

Denne fil er downloadet fra
Danmarks Tekniske Kulturarv
www.tekniskkulturarv.dk

Danmarks Tekniske Kulturarv drives af DTU Bibliotek og indeholder scannede bøger og fotografier fra bibliotekets historiske samling.

Rettigheder

Du kan læse mere om, hvordan du må bruge filen, på www.tekniskkulturarv.dk/about

Er du i tvivl om brug af værker, bøger, fotografier og tekster fra siden, er du velkommen til at sende en mail til tekniskkulturarv@dtu.dk

13.59.02

Chemins de Fer de l'État Danois.

COMPTE-RENDU

de la construction du

PONT DU LIMFIORD

entre

Aalborg et Nørre-Sundby.

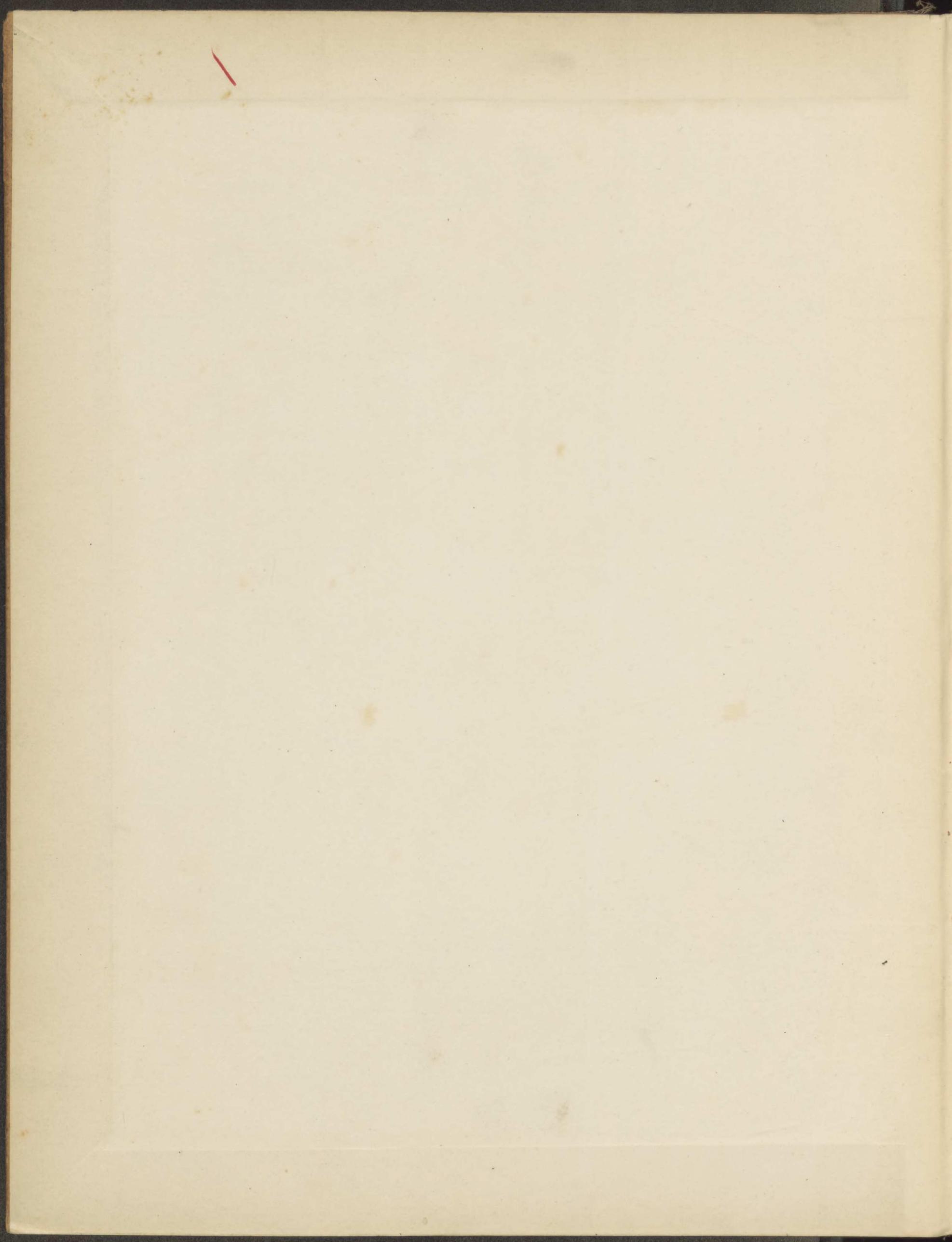
Avec planches.



COPENHAGUE.

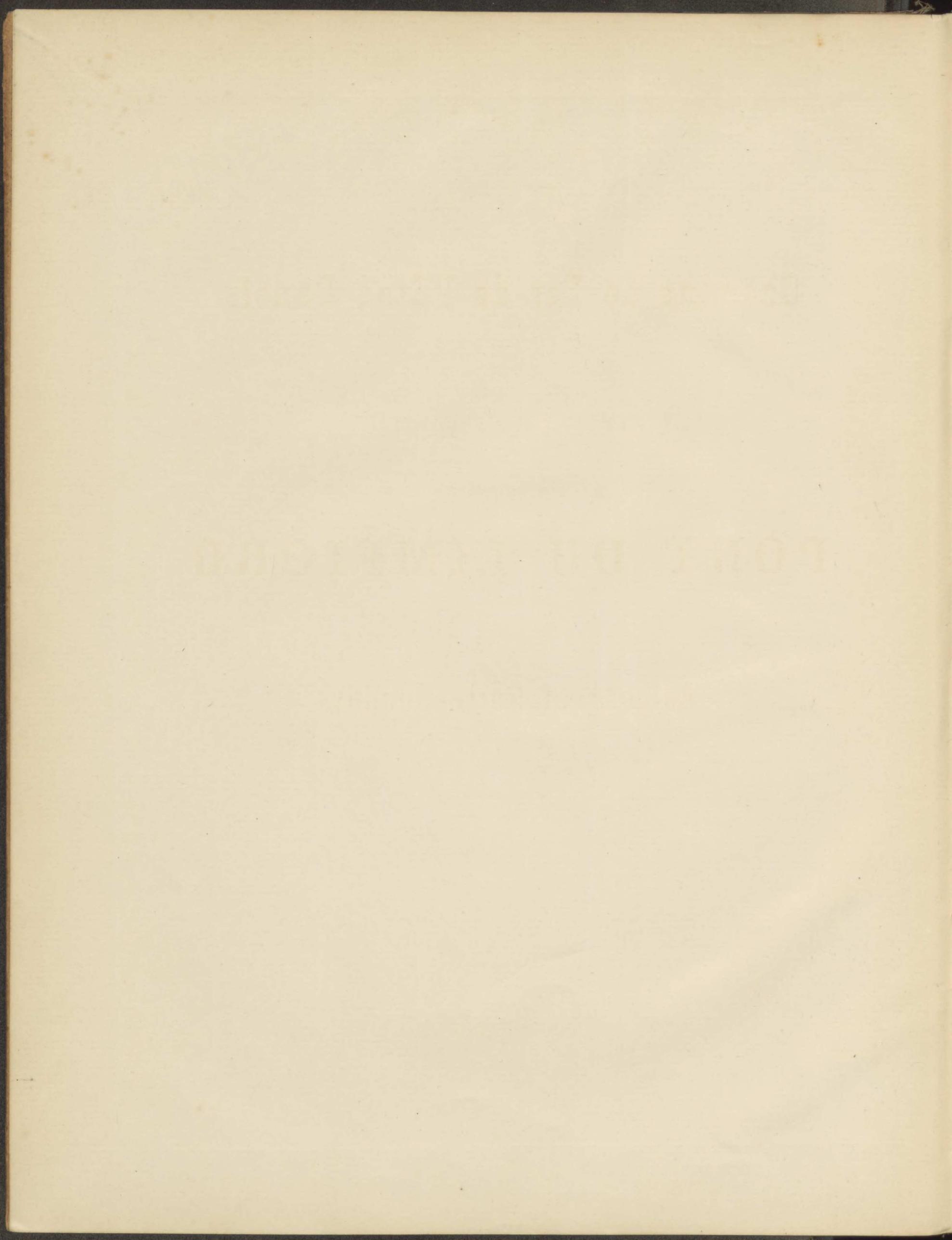
AXEL E. AAMODT. IMPRIMEUR.

1884.



TB 624.4 Com

St.f.



Chemins de Fer de l'Etat Danois.

