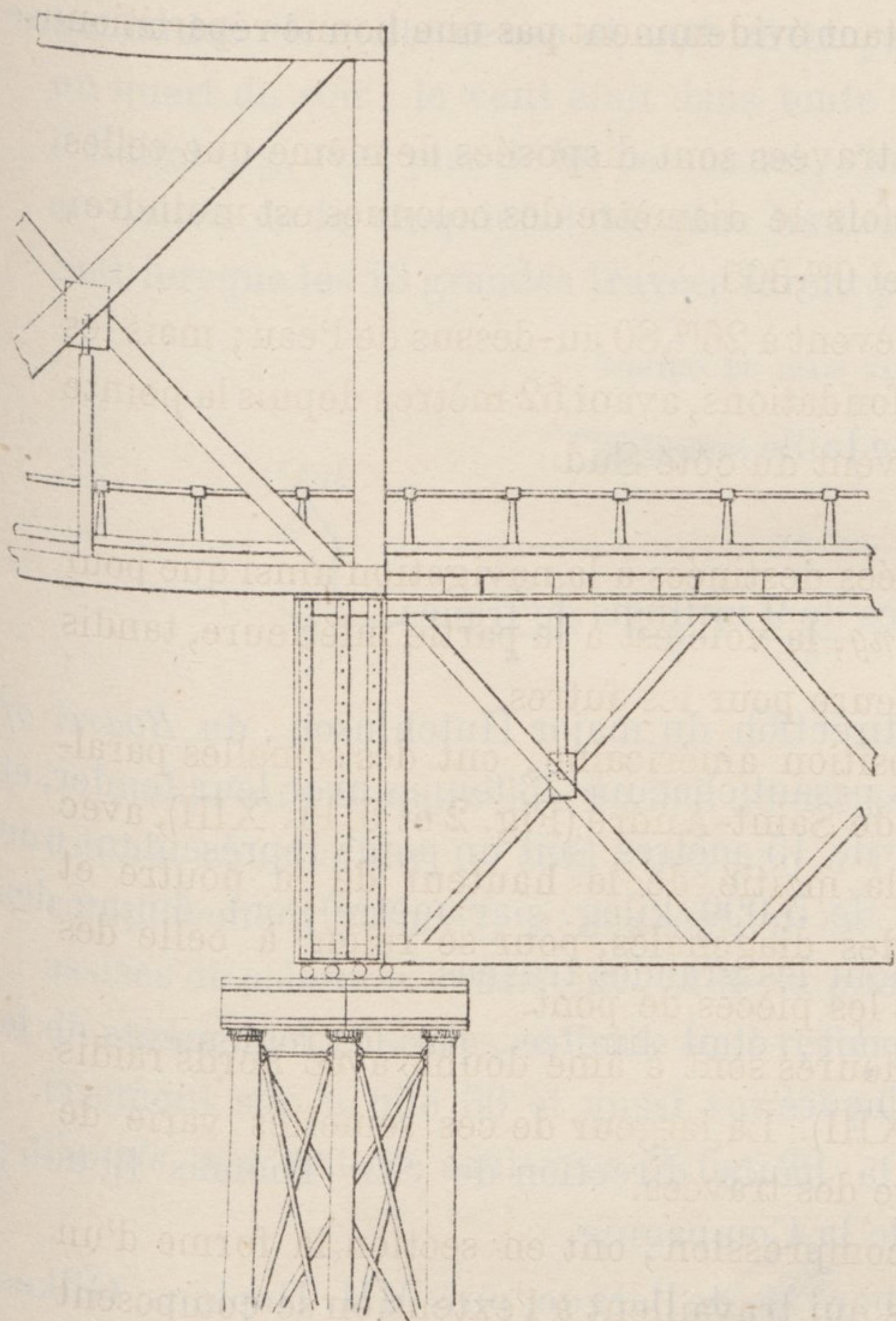


Fig. 58.

lique, prolongeant la petite travée et recevant les supports des grandes poutres (Fig. 58).