COMPTE-RENDU

de la construction du

PONT DU LIMFIORD

entre

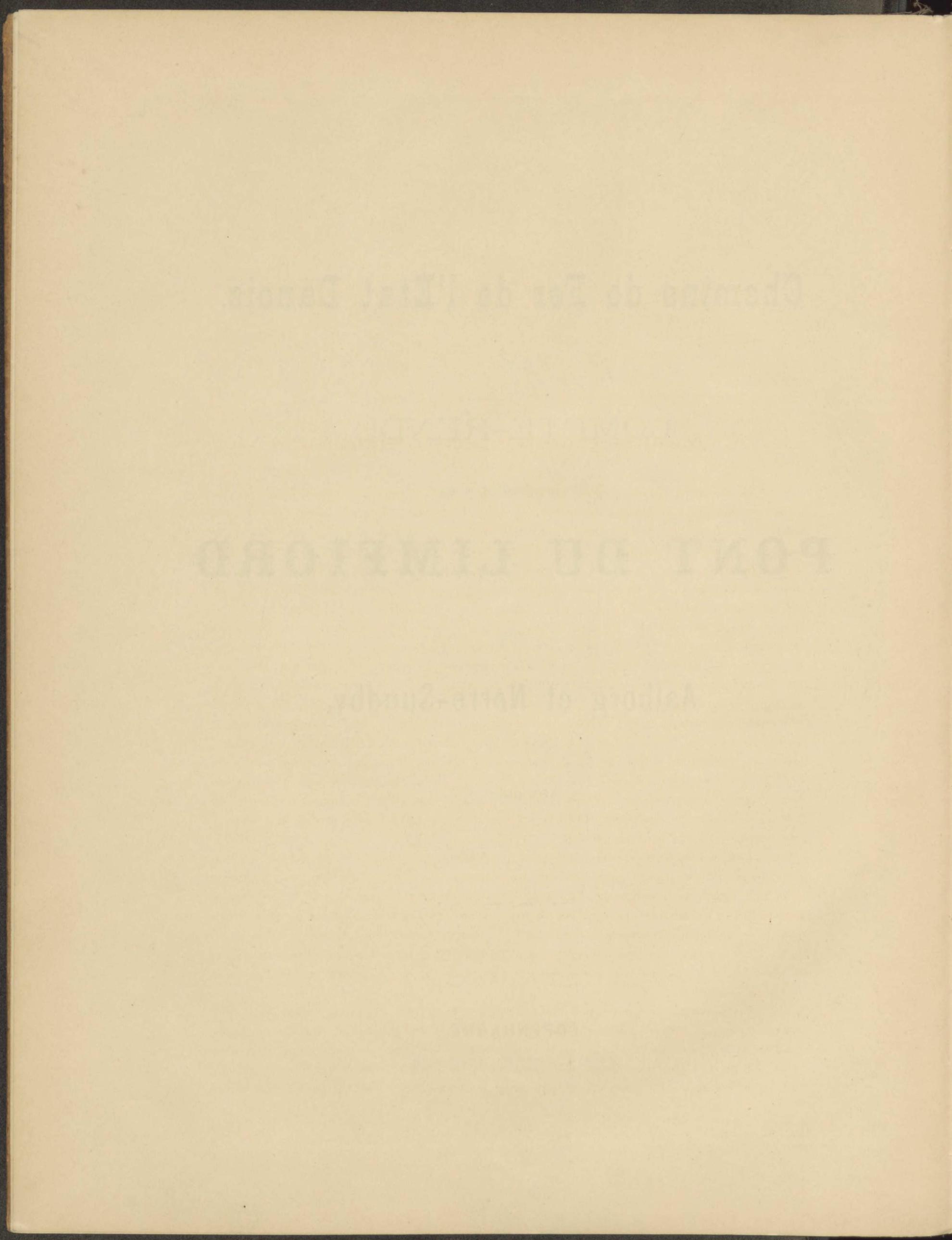
Aalborg et Nørre-Sundby.

Avec planches.

COPENHAGUE.

AXEL E. AAMODT. IMPRIMEUR.

1884.



A. Mesures et dispositions préparatoires.

Le chemin de fer longitudinal qui traverse le Jutland du sud au nord ayant atteint la ville d'Aalborg, située près du Limfjord, et sa dernière partie, le chemin de fer de Vendsyssel, comprenant l'extrémité septentrionale de la péninsule, entre le Limfjord et la ville de Frederikshavn, devant être mise en exécution, le ministère de l'intérieur donna l'ordre de faire une exploration du Limfjord à l'aide d'une série de sondages, afin de s'assurer s'il y avait à des distances convenables des deux bouts des chemins de fer, près d'Aalborg et de Nørre-Sundby, des passages sur le Limfjord où l'on pût construire un pont massif en tôle sans s'exposer à des dépenses trop considérables.

On reconnaissait de toutes parts que ce n'était qu'après avoir obtenu un tel raccordement entre les chemins de fer des deux rives, que le chemin de fer longitudinal serait réellement achevé, et qu'il pourrait atteindre toute son importance, non-seulement pour le trafic local, mais aussi pour les communications entre le Jutland et la péninsule scandinave. Si l'on devait espérer d'attirer le trafic suédo-norvégien à travers le Jutland, en passant par Frederikshavn, ce n'était qu'à la condition que le transport des passagers et des marchandises eût lieu sans interruptions et que le passage du Limfjord surtout ne causât ni gênes, ni pertes de temps. Le seul moyen d'obtenir ce résultat d'une manière absolument satisfaisante, c'était cependant la construction d'un pont massif sur le Limfjord reliant les deux rives. Tout autre communication, fût-elle obtenue à l'aide d'un pont de pontons ou par des bacs à vapeur, aurait toujours l'inconvénient que le passage pourrait être interrompu pendant l'hiver à cause du mouvement des glaces, justement à l'époque où une communication sûre et sans interruptions serait de la plus grande importance.

Les résultats de l'exploration faite en 1870 démontrent la possibilité de la construction d'un pont massif dont la dépense correspondrait aux avantages que l'on s'en attendait, mais ils étaient d'une telle nature, que l'on pouvait déjà prévoir que la construction du pont exigerait un temps assez considérable et qu'elle serait accompagnée de très grandes difficultés d'exécution, en partie inconnues jusqu'ici — prévision suffisamment justifiée plus tard pendant l'exécution des travaux.

Les sondages ont démontré que le fond du fjord est constitué par une couche de vase et de boue d'une profondeur qui atteint jusqu'à 110 pieds danois (34 mètres et demi) sous le niveau de la mer.

Cette couche, d'une consistance presque liquide dans sa partie supérieure, devient un peu plus compacte dans ses parties inférieures et finit par être composée d'un mélange de vase, de coquillages, d'algues et de sable. Elle est couchée sur le fond primitif du fjord, qui commence par une profondeur d'env. 50 pieds (15 m_7), près de la rive septentrionale, en s'inclinant vers le sud jusqu'à atteindre une profondeur d'env. 110 pieds (34 m_5) près de la rive méridionale. Le fond primitif est constitué

par une couche d'une épaisseur considérable de sable, assez gros au commencement, mais devenant de plus en plus fin vers la profondeur de 150 pieds (47 m), où cessèrent les sondages. On trouva des couches d'argile sur les côtés du lit du fjord — sur le côté du nord, à 70 pieds (env. 22 m) de profondeur; vers le côté méridional env. à 100 pieds (31 m₄) de profondeur — et là où les sondages traversèrent ces couches d'argile, on trouva de nouveau du sable fin mêlé à de l'argile.

Les dispositions que nous venons de décrire se trouvent représentées sur la planche I. Les sondages ayant en même temps démontré que le fond du Limfjord est constitué d'une manière tout à fait semblable, à l'est aussi bien qu'à l'ouest de la ligne Aalborg—Nørre-Sundby, il fallait abandonner l'espoir d'obtenir des conditions plus favorables en plaçant le pont ailleurs, sur un point plus éloigné, et se tenir à la ligne directe, qui se raccordait le mieux avec les chemins de fer existants.

On trouvera ceux-ci sur la planche II, qui montre de plus, outre les chantiers employés plus tard pour la construction du pont, les environs immédiats et les constructions nécessitées alors pour le passage du fjord. Ce sont deux voies de fer qui relient les chemins de fer principaux, aboutissant aux stations d'Aalborg et de Nørre-Sundby, aux deux rives du fjord, en se continuant sur des remblais jusqu'à la profondeur nécessaire, où les embarcadères provisoires qui se trouvent sur le plan étaient construits pour les communications par bateau à vapeur entre les deux rives.

Sur ce point, le Limfjord a une largeur d'env. 2600 pieds (816 m), et la distance entre les embarcadères était d'env. 1000 pieds (313 m₈). Dans le voisinage immédiat des embarcadères, les bas-fonds disparaissent, et le lit profond du fjord commence. Ce lit présente un profil d'eau régulier et constant pour les parties du fjord qui se trouvent dans le voisinage et des deux côtés de la ligne du pont, qui forme un angle de 65° avec la direction du courant.

Le mouvement des eaux du Limfjord est dû, tantôt à l'influence des marées, tantôt à celle des vents, tantôt aux deux ensemble. Les variations ordinaires du niveau, causées par les marées, sont insignifiantes et n'atteignent que 8 pouces (0 m₂₁) au-dessus ou au-dessous du niveau ordinaire. Mais les vents donnent lieu à des variations de niveau beaucoup plus considérables. Les vents du nord, passant par l'est jusqu'au sud-est, produisent des marées basses, tandis que les vents du sud, passant par l'ouest jusqu'au nord-ouest, donnent lieu à des marées hautes. La marée la plus haute que l'on ait observée s'est élevée jusqu'à 5 pieds (1 m₅₇) au-dessus du niveau ordinaire, et la marée la plus basse est descendue jusqu'à 2 pieds et demi (0 m₇₈) au-dessous du niveau ordinaire. Ces variations de niveau sont très rares cependant; elles varient en général entre 1 pied $\frac{3}{4}$ et un pied et demi (0 m₅₅ à 0 m₄₇). Le courant peut atteindre une vitesse de 6 à 7 pieds (1 m₉ à 2 m₁₂) par seconde.

Le fjord est parfois encombré par les glaces. Les glaces qui viennent de l'est sont sans importance, et se brisent contre le pont de pontons, situé à l'est de la ligne du pont, mais les glaçons qui viennent de l'ouest peuvent arriver avec une force considérable, et ils ont plusieurs fois donné lieu à une rupture du pont de pontons.

B. Mise en concours

des plans de construction et
conclusion du traité

concernant l'exécution des travaux.

Les études préparatoires étant achevées et leurs résultats ayant prouvé que l'on se trouvait devant un problème qui exigerait, à cause de ses difficultés exceptionnelles, les considérations les plus conscientieuses, s'il devait mener à une solution favorable, la question suivante était, de quelle manière et d'après quel système serait-il le plus juste de réaliser la construction du pont.

Il est vrai que l'on avait construit, en Allemagne, en Hollande et en Amérique, des ponts dont les fondations atteignaient une profondeur considérable, mais ces profondeurs ne dépassaient pas 80 pieds (25 m), tandis qu'ici le sol incompressible ne se trouvait qu'à une profondeur de 110 pieds. Le ministère de l'intérieur, désirant cependant profiter autant que possible de l'expérience de travaux semblables que l'on avait acquise à l'étranger, publia en septembre 1871 la mise en concours international du projet concernant la construction d'un pont massif sur le Limfjord, entre Aalborg et Nørre-Sundby. L'invitation au concours était accompagnée des descriptions nécessaires du pont et en spécifiait les exigences de construction, en ajoutant en même temps les conditions à remplir pour pouvoir prendre part au concours; un prix de 500 frédéric-s-d'or en monnaie danoise fut promis pour le projet qui obtiendrait la préférence.

Voici les exigences de construction les plus importantes:

La longueur totale du pont entre les culées est fixée à 1200 pieds (377 m).

Le pont doit contenir au milieu un pont tournant à deux volées, ayant chacune une ouverture libre de 75 pieds (23 m₅₄).

Le pont doit être à une seule voie et servir en même temps aux communications par chemin de fer et par voitures ordinaires.

La superstructure du pont doit être en fer. La surface supérieure des rails doit être à 10 pieds (3,14 m) au-dessus du niveau ordinaire, et l'espace libre entre la superstructure et le niveau ordinaire du fjord ne doit pas être inférieur à 8 pieds (2 m₅₁).

La superstructure de la voie ferrée doit avoir une résistance capable de supporter, outre le poids mort, une surcharge d'une tonne par pied linéaire (3250 kilogrammes par mètre linéaire). La surcharge de la voie destinée aux voitures ordinaires et celle des trottoirs sont calculées à 50 livres par pied carré (250 kilogrammes par mètre carré).

Les piles doivent pouvoir supporter à l'épreuve une charge correspondant à trois fois le poids du pont chargé.

Le résultat du concours fut que l'on reçut des lettres, des projets et des offres à forfait de la part de 33 différentes personnes, en tout.

Le ministère de l'intérieur chargea une commission, composée de M. le colonel **Wenck**, président, M. **Carlsen**, conseiller d'Etat, directeur des travaux maritimes, M. **Carstensen** capitaine, anc. inspecteur des digues, M. **Holmberg**, professeur, et M. **Larsen**, capitaine du Génie, de juger ces plans, qui contenaient différents systèmes de construction et diverses méthodes d'exécution.

Rapport de la commission.

La commission prononça dans son rapport qu'elle avait naturellement, en jugeant les différents projets, fixé son attention surtout sur la construction des fondations et sur la méthode à suivre pour l'exécution des travaux, cette partie de l'ouvrage présentant des difficultés extraordinaires qu'il fallait surmonter, à moins de risquer la solidité du pont et l'issue favorable de toute l'entreprise. Toute autre considération, se rapportant soit à l'aspect, soit à la construction de la superstructure, etc., devait plier devant ces questions, et même la question pécuniaire ne pouvait être posée qu'en seconde ligne, puisqu'il était important de s'assurer tout d'abord, si la construction proposée était effectivement exécutable et si l'on pouvait être suffisamment sûr d'un résultat favorable en l'employant.

Après avoir soumis chaque projet à une étude spéciale selon les principes cités plus haut, la commission en réunit les résultats dans un rapport détaillé, dont il résulte qu'aucun des projets ne pouvait être considéré comme absolument satisfaisant, mais qu'il y en avait un qui s'approchait tellement des idées de la commission, qu'elle pouvait en conseiller l'exécution en y portant quelques

modifications. La Compagnie de Fives-Lille, qui avait présenté ce projet au concours, y proposait de descendre des piles circulaires en maçonnerie d'un diamètre de 19 pieds (env. 6 m), en plaçant la maçonnerie sur un caisson en tôle destiné à être rempli d'air comprimé. Ce caisson devait être descendu jusqu'au sol incompressible, c'est à dire jusqu'à 110 pieds (env. 34 m_{.5}) de profondeur, et puis rempli de béton. En cas que l'on ne réussît pas à descendre la pile à plus d'env. 80 pieds (env. 25 m) de profondeur, qui était la plus grande profondeur que l'on eût atteinte jusqu'ici pour des travaux semblables, on proposait de soutenir la pile à l'aide de pieux à vis, qui devaient être vissés dans le sol en partant de l'intérieur du caisson.

La superstructure devait être formée par deux poutres prismatiques à treillis, 2 travées se trouvant au nord et 4 au sud du pont tournant; de plus on proposait alternativement d'établir une voie supérieure pour les voitures ordinaires avec des rampes en tôle.

La commission, n'ayant pu recommander l'exécution du projet tel qu'il était proposé par la Compagnie de Fives-Lille, développa dans son rapport ses idées sur la construction des fondations et de la superstructure du pont aussi bien que sur l'exécution des travaux et sur le prix total de la construction.

La longueur du pont de 1200 pieds, primitivement proposée, la commission crut sans hésiter pouvoir conseiller de la réduire, les variations du niveau du fjord et la vitesse du courant n'étant pas considérables, et les remblais reliant les culées aux chemins de fer respectifs pouvant être enlevés et remplacés par de légères constructions en fer, si un élargissement du profil devenait nécessaire dans le temps. Les culées, il faudrait les placer par des raisons d'économie un peu en dehors des bas-fonds, à peu près à 8 pieds (2 m_{.5}) de profondeur, ce qui réduirait leur distance réciproque à la même qu'il y avait entre les anciens embarcadères des bacs, soit 1000 pieds (314 m).

Quant à la forme des piles, la commission fit observer que, bien que les piles circulaires projetées par la Compagnie de Fives-Lille fussent plus faciles à descendre que les piles oblongues, leur stabilité étant la même dans toutes les directions, il faudrait cependant donner la préférence aux piles oblongues, afin de mieux pouvoir résister à l'influence du vent, du courant et surtout du mouvement des glaces. De plus, les piles proposées étaient trop faibles, ce qui fit que la commission proposa d'en augmenter considérablement les dimensions, en donnant à la pile du pont tournant un diamètre de 25 pieds (7 m_{.83}) au moins, et aux autres piles une largeur de 13 à 16 pieds (4 à 5 m) sur une longueur de 35 pieds (11 m).

Quant à l'exécution des travaux, la commission conseilla, comme l'avait proposé la Compagnie de Fives-Lille, de descendre les piles à l'aide de la méthode pneumatique, se reposant à cet égard comme la compagnie sur la conviction que l'on réussirait à l'aide de cette méthode, selon toute probabilité, à atteindre la profondeur nécessaire, et qu'il serait en tout cas possible d'atteindre la profondeur maximum de 80 pieds, considérée comme normale pour les travaux de cette nature, après quoi il faudrait soutenir la pile par d'autres procédés.

Le procédé proposé pour cette éventualité par la Compagnie de Fives-Lille, de visser les pieux en partant du caisson à air comprimé qui se trouve sous la pile, la commission ne pouvait pas le recommander, le vissage étant difficile à mener à bonne fin dans l'étendue nécessaire et pouvant devenir très incertain, parce que les pieux pouvaient facilement rencontrer des objets de fortes dimensions, des pierres, des troncs d'arbres, etc., ce qui les empêcherait de pénétrer jusqu'à la profondeur nécessaire.

La commission recommande de tirer parti dans ce cas de l'énorme force motrice qui se trouve dans l'air comprimé — qui n'avait eu jusqu'alors d'autre but que d'exclure l'eau — en l'employant activement à enfoncez jusqu'au sol incompressible des cylindres creux en fer, munis d'un couvercle libre.

Dans le cas en question, les circonstances locales paraissaient être exceptionnellement favorables à l'emploi de cette méthode, mais on verra par la description suivante de l'exécution des travaux qu'il n'y eut pas lieu d'appliquer la méthode décrite, proposée par la commission, puisque

l'on réussit à descendre toutes les piles jusqu'au sol incompressible, bien que cela ne se fit qu'après des efforts considérables.