Le levage des travées s'est opéré au moyen de presses hydrauliques; pour les grandes travées on mettait en place les quatre colonnes du milieu, et on les surmontait de poutres longitudinales L (Fig. 8 et 9, Pl. XIII). Les presses R étaient portées par des poutres transversales T, et levaient au moyen de la poutre S. Des boulons *b b*, servaient à assurer la reprise, après chaque montée d'une longueur de piston; huit hommes levaient 6^m,60 par jour.

Les poids des parties principales de l'ouvrage sont (1):

<i>Grandes travées.</i> — Deux poutres principales et contreventements	240 ^T »
Pièces de pont	12 »
Planchers en bois, de 0 ^m .15 d'épaisseur	40 »
Rails et contre-rails, coussinets et divers	28 »
ENSEMBLE	320^T »
<i>Grandes piles.</i> — Six colonnes	44 ^T »
Béton remplissant les colonnes	39 »
Contreventements horizontaux	10 »
Diagonales de contreventements	5 »
Divers	12 »
ENSEMBLE	110^T »

(1) *The Engineer*, 30 janvier 1880.

L'énumération des matériaux entrés dans la construction de cet immense ouvrage est la suivante (1) :

3520 tonnes de fonte.
6280 tonnes de fer et tôles ;
8600 tonnes de ciment.
4.350.000 briques.
800 mètres cubes de pierres de taille ;
2500 mètres cubes de bois.

Le prix total s'est monté à près de 9 millions de francs.

Les épreuves faites sous la direction du major Hutchinson, du *Board of Trade*, à l'aide de 6 locomotives pesant chacune 73 tonnes avec leur tender, et occupant chacune une longueur de 15 mètres (soit un poids représentant une charge uniformément répartie de 5.000 kilog. par mètre), ont donné des flèches de 30 à 42 millimètres pour les grandes travées.

La vitesse au passage du pont, était limitée, par les règlements de la Compagnie, à 40 kilomètres à l'heure.

Le pont a été construit sous la haute direction de *Sir* Thomas Bouch ; M. Paterson étant l'ingénieur de la Compagnie.

Les entrepreneurs ont été d'abord M. de Bergue, puis MM. Hopkins, Gilkes et C^{ie}, de Middlesborough, et les ingénieurs de l'entreprise ont été MM. Austin, Grothe, Reeves, etc.

§ II. — CHUTE DES GRANDES TRAVÉES.

Le 28 décembre 1879, une violente tempête de vent traversait l'Écosse, très sensiblement de l'ouest à l'est, passant au-dessus de Glasgow pour aller s'engouffrer dans la vallée au fond de laquelle coule la rivière de Tay. Plusieurs fois dans la journée les anémomètres de l'observatoire de Glasgow enregistrèrent des vitesses du vent s'élevant de 96 à 115 kilomètres à l'heure, et le professeur Grant pense que la vitesse du vent dans la vallée a pu s'élever, à plusieurs moments, à 144 kilomètres à l'heure ; la pression correspondante

(1) Gustave Meyer, *Die Tay-Brücke*. Notice insérée dans les *Annalen für Gewerbe und Bauwesen*, de Glaser. Année 1878, n^{os} 35 et 36. Les dessins des planches XII et XIII, sont, pour la plupart, empruntés à cette notice.

à cette dernière vitesse est de 200 kilog. par mètre carré (1). A sept heures un quart du soir, le vent était dans toute sa force lorsque l'express venant d'Edimburg, avec plus de 80 personnes, s'engagea sur le pont. Il allait arriver au-dessus de la cinquième des plus hautes piles (n° 33 en partant de la côte Sud) lorsque les 13 grandes travées furent précipitées dans la rivière (Fig. 59).