Quant à la superstructure, la commission recommandait de la disposer de manière qu'elle pût, tout en servant provisoirement aux communications par chemin de fer seulement, facilement être adaptée à porter une voie charretière indépendante avec deux trottoirs; les poutres à treillis des travées devaient donc être prismatiques, et les poutres transversales qui les relient devaient avoir une résistance suffisante, afin de pouvoir supporter plus tard la charge du tablier pour la voie charretière. De plus, on conseilla de réduire le nombre des pièces de la construction en augmentant la section, la proximité des eaux salées — le bord inférieur de la superstructure à une distance de 8 pieds ($2\text{m},5$) seulement du niveau ordinaire — ayant une influence pernicieuse sur les fers forgés et les tôles.

En adoptant la construction proposée, on conseilla d'admettre les charges suivantes sur le profil net des sections:

pour les semelles supérieures et inférieures 10,000 livres par pouce carré, soit $7,31$ Kilog. par mètre carré
— le treillis 9,000 — - - - - 6 $,58$ — - - -
pour les pièces de pont, les longerons et les poutres transversales 8,000 livres par pouce carré, soit
 $5,85$ Kilog. par mètre carré.

La commission crut, en se basant sur un calcul approximatif, pouvoir évaluer la dépense nécessitée par la construction d'un tel pont, à Kroner 1,600,000, en tenant hors du calcul les rails, les remblais, les ducs d'Albe et les enrochements à pierres perdues.

On proposait de charger de l'exécution du pont la Compagnie de Fives-Lille, ou éventuellement un autre entrepreneur qui disposât de ressources financières et techniques aussi considérables. Dans le cas inattendu qu'il ne fût pas possible de s'entendre avec un tel entrepreneur sur l'exécution de la construction mentionnée ci-dessus à des conditions acceptables, la commission conseillait de suivre dans ses traits principaux une proposition faite par l'ingénieur en chef, M. Tegner, et qui consistait, quant à l'essentiel, en une solidification du sol compressible, à l'aide d'enrochements à pierres perdues et de remblais de gravier qui permettrait d'y descendre les piles.

Conclusion du traité.

Le ministère de l'intérieur traita avec la Compagnie de Fives-Lille, en se basant sur le rapport de la commission; le gouvernement était représenté par le directeur des chemins de fer de l'État, M. Holst, conseiller d'État, le directeur des travaux maritimes, M. Carlsen, conseiller d'État, et M. le capitaine Carstensen, anc. officier du Génie; la Compagnie de Fives-Lille était représentée par M. Moreaux, ingénieur civil, administrateur délégué de ladite compagnie.

Les considérations auxquelles le projet fut de nouveau soumis donnèrent lieu à une modification essentielle pour ce qui regardait les piles. Tandis que l'on avait jusqu'ici supposé comme nécessaire que les piles fussent descendues jusqu'aux couches du sol que les sondages avaient montrées absolument incompressibles, les délégués arrivèrent au résultat que tout semblait indiquer qu'il ne serait probablement pas nécessaire de descendre les piles jusqu'à une telle profondeur, et cette opinion fut confirmée par M. Moreaux, qui déclara que l'expérience qu'il avait gagnée par d'autres travaux de la même nature le portait à considérer comme sûr que l'on n'aurait pas besoin de descendre les piles jusqu'aux profondeurs primitivement supposées. On convint donc de descendre les culées jusqu'à une profondeur de 18 mètres, la pile du pont tournant jusqu'à 30 mètres et les autres piles jusqu'à 28 mètres, réservant toutefois au gouvernement le droit d'exiger, contre paiement additionnel, que les piles fussent descendues plus bas s'il y avait nécessité, jamais cependant au-dessous de 36 mètres de profondeur sous le niveau ordinaire.

Le traité définitif, qui avait adopté les profondeurs de fondation réduites que nous venons de nommer, fut conclu avec la Compagnie de Fives-Lille le 4 octobre 1873 et reçut l'approbation du ministère le 19 du même mois.

La Compagnie s'engageait, d'après ce traité, à construire le pont et à fournir tous les matériaux nécessaires, les mains d'œuvre, les machines nécessaires, l'outillage, les échafaudages, etc., pour une somme de francs 2,575,000. La fourniture des rails et des pièces d'attache nécessaires pour la voie ferrée n'était pas comprise dans cette somme; de même, les travaux à exécuter près des deux extrémités du pont afin d'obtenir le raccordement du pont avec les chemins de fer attenants, devaient être réalisés par les soins du ministère et à ses frais. Les terrains nécessaires pour chantiers, magasins, etc., devaient être mis gratis à la disposition des entrepreneurs, et enfin, les frais pour l'enrochement à pierres perdues furent aussi exclus du traité, parce qu'on ne pouvait s'entendre sur le prix.

G. Description générale du pont.

Le pont reçut selon le projet définitif une longueur totale de 318 mètres, partagée par cinq piles et deux culées en six ouvertures, dont deux à chaque extrémité, recouvertes par deux travées prismatiques à treillis fixes et solidaires de 65_{.80} et 66_{.15} mètres, tandis que les deux ouvertures du milieu sont recouvertes par un pont tournant à deux volées de 26_{.775} mètres.

Les deux culées n'ayant pu résister à la poussée des remblais qui y furent appuyés, on dut ajouter plus tard aux travées primitivement projetées encore deux travées de rive plus petites. On essaya vainement de soutenir les culées à l'aide d'enrochements à pierres perdues devant leur face extérieure; il devint donc nécessaire de les soulager en déblayant une partie des remblais dans leur voisinage immédiat et de remplacer les remblais par des travées ouvertes entre les culées et la rive, où elles reposaient sur des fondations établies dans les remblais.

L'une de ces constructions, la travée de rive à l'extrémité méridionale du pont, fut déjà exécutée pendant la construction du pont et reçut une longueur de 35 mètres. La Compagnie de Fives-Lille proposa en même temps d'établir une travée semblable à l'extrémité septentrionale du pont, mais cette proposition n'eut pas de suite alors, la culée de ce côté ayant selon toute appareance conservé sa position primitive. Ce n'est que plus tard qu'elle montra un déplacement faible et contenu vers le fjord, et l'on crut alors que ce serait le plus sûr de déblayer cette culée aussi et d'établir le raccordement à l'aide d'une travée de rive.

La travée de rive du côté d'Aalborg se trouve sur la planche I, qui montre les dispositions générales de la construction du pont. La travée qui se raccorde à la partie septentrionale du pont ne fut construite qu'après que le pont eut été achevé par les entrepreneurs et livré au trafic. Elle reçut une ouverture de 17 mètres.

Piles.

Les piles du pont ont été construites en maçonnerie de briques dures; leur partie supérieure, à partir de 2^m,₂₀ sous le niveau ordinaire, est parementée en pierres de taille de granit, et les dalles de recouvrement sont également en granit. Toutes les piles sont descendues, comme il résulte de la planche I, jusqu'au sable incompressible, à une profondeur d'env. 34 mètres, à l'exception de la culée septentrionale, dont le fonçage put être arrêté sur le sol incompressible à la cote de $\div 18^{m,00}$.

La pile du pont tournant avait primitivement la forme d'une tour circulaire de 8^m,₅₀ de diamètre. Cette section, on ne pouvait cependant pas la considérer comme suffisamment stable, d'après l'expérience que l'on avait gagnée par la construction des autres piles; on y ajouta donc un avant-bec de 2^m,₇₅ de longueur (voir planche V). Lorsque cette modification fut décidée, le caisson destiné au fonçage de la pile était déjà achevé dans sa forme primitive; il fallait donc que

la nouvelle partie du caisson, sous l'avant-bec, fut disposée de manière qu'elle pût être rivée à la partie circulaire. C'est ce qui explique la nécessité du renflement qui se trouve là où l'avant-bec rencontre la tour.

Les autres piles ont une section oblongue (voir planche VI); elles sont terminées vers l'ouest par des avant-becs en ogive, tandis que les arrière-becs sont demi-circulaires vers l'est, la pile n'ayant rien à craindre du mouvement des glaces de ce côté. La partie inférieure des piles, jusqu'à 2 m₂₀ au-dessous du niveau ordinaire, a 5 m₀ de largeur, dans la direction du pont, et 12 m₅₀ de longueur, dans la direction du courant. La largeur est réduite à 4 m₂₀ pour la partie supérieure de la pile, à partir de la cote $\div 2 m_{20}$.

Les culées (voir planche V) sont construites absolument comme les piles, à la seule différence près que les avant-becs et les arrière-becs sont demi-circulaires, et que l'on avait cru pouvoir donner aux culées des dimensions plus faibles qu'aux piles, 10 m₀₈ de longueur et 4 m₄₄ de largeur, en partant de la supposition que les remblais qui devaient s'y appuyer en augmenteraient la stabilité.

Comme nous l'avons fait observer plus haut, cette supposition de la commission fut démentie cependant, les remblais ayant, au lieu de soutenir les culées, été la cause de leur déplacement, et ayant ainsi rendu nécessaire la construction des travées de rive citées.

Le fonçage de la première pile qu'entreprit la Compagnie de Fives-Lille, la culée du côté d'Aalborg (Nr. 7), prouva déjà qu'il fallait aussi abandonner la supposition qu'il ne serait pas nécessaire de descendre les piles jusqu'au sol incompressible. A la profondeur de 18 mètres — fixée pour cette culée dans le traité — le fond était d'une consistance si molle, qu'il devint nécessaire de continuer le fonçage, et ce ne fut qu'à une profondeur de 34 m₆ que l'on put atteindre un fond qui possédât la résistance nécessaire — à une profondeur donc qui surpassait de 16 m₆ celle qui était supposée dans le projet de la commission et dans le traité. Mais même dans cette position, la culée reposait seulement sur le sol incompressible sans y être pénétrée, et comme elle était entourée dans toute sa longueur de couches de vase peu consistantes, elle était absolument sans résistance contre la poussée latérale; il fallait donc lui procurer la résistance nécessaire par d'autres moyens — c'est à dire à l'aide d'enrochements à pierres perdues autour de la culée. La même chose se répéta avec toutes les piles, mais le sol incompressible y ayant été atteint plus tôt — à des profondeurs de 25 à 30 mètres — on put obtenir une position plus fixe pour ces piles en les enfonçant dans les couches incompressibles. On se décida donc à continuer le fonçage tant que le permettrait le travail dans l'air comprimé, et la limite que l'on pouvait atteindre, l'expérience des travaux du pont du Limfjord la fixa à 35 mètres, limite où la plupart des ouvriers furent rendus incapables de travailler pour cause de maladie.

Profondeurs de
fonçage des piles.

Les piles possédant une épaisseur assez faible en comparaison avec leur grande hauteur de 36 mètres, et leur stabilité dans le sens horizontal étant donc peu considérable, on devait craindre que les piles ne fussent pas en état de résister à la pression des glaces, lorsqu'elles se jettent directement sur les piles sans rencontrer d'obstacles. Comme on ne pouvait guère espérer que les couches peu consistantes, composées en partie de vase et de boue, qui avaient été traversées par les piles, pussent leur fournir un appui tant soit peu considérable, il fut décidé de leur créer un appui artificiel en entourant les piles d'enrochements considérables à pierres perdues mêlés à du gravier passé à la claire. Lorsque le pont fut livré au trafic, on avait déjà enfoncé à p. p. 5000 mètres cubes de gravier passé à la claire et env. 6300 mètres cubes de grandes pierres provenant de la mer.

Enrochements
à pierres perdues.

Des constructions servant à protéger et à soutenir le pont tournant lorsqu'il est ouvert n'étaient pas comprises dans le projet primitif.

Pattes d'oie devant
le pont tournant.

On ne peut cependant pas se passer de telles constructions, les vaisseaux étant très exposés à courir sur le pont en le traversant lorsqu'il est ouvert et fait saillie au milieu de la passe. De

plus, lorsque le pont tournant reste ouvert pendant longtemps à la fois, et que les extrémités de la travée ne sont pas soutenues, mais pendent librement dans l'air, les différentes parties de la construction sont très fatiguées, ce qui peut à la longue avoir une influence pernicieuse sur les tôles et donner lieu à une flexion permanente de la travée.

On a construit par ces raisons, des deux côtés de la pile centrale, deux pattes d'oie constituées chacune par quatre pilotes tubulaires en fer remplis de béton et réunis à la partie supérieure par une ceinture en fer et par des entretoises en fer. En même temps que ces constructions protègent la pile centrale contre les attaques des vaisseaux et des glaces, elles doivent soutenir les volées de la travée tournante dont les extrémités sont calées sur les deux pattes d'oie. (Voir pl. XIV).

Remblais de raccordement sur les deux rives.

Les remblais de raccordement entre les rives et le pont ont des talus de 2 de base pour 1 de hauteur vers l'est, et de 3 de base pour 1 de hauteur vers l'ouest où ils sont plus exposés aux attaques des eaux et des glaces.

La partie inférieure des talus est en outre défendue, à partir de 4 pieds ($1\text{m},_{26}$) au-dessus jusqu'à 1 pied ($0\text{m},_{31}$) au-dessous du niveau ordinaire, par des perrés fondés sur des enrochements à pierres perdues.

La construction détaillée du pont et de toutes ses parties sera expliquée par la description suivante avec les plans qui y appartiennent; ces plans contiennent des dessins détaillés de toutes les parties principales du pont et des machines et outils employés pendant l'exécution des travaux.

La description contient également une relation détaillée de la marche des travaux pendant le fonçage de chaque pile; car quoique la méthode suivie fût, quant au principe, essentiellement la même pour toutes les piles, les travaux amenèrent tout de même beaucoup de modifications dans les détails, et le fonçage de quelques-unes des piles donna, comme nous le verrons plus tard, lieu à des événements extraordinaires d'un intérêt technique si considérable, qu'il faut les mentionner particulièrement. (Voir table explicative des planches).

Les travaux commencèrent en avril 1874 et furent continués, avec des interruptions très courtes, dans le courant des hivers, jusqu'au 7 janvier 1879, lorsque le pont fut ouvert à la communication. Le 8 juillet de la même année, le pont fut livré comme terminé au gouvernement par la Compagnie de Fives-Lille et en même temps solennellement inauguré.

D. Exécution des travaux.

1. Chantiers.

Les terrains montrés sur la planche II, près des deux extrémités du pont, furent, après avoir été acquis à l'aide d'une expropriation temporaire, mis à la disposition des entrepreneurs.

Le terrain situé du côté d'Aalborg étant, à cause du voisinage immédiat de la ville et des communications faciles avec le chemins de fer, en état de fournir le plus de ressources aux travaux, il est naturel que le chantier fût établi de ce côté du fjord.

On y établit un édifice pour les bureaux et une baraque où logeaient les ouvriers de fonçage, dont la plupart étaient étrangers, surtout italiens; ceux-ci s'étaient montrés plus aptes à supporter les effets nuisibles du travail dans l'air comprimé que d'autres ouvriers. On y établit aussi une forge et un atelier de réparation, etc.

La plus grande partie des matériaux et des machines étant transportée directement au chantier par mer, on construisit, env. 50 mètres à l'ouest de la ligne du pont, un pont sur pieux

jusqu'à une profondeur de 12 pieds ($3,8\text{ m}^{\circ}$) avec une débarcadère pour les bâtiments. Une embarcadère plus petite fut construite dans le voisinage immédiat et à l'ouest de l'ancienne voie du chemin de fer, pour les bateaux de transport entre la rive et les piles.

On avait établi des grues, servant au chargement et au déchargement des matériaux, sur les extrémités de ces deux ponts, qui étaient aussi munis de voies ferrées s'embranchant sur la rive vers les différents chantiers.

Le chantier du côté de Nørre-Sundby ne fut employé que pour y déposer les matériaux servant à la culée de ce côté.

Pour les détails de la disposition du chantier, voir planche II.

Après l'achèvement du pont, tous les édifices, etc. furent éloignés, et les terrains furent rendus aux propriétaires respectifs.

2. Piles.

Comme nous l'avons déjà dit, les piles furent descendues au moyen de la méthode pneumatique usuelle. Voici en peu de mots la manière de procéder, qui fut, quant aux traits principaux, la même pour toutes les piles.

Application de la méthode pneumatique au fonçage des piles.

Un caisson en tôle ouvert par le bas, nommé chambre de travail, dont la coupe transversale a exactement la même forme que la pile, est suspendu à plomb au-dessus de l'emplacement destiné à l'installation de la pile, en le fixant à l'aide de fortes chaînes en fer à un échafaudage solide. Ces chaînes sont fixées par le haut à de longues vis que des écrous posés sur les poutres supérieures de l'échafaudage font monter ou descendre suivant le sens de la rotation imprimée à cet écrou; ainsi on est en état à l'aide de ses vérins de descendre peu à peu la chambre de travail. Aussitôt que le caisson est descendu jusqu'à la surface de l'eau, on commence la maçonnerie de remplissage de la pile sur le plafond de la chambre de travail, les caissons étant en même temps prolongés par des hausses en tôle de 2 mètres de hauteur et de 4 à 5 milimètres d'épaisseur. Au fur et à mesure que le caisson descend, de nouvelles hausses sont ajoutées par reprises de 2 mètres et de telle sorte que leur bord supérieur se trouve toujours à une certaine distance au-dessus de l'eau; elles servent ainsi, soit comme batardeaux autour de la pile, en permettant d'y travailler sans obstacles, soit comme revêtement, soit enfin comme modèles pendant l'exécution de la maçonnerie.

Dès que la pile est descendue au fond et qu'elle n'y peut plus pénétrer à l'aide de son propre poids, l'extraction des déblais doit commencer dans la chambre de travail. On y pénètre par une ouverture de 2 mètres de diamètre pratiquée dans le plafond du caisson et à laquelle est adapté un tube vertical en tôle, dit le tube de descente, par lequel on descend dans le caisson au moyen d'une échelle verticale. Ce tube sert aussi à l'extraction des déblais de la chambre de travail.