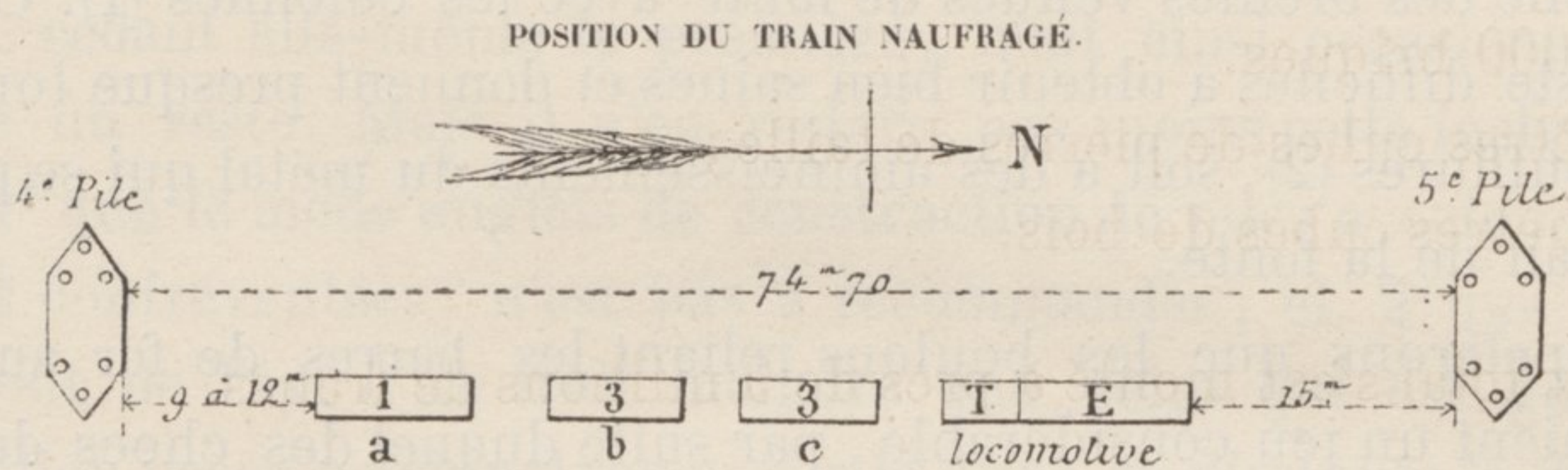


Fig. 59.

Lorsqu'on put approcher du lieu du désastre, on constata que le tablier était tombé, couché sur le côté, très peu à l'Est des piles. Ces dernières sont complètement ruinées, à l'exception de la pile 36 où les deux dernières assises de colonnes subsistent, et de la pile n° 31 où il reste encore une assise de colonnes. Les socles en fonte sont restés fixés aux maçonneries; mais précisément sur la pile 33 et aussi sur les piles 36 et 38, les pierres de taille de l'angle ouest ont été soulevées (2) fig. 60.