Lorsque le sol à creuser pour le fonçage est perméable, il devient nécessaire d'empêcher l'eau qu'il entraîne de pénétrer dans la chambre de travail. C'est ce qui se fait à l'aide de l'air comprimé que l'on envoie dans la chambre de travail au moyen d'une machine à vapeur soufflante qui refoule l'eau en dessous du caisson. A cet effet, l'extrémité supérieure du tube de descente est fermée à l'aide d'un couvercle solide, boulonné au tube et muni d'un clapet que l'air comprimé maintient hermétiquement fermé et qui permet, en s'ouvrant lorsque l'air est en équilibre, de pénétrer dans l'intérieur de la pile. On établit alors au-dessus du couvercle le sas ou la chambre à air, constituée par un tube de 2 mètres sur env. $2\text{ m}^{\circ},5$ de hauteur. Le plafond du sas est également muni d'un clapet garni de caoutchouc et s'adaptant hermétiquement à la paroi attenante; ce clapet, qui s'ouvre en dedans, permet aux ouvriers de descendre. Ce sas sert, en formant une sorte d'antichambre qui donne accès à l'intérieur de la pile, à l'éclusage des ouvriers, c. a. d. à ménager une transition successive entre l'air extérieur et l'air comprimé dans la pile, lorsque les ouvriers doivent y descendre ou en sortir.

Il est de la plus grande importance que cet éclusage soit aussi lent et aussi égal que possible, surtout à la sortie de la pile, à cause de la santé des ouvriers; et une négligence à cet égard peut facilement entraîner des maladies sérieuses et maintes fois même la mort.

A cet effet, la descente dans la pile s'effectue de la manière suivante, dès que la chambre de travail est remplie d'air comprimé.

On ouvre d'abord un robinet qui met l'air extérieur en rapport avec le sas, afin de laisser échapper l'air comprimé qui pourrait encore s'y trouver. Dès que l'équilibre est établi entre l'air extérieur et l'intérieur du sas, le clapet se laisse ouvrir et l'on descend dans le sas; on se trouve alors devant le clapet du tube central, qui cependant est hermétiquement fermé, à cause de la pression de l'air comprimé dans le caisson. On referme le clapet et le robinet qui communiquent avec l'air extérieur, et l'on ouvre un autre robinet qui établit la communication entre le sas et l'intérieur de la pile. L'air comprimé monte alors dans le sas, et dès qu'il y a équilibre des deux côtés du clapet, celui-ci se laisse facilement ouvrir et permet de descendre dans le caisson par le tube de descente.

On descend la pile jusqu'au sol incompressible en enlevant au fur et à mesure les déblais dans la chambre de travail et en continuant la maçonnerie sur le plafond du caisson. Dès que le caisson a atteint la profondeur nécessaire, on remplit de béton la chambre de travail et la cavité de la pile due au tube de descente, et la pile est terminée.

Nous croyons avoir suffisamment expliqué par cette description le principe général de la fondation à l'aide de l'air comprimé (méthode pneumatique). Cette méthode, qui excelle par la sûreté d'exécution qu'elle présente, et qui l'emporte surtout sur d'autres méthodes en ce qu'elle permet de contrôler sur les lieux mêmes la nature du sol, ne présente de difficultés que lorsque la profondeur du fonçage surpassé essentiellement, comme dans le cas qui nous occupe, une profondeur de 30 mètres au-dessous de la surface de l'eau. Dans ce cas, les ouvriers qui travaillent dans la pile souffrent beaucoup de la compression considérable de l'air, et le fonçage jusqu'à la profondeur nécessaire coûte bien du temps et des peines considérables.

Maladies parmi
les ouvriers.

Les ouvriers sont sujets, comme nous l'avons déjà fait observer, à des accès de maladie tout à fait particuliers, dès qu'ils travaillent dans une profondeur de plus de 30 mètres, c'est-à-dire dès que la pression de l'air dépasse 3 atmosphères.

Quand les ouvriers sont descendus dans la chambre de travail après avoir séjourné dans le sas pendant que l'air s'y mettait en équilibre, ils sont tous — même ceux qui sont habitués à ce travail — presque régulièrement atteints d'une oppression de poitrine plus ou moins forte; le pouls se ralentit, et l'on ressent surtout une douleur violente dans les oreilles, occasionnée par la pression de l'air sur la membrane du tympan. Ces sensations désagréables disparaissent cependant bientôt, et les ouvriers se portent du reste parfaitement bien. Le séjour même dans l'air comprimé est donc sans danger; mais les ouvriers se sentent souvent incommodés par des émanations gazeuses provenant de la consistance boueuse du fond du fjord. Il arrive souvent, en effet, lorsque la pile est descendue à une certaine profondeur, que la consistance de la vase empêche l'air comprimé d'échapper sous le bord inférieur du caisson, comme cela arrive lorsque le sol contient du sable. La conséquence en est, que l'air dans la pile n'étant plus renouvelé, il devient lourd et difficile à respirer. On tâcha d'empêcher la stagnation de l'air en mettant la chambre de travail en rapport avec l'air extérieur au moyen d'un tuyau en cuivre qui traversait le tube de descente et dont l'extrémité supérieure était fermée à l'aide d'un robinet. Chaque fois que l'air était vicié dans la chambre de travail, on ouvrait le robinet, et une partie de l'air comprimé s'en échappait. On obtint ainsi un renouvellement partiel de l'air, il est vrai, mais ce renouvellement n'était guère suffisant, et les ouvriers se sentaient souvent très incommodés par l'air stagnant. La durée du travail d'un ouvrier, qui était au commencement 4 heures de travail à la fois sur 8 heures de repos, lorsque la pression de l'air était moindre, on dut la restreindre à 3 heures de travail sur 9 heures de repos en plein air, et le travail fut continué de la sorte sans interruptions, jour et nuit.

Tandis que le séjour même dans la pile donne lieu à des inconvénients, il est vrai, mais non pas à un danger particulier, il en est tout autrement, lorsque les ouvriers quittent la pile et qu'ils sont exposés trop rapidement à l'influence de l'atmosphère. Il est vrai que les ouvriers devaient rester dans la chambre à air jusqu'à ce que l'air comprimé y fût suffisamment équilibré, il est vrai aussi que l'orifice par lequel s'échappait l'air comprimé était si petit, qu'il fallait, sous une pression de 3 atmosphères par exemple, trois quart d'heure avant que la chambre à air pût être mise en équilibre avec l'air extérieur; mais malgré toutes ces précautions, souvent les ouvriers ne furent pas absolument délivrés de l'air comprimé dont leur corps était pénétré. Les symptômes de maladie qui se montrent dans ce cas, sont surtout: douleurs violentes dans toutes les articulations, accompagnées de démangeaisons et de picotements insupportables, grande oppression de la poitrine, accélération de l'action du cœur, pesanteur de tête, engourdissement et paralysie partielle ou totale des extrémités inférieures, de la vessie et du rectum. Ces symptômes se présentent souvent immédiatement après la sortie des ouvriers, mais quelquefois seulement après une ou deux heures; ils peuvent être si violents, que la mort survient soudainement ou après très peu de temps. Un ouvrier quitta ainsi le travail, apparemment parfaitement bien portant; mais en chemin vers son logis, il tomba mort comme foudroyé. Chez quelques ouvriers, les symptômes disparaissent parfaitement après quelques jours; chez d'autres, les paralysies continuent pendant des mois entiers et ne se guérissent probablement jamais complètement.

La cause de ces phénomènes singuliers paraît, comme l'ont démontré diverses expériences que l'on a faites, reposer sur le fait qu'une partie de l'air comprimé qui a pénétré le sang, y reste lorsque la pression est diminuée, et qu'elle apparaît sous la forme de petites bulles d'air que le sang entraîne par tout le corps et qui donnent lieu aux dangereux symptômes nommés, dès qu'elles atteignent le cerveau, la moelle épinière ou d'autres organes vitaux.

Un remède efficace contre ces affections, on ne l'a sans doute guère trouvé encore. Les cas assez nombreux de cette nature qui arrivèrent pendant la construction du pont sur le Limfjord prouvent que, dès que la maladie se présentait avec des symptômes graves, il fallait le plus souvent la considérer comme incurable, au moins vis-à-vis de la question, si le malade serait en état de reprendre son ancienne occupation ou non. Il faut donc surtout s'étudier à tâcher d'éviter la maladie en question, ce qui ne peut guère s'effectuer, selon l'expérience que nous possédons jusqu'ici, que par une diminution aussi lente que possible de la pression de l'air dans la chambre à air. On vit aussi que, dès que l'orifice d'évacuation, qui était assez grand au commencement, eut été échangé plus tard contre un autre beaucoup plus petit, les cas de maladie devinrent en même temps non-seulement moins fréquents, mais aussi moins violents, quoiqu'on ne réussit pas à les empêcher tout à fait.

Après cette courte description de la méthode de fondation pneumatique et des phénomènes particuliers qui l'accompagnent, nous donnerons ci-après une relation de l'emploi de cette méthode à la descente des piles du pont du Limfjord.

Dans cette relation, les piles sont mentionnées dans l'ordre chronologique de leur construction; elles sont numérotées selon leur place dans la ligne du pont, la culée du côté de Nørre-Sundby ayant le numéro 1, et la culée du côté d'Aalborg, le numéro 7.

La culée du côté d'Aalborg.

Pile No. 7.

Les travaux de descente de cette culée furent commencés, vers la fin du mois de juin 1874, par la construction de l'échafaudage.

Échafaudage.

L'échafaudage devant supporter le poids de la culée pendant la première partie de la descente et la protéger en outre contre le courant et les glaces, il était nécessaire de lui donner une construction très solide, surtout à cause du peu de consistance du fond.