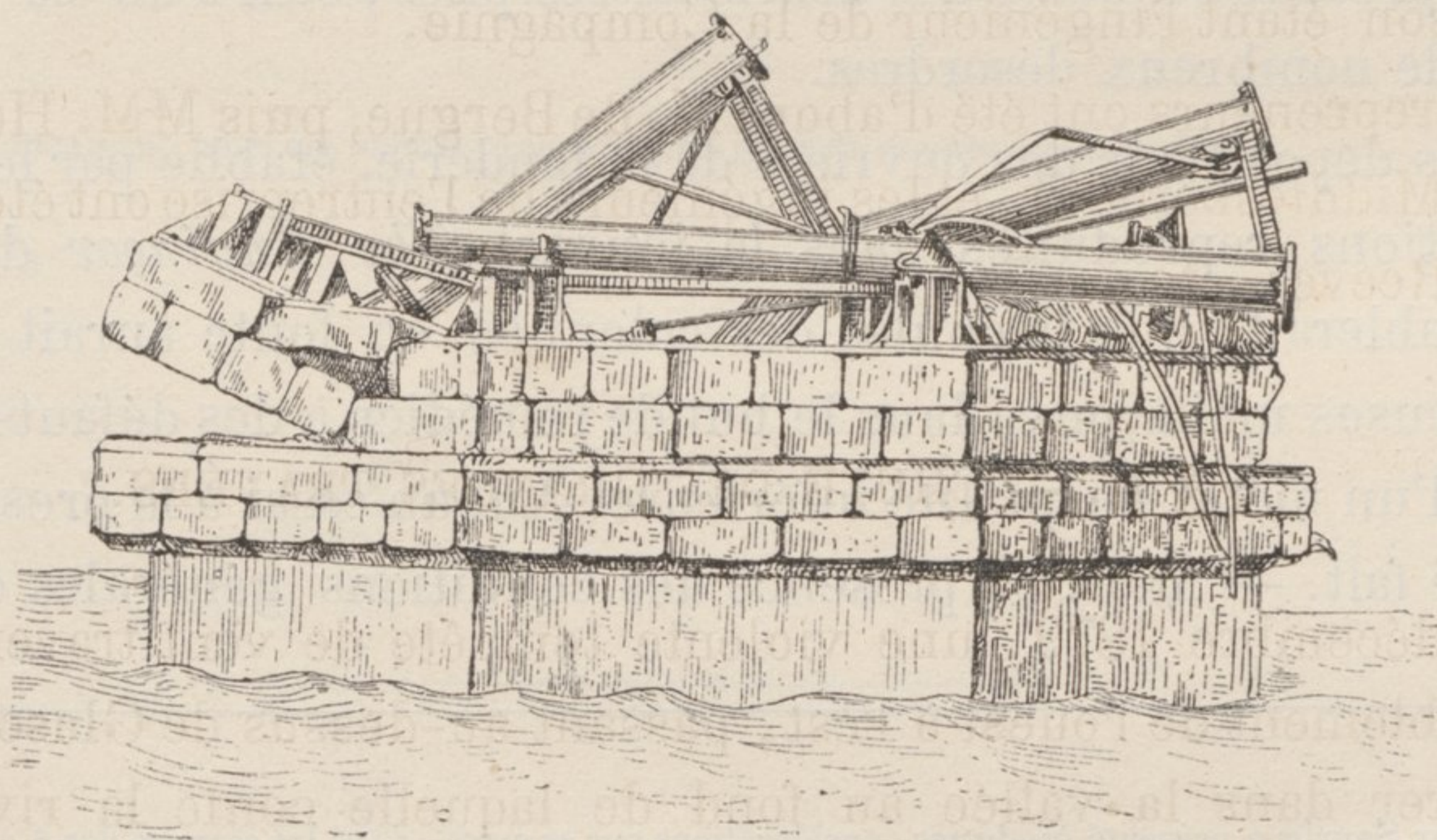


Fig. 60.

(1) Tout porte à croire que cette pression a été dépassée au moment de l'accident. D'après le journal *The Engineer* du 6 avril 1880, les anémomètres ne donnent pour la vitesse du vent qu'une moyenne d'observations faites sur un laps de temps assez long : par suite le vent doit atteindre à certains moments des vitesses bien supérieures à celles qui sont relevées. Sans cette remarque, on ne pourrait s'expliquer comment les appareils enregistreurs de la pression maxima du vent donnent des chiffres qui ne paraissent pas en concordance avec les vitesses moyennes du vent. Ainsi, à l'Observatoire de *Bidston* (Irlande), le 30 janvier 1877, la pression maxima aurait atteint 678^k par mètre carré, pour une vitesse moyenne de 124 kilomètres à l'heure ; — pour la même vitesse moyenne, la pression maxima n'aurait plus été que de 484^k, le 20 février 1877. Le jour de l'accident survenu au pont de Tay, la pression maxima enregistrée s'est élevée à 409^k, pour une vitesse moyenne de 495 kilomètres à l'heure.

(2) *Engineering* du 30 janvier 1880.

L'ensemble de la pile, constitué par les colonnes et leur contreventements, a été soumis à un effort tranchant horizontal qui paraît avoir dépassé le travail résistant. Sous l'influence des rafales de vent, les piles ont dû éprouver des mouvements oscillatoires répétés, susceptibles de porter au-delà de la limite de résistance, la tension des diverses barres de fer du contreventement, ou plutôt celle des oreilles venues de fonte avec les colonnes (1). Ces oreilles sont du reste difficiles à obtenir bien saines et donnent presque toujours lieu soit à des soufflures (2), soit à des amincissements du métal qui se produisent lors du retrait de la fonte.