Il était constitué (voir pl. III) par 24 pieux de $15\text{ m},_5$ de longueur et $0\text{ m},_{31}$ d'épaisseur. Ces pieux étaient maintenus par des moises qui portaient un plancher mobile sur lequel le caisson fut rassemblé. A une hauteur d'env. $4\text{ m},_5$, ces pieux étaient reliés de nouveau entre eux à l'aide de pièces de bois portant deux fortes poutres doubles en fer, servant à suspendre la pile.

Chambre de travail.

Dès que l'échafaudage fut achevé, le rassemblage du caisson commença. Ce caisson a (voir pl. VIII) une forme rectangulaire, terminée par des avant-becs et arrière-becs demi-circulaires, absolument comme la culée. Il a une longueur de 10 m , sur $4\text{ m},_4$ de largeur et $2\text{ m},_4$ de hauteur.

Le plafond du caisson était établi en tôle de 11 millimètres d'épaisseur et renforcé par des poutres en tôle, une poutre reposant sous chaque assemblage des plaques en tôle d'env. 1 mètre de largeur; une enveloppe en tôle de 13 millimètres d'épaisseur, rivée au plafond, forme les côtés du caisson. Cette enveloppe, qui est formée de plaques en tôle d'env. 1 mètre de largeur, est renforcée au moyen de 5 séries de cornières horizontales, espacées de $0\text{ m},_{50}$; de plus, elle est reliée solidement au plafond au moyen d'une série de consoles solides en fer, formées d'une plaque triangulaire avec cornières, et établies au-dessus de tous les assemblages.

Tous les joints de la chambre de travail furent soigneusement lutés avec du ciment, afin d'éviter que l'air comprimé ne s'en échappât.

Suspension de la culée.

Dès que le caisson fut achevé, il fut suspendu sur l'échafaudage à l'aide de 4 vérins avec leurs chaînes.

Ces vérins (voir planche IV) avaient une épaisseur de 6 centimètres sur $2\text{ m},_5$ de longueur.

Les vis des vérins traversent librement les poutres doubles en fer placées sur la partie supérieure de l'échafaudage, et elles y sont soutenues par des écrous qui sont installés sur les poutres citées à l'aide d'un support en fer interposé. Ces écrous ont la forme d'une roue dentée dans leur partie supérieure et peuvent être tournés au moyen d'un collier avec encliquetage; on peut donc descendre la pile sans difficulté.

Les vis aboutissent sur leur partie inférieure dans un oeillet où l'on suspend les chaînes qui soutiennent la pile. Ces chaînes, qui sont à longues articulations dont les anneaux sont reliés entre eux par des boulons, s'accrochent à l'aide de crochets sous le bord inférieur du caisson en sorte de pouvoir facilement les débarasser.

On avait adapté sur chaque écrou un croc en fer forgé servant à y accrocher la chaîne pendant que l'on ajoutait de nouveaux anneaux, lorsqu'on était arrivé à l'extrémité de la vis.

Descente dans l'eau.

Dès que le caisson était suspendu aux chaînes, on enlevait le plancher de l'échafaudage et l'on descendait le caisson dans l'eau; descente que l'on put effectuer avec une régularité parfaite en tournant uniformément les 4 écrous. On appliqua en même temps le tube de descente et les hausses en tôle de 4 millimètres d'épaisseur servant d'enveloppe à la pile, dont la maçonnerie fut commencée le 23. septembre.

Maçonnerie.

La maçonnerie de remplissage était de briques bien cuites avec mortier de ciment de Portland, dans la proportion d'une partie de ciment sur 2 de sable. Le remplissage ne fut pas étendu jusqu'au tube de descente, mais interrompu à une distance de ce tube d'une demi-brique environ, afin de permettre d'enlever ce tube plus tard et de l'employer pour d'autres piles. On entourait d'abord tout le tube de descente seulement d'un mur mince, et l'on élevait un mur semblable le long de l'enveloppe extérieure en tôle, de sorte que l'intérieur de la pile était provisoirement creux, voulant ainsi éviter de charger les chaînes de suspension plus qu'il n'était absolument nécessaire,

et se réserver en même temps la possibilité de mieux régler la descente de la culée en remplaçant de maçonnerie une plus ou moins grande partie du creux.

Dès que la pile ne pénétrait plus dans le sol par son propre poids, on commençait le déblayement à l'aide de l'air comprimé. Déblayement dans l'air comprimé.

On appliquait, à cet effet, le sas ou la chambre à air, constituée par un tube en tôle de 13 millimètres d'épaisseur ayant le même diamètre que le tube de descente; on envoyait ensuite l'air comprimé dans la chambre de travail à l'aide d'une pompe foulante à double effet mue par une machine à vapeur de 16 chevaux. La machine aussi bien que la pompe étaient placées sur un bateau couvert qui se trouvait à côté de la culée (voir pl. X). Un tuyau solide en caoutchouc dirigeait l'air comprimé jusqu'à la culée, où il fut adapté à un tuyau en fer, qui envoyait, en traversant le tube de descente, l'air comprimé dans la chambre de travail. Le tuyau en fer était muni d'un clapet s'ouvrant en dedans et empêchant ainsi l'air comprimé de s'échapper de la pile, en cas que la pompe foulante devînt incapable de fonctionner par une raison ou l'autre.

Le déblayement de la chambre de travail, on essaya d'abord de l'effectuer à l'aide de la pompe dite de Friedmann (voir pl. IV). Le système de cette pompe est essentiellement le même que celui de l'injecteur Giffard, à la seule différence près que l'on presse à travers la pompe, au lieu de vapeur, un jet d'eau sous une pression de 6 à 7 atmosphères, provoquant ainsi une aspiration considérable dans un tuyau qui plonge dans la vase. La pompe Friedmann fut placée dans la chambre de travail et descendue avec elle. Une pompe foulante à double effet envoyait l'eau dans un régulateur à air qui la refoulait dans la pompe.

Cette pompe fut cependant éloignée de nouveau, après qu'on l'eut employée pendant 6 semaines, parce qu'elle s'était montrée peu avantageuse à cause de la consistance trop ferme de la vase. On se décida alors à creuser le sol à la pelle et à l'extraire dans des bennes à l'aide d'un élévateur.

Le déblayement et l'extraction de la vase s'opéra dès lors de la manière suivante: 2 à 4 ouvriers descendant dans la chambre de travail, y creusent le sol à la pelle et mettent les déblais dans les bennes. Dès qu'une benne est remplie, on la monte jusque dans la chambre à air, où le contenu est vidé dans la caisse carrée qui est appliquée sur le côté du sas (voir pl. IV). Cette caisse est divisée en deux compartiments égaux, communiquant avec le sas à l'aide de trous circulaires, et l'on peut en ouvrir les côtés extérieurs en dégageant les deux clapets qui les ferment hermétiquement. Les plafonds de ces deux compartiments sont munis de soupapes qui laissent échapper l'air comprimé. Les bennes étant vidées dans l'un de ces compartiments, on ferme, dès qu'il est rempli, le trou communiquant avec le sas. Deux ouvriers, qui se tiennent à l'extérieur, ouvrent d'abord la soupape et puis le clapet; ils sont alors en état de vider le compartiment. Pendant le vidage de l'un des compartiments, l'autre se remplit, de sorte que le travail peut continuer sans interruption.

La pile fut descendue à une profondeur de 17 mètres à l'aide de cette méthode — fonçage dans l'air comprimé et maçonnerie en plein air. Le fonçage put être continué sans employer l'air comprimé jusqu'à 19 mètres de profondeur; et puis il fallut y avoir recours de nouveau, jusqu'à 30 mètres de profondeur.

Lorsqu'on fut arrivé à ce point, l'eau pénétra de nouveau avec force dans la pile. On augmenta donc la pression de l'air jusqu'à 2 atmosphères et demie; mais cette pression, on la fit cesser le 10 juin afin de pouvoir mieux exécuter quelques travaux dans la partie supérieure des tubes de descente; 4 ouvriers y étaient occupés et se servaient de bougies ordinaires pour s'éclairer. Il faut que des émanations de gaz inflammables, provenant des couches vaseuses du fond, soient montées dans la pile, n'étant plus retenues par la pression de l'air, et qu'elles y aient été enflammées par les lumières. Car il y eut une explosion très forte; le clapet supérieur de la chambre à air fut presque

Explosion.

fermé, mais, heureusement, une forte corde qui pendait dans le sas, l'empêcha de se fermer hermétiquement; on réussit, grâce à cette circonstance, quoique avec beaucoup de peine, à se donner accès à l'intérieur de la pile et à sauver les ouvriers qui y étoient enfermés; la plupart de ceux-ci avaient cependant des brûlures sérieuses. Ainsi, un grand malheur fut évité, et ni la pile, ni les appareils de fonçage qui s'y trouvèrent, ne furent endommagés par l'explosion. Mais, on se procura tout de suite, afin d'éviter un accident semblable à l'avenir, des lampes de sûreté à gaze métallique, et il fut sérieusement défendu aux ouvriers de ne jamais employer d'autres lumières dans la pile.

Achèvement du
fonçage.

Les travaux de fonçage furent continués jusqu'au 1^{er} septembre 1875, sans trop de difficultés, et en employant tout le temps l'air comprimé; on avait atteint alors une profondeur de 34^{m,6} sous le niveau ordinaire du fjord. L'ingénieur qui dirigeait les travaux ayant déclaré qu'il devait considérer comme impossible tout travail sous une pression encore plus grande, et le sol étant composé, dans cette profondeur, de sable pur et incompressible, on arrêta le fonçage de la culée sur ce point, à une profondeur donc d'env. 16 mètres au-dessous de celle qui avait été provisoirement fixée dans le traité.

L'ingénieur en chef de la Compagnie de Fives-Lille adressa déjà vers le commencement de l'année une demande au gouvernement, tendant à obtenir la permission d'interrompre le fonçage à une profondeur de 22 mètres au-dessous du niveau ordinaire; il tâcha de démontrer, en se basant à cet égard sur une série d'observations sur la résistance due au frottement entre la pile et le sol environnant, faites dans le cours des travaux, que la résistance du sol et celle du frottement suffiraient ensemble à soutenir la pile à la profondeur citée. Cette opinion, les ingénieurs du gouvernement ne purent la partager, étant convaincus de la nécessité de pénétrer autant que possible dans le sol incompressible, uniquement à cause de la stabilité des piles contre la pression latérale — sans même vouloir discuter la valeur plus ou moins grande des observations et des calculs de la Compagnie de Fives-Lille. La suite de ces considérations fut aussi que toutes les piles, à l'exception de la culée du nord, où la consistance du sol était beaucoup plus favorable, furent descendues à une profondeur d'env. 34 mètres.

Après l'achèvement du fonçage, la chambre de travail et la partie inférieure du tube de descente furent remplis de béton composé dans la proportion d'une partie de ciment sur 2 de sable et 4 $\frac{1}{2}$ de pierres cassées, et l'on acheva le remplissage par une couche de mortier de ciment, afin de le rendre imperméable.

Le béton fut fabriqué sur l'échafaudage en dehors de la culée, mis dans des seaux et transporté ensuite dans le sas, qui était à cet effet mis en communication avec l'air extérieur. Dès que le sas était rempli de seaux, on fermait le clapet extérieur, comprimait l'air, et deux ouvriers placés dans le sas précipitaient le béton à travers le tube de descente dans le caisson; le béton fut ensuite étendu par couches et bien battu avec des pilons.

Cette méthode s'était cependant montrée très lente et excessivement fatigante et dangereuse pour les ouvriers placés dans le sas, à cause de la variation fréquente de la pression d'air — d'une à env. 3 atmosphères et vice versa, chaque fois que l'on introduisait dans le sas une nouvelle portion de béton; on adopta donc une méthode plus pratique pour l'introduction du béton qui devait servir pour les autres piles à construire.

On boulonna à cet effet sur la partie extérieure du sas, tout près du plafond, moitié en dehors du sas, un récipient en entonnoir — la chambre de béton (voir l'esquisse pl. IV) — dont les deux extrémités étaient hermétiquement fermées par des clapets à charnière, munis tous les deux de soupapes. Ainsi la chambre de béton peut être regardée comme une chambre à air, et elle fonctionne absolument de la même manière. Lorsque le béton devait être introduit dans la pile, on fermait le couvercle de l'extrémité intérieure et l'on remplissait le récipient avec du béton. On ouvrait alors le clapet de l'extrémité extérieure, et les ouvriers placés dans le sas ouvraient la soupape

du couvercle intérieur afin d'introduire l'air comprimé dans la chambre de béton; le clapet intérieur s'ouvrait alors de lui-même, et le béton glissait directement dans le caisson en traversant le sas.

Dès que le vidage était effectué, on fermait le clapet intérieur, faisait échapper l'air comprimé en ouvrant la soupape extérieure, et le remplissage recommençait.

Aussitôt que l'on eut terminé le remplissage du caisson, on enleva le tube de descente, afin de l'employer au fonçage d'autres piles, et le puits fut rempli de béton composé dans la proportion de 1—3—6. On put maintenantachever la maçonnerie en élevant la partie supérieure de la culée, qui était parementée en pierres de taille; elle fut terminée le 17 septembre 1875, et la construction de la culée avait ainsi duré, avec quelques interruptions, environ 14 mois.

Il était nécessaire maintenant de commencer aussitôt que possible le remblai de raccordement qui devait s'appuyer contre la culée, ce remblai devant servir comme chantier pour le montage de la superstructure. Ce travail fut exécuté avec beaucoup de précaution, parce que l'on craignait un déplacement de la culée; on tâcha donc d'abord de soutenir la culée en aval en formant, des matériaux que l'on avait extraits, un talus assez considérable devant la culée et en couvrant ce talus d'un enrochement à pierres perdues de grandes dimensions; le remblai, qui consistait en sable pur, fut ensuite régulé avec soin en couches horizontales. Malgré ces précautions, la culée commença à s'incliner dans la direction du fjord, après que le remblai l'eût atteinte. Il devint donc nécessaire de déblayer le remblai aussi vite que possible, et une partie en fut employée en aval de la culée, afin d'augmenter la résistance du talus contre la poussée des terres. On réussit de cette manière à arrêter le déplacement de la culée, qui avait atteint une déviation de la ligne de plomb d'un mètre et six centimètres, et puis, en déblayant le remblai jusqu'à une distance de 25 mètres et en creusant à l'aide de draguages un fossé derrière la culée jusqu'à 4 mètres de profondeur, on obtint de la ramener en partie à sa position primitive, le déplacement définitif n'étant maintenant que de 40 centimètres.

Déplacement de
la pile.

Ce déplacement ne fut accompagné d'aucun affaissement de la culée, ce qui prouve que la résistance du sol qui soutient la culée était suffisante. Mais il est clair que la construction de la culée était trop faible et qu'elle ne possédait pas la stabilité nécessaire pour pouvoir résister à la poussée du remblai; il fut donc nécessaire de modifier le projet primitif en ne faisant plus servir la culée comme telle; on ajouta donc, comme nous l'avons déjà mentionné, une travée de rive de 35 mètres de longueur, dont l'extrémité septentrionale reposait sur l'ancienne pile-culée, et l'autre extrémité sur un fondement construit dans le remblai et dont la fondation était établie au moyen de 84 pieux de 12 pouces ($0\text{ m}_{,32}$) enfoncés env. 14 mètres dans le sol et recouverts d'une couche de béton de $0\text{ m}_{,67}$.

La Compagnie de Fives-Lille proposa, en même temps que cette travée fut construite, d'en établir une semblable du côté de Sundby. Cette proposition ne fut cependant pas acceptée alors, et ce n'est que plus tard, lorsque la culée de cette rive montra, après que le pont eut été ouvert au trafic, un déplacement continu dans la direction du fjord, que l'on crut qu'il serait le plus sûr de déblayer encore le remblai derrière cette culée et d'établir une travée de rive semblable aussi sur cette rive.

La culée du côté de Nørre-Sundby.

Pile No. 1.

Le fonçage de cette culée fut commencé le 1^{er} avril 1875 et fut continué, en travaillant toujours dans l'air comprimé, jusqu'au commencement du mois de juin de la même année, la culée étant à cette époque descendue à une profondeur de 18 mètres au-dessous du niveau ordinaire. On essaya

alors de continuer le fonçage en plein air, mais il fallut y renoncer, la consistance sableuse du sol empêchant de travailler à sec dans le caisson. Il résulte du profil montré sur la planche XII, indiquant la composition du sol sur ce point, que le fond est constitué par une couche de vase jusqu'à 11 mètres; il devient ensuite de plus en plus sableux jusqu'à ne contenir que du sable fin entre la cote 18 et la cote 22; à partir de cette cote, le sol est composé d'argile pure.

Le fonçage fut donc arrêté et le remplissage en béton du caisson et du tube de descente fut commencé à cette profondeur de 18 mètres; cette opération fut achevée le 5 juin, de sorte que l'établissement de cette culée jusqu'au niveau du fjord put être terminé dans une période d'env. 9 semaines.

Le fonçage même fut effectué absolument de la même manière que la culée du côté d'Aalborg. La descente régulière de cette culée causa cependant de grandes difficultés, la culée tendant constamment à s'incliner en aval, et ce fut en vain que l'on tâcha de la tenir dans la position verticale à l'aide de chaînes et de puissants cabestans placés sur la rive. Les entrepreneurs ne réussirent pas à surmonter ces difficultés, malgré toutes leurs peines, et la culée dut rester avec son déplacement considérable — 0^{m,71} dans la direction du fjord.

Cela fit cependant que la distance des autres piles n'était plus juste, et l'on se vit dans la nécessité d'augmenter la largeur de la culée en arrière, en faisant faire saillie aux dernières assises en pierre de taille, comme le démontre la planche IX.

Le remblai fut alors continué jusqu'à la pile, mais on ne lui donna cependant pas toute sa hauteur, craignant des déplacements semblables à ceux de la culée méridionale; on s'attendait aussi, comme nous l'avons déjà mentionné, à devoir établir une travée de rive derrière cette culée. Mais la culée ayant été soigneusement observée, et n'ayant pas donné le moindre signe d'un déplacement pendant plus d'un an, on se décida, à cause de la dépense, àachever le remblai derrière la culée en tachant en même temps de la soutenir autant que possible en aval, par des enrochements à pierres perdues. La culée se tint aussi parfaitement immobile jusqu'au mois de janvier 1877, lorsqu'on observa un faible