Nous rappellerons que les boulons reliant les barres de fer aux oreilles de fonte avaient un jeu considérable, par suite duquel des chocs devaient se produire à chaque mouvement oscillatoire.

Quant au tablier actuellement complètement sous l'eau, il convient évidemment de l'examiner pour savoir s'il ne présente pas par lui-même une désorganisation qui aurait pu se produire soit sous l'effet du vent, soit sous l'effet d'un déraillement du train, comme le pensent quelques personnes, désorganisation qui aurait été la cause première de la chute. Cette recherche est extrêmement délicate, car le tablier, renversé sur le côté, est venu violemment porter sur le lit ondulé du fond de la rivière, dans une situation peu favorable à sa résistance, précédé ou suivi des débris de ses piles, et il a dû se produire à ce moment de nombreux désordres.

D'après les dépositions des ouvriers de la fonderie, établie par le constructeur [dépositions reproduites dans le journal *The Engineer* du 12 mars 1880], il semblerait, que la coulée des colonnes en fonte aurait donné lieu à de nombreuses malfaçons, dans le but de remédier à des défauts provenant de l'emploi d'un métal de qualité inférieure. Aucun essai à la presse hydraulique n'a été fait. — Mais, en présence des conditions générales d'établisse-

(1) M. l'ingénieur Seyrig a présenté quelques considérations sur ce sujet, dans les séances des 6 et 23 février 1880 de la *Société des Ingénieurs civils*. Il estime à 160^m.q. la surface d'une poutre, à 24^m celle du platelage, à 76^m.q. celle d'une pile, et à 227^m.q. la surface du train sur la longueur d'une travée. Le poids d'une travée est de 310^t., celui d'une pile de 110^t., et celui du train de 130^t.

En comptant le train, mais en négligeant la surface de la 2^e poutre qu'il masquait en partie, le moment de renversement, le vent étant compté à raison d'un effort de 122^k. par mètre carré (correspondant à la vitesse de 116 kilomètres à l'heure), s'élève à 1597^t.m. : le moment de stabilité par rapport au centre de l'un des groupes de colonnes qui forment la pile, et qui peut être regardé comme un point d'appui unique, est de 1349^t.m. Il trouve donc une tendance au renversement que les ancrages insuffisants sur les piles ne pouvaient combattre.

Si on considère les travées sans le train, il faut comprendre dans la surface totale environ moitié de la superficie de la 2^e poutre, et le moment de stabilité est de 1035^t.m., tandis que le moment de renversement est de 1087^t.m.

Le coefficient de travail des oreilles d'attache en fonte serait de 9^k.5.

(2) Observations présentées par M. Eiffel, à la séance précitée du 6 février de la *Société des Ingénieurs civils*.

ment du pont, ces faits n'ont qu'une importance secondaire, et de nature seulement à bien faire discerner la part de responsabilité qui peut incomber, soit à l'Administration du chemin de fer, soit aux constructeurs du pont.

On arrivera peut-être à cette conclusion, qu'il a dû se produire un premier fait ayant changé notablement les conditions de résistance de la travée, et peut-être de là, exagération de travail sur un groupe de piliers; à moins que la travée, cédant elle-même la première, n'ait ainsi occasionné la ruine successive du reste. Mais il n'en restera pas moins cette instruction pour l'avenir: 1° que le mode anglais de construction de piles à colonnes en fonte faiblement contreventées, n'est pas à recommander; et 2° que l'adoption, pour le pont de Tay, d'un fruit moindre que celui qui est généralement usité (adoption basée principalement sur le désir de diminuer la dépense des fondations), n'était pas justifiée, surtout dans un pays exposé à de violents ouragans, et où les précautions auraient dû être plutôt exagérées que diminuées.

Le rapport de l'enquête officielle ordonnée au sujet de cet accident par le gouvernement anglais, contiendra évidemment une série de renseignements que les ingénieurs pourront utilement consulter (1).

(1) Lorsque ce document aura été publié, une Analyse en sera donnée dans la *Revue*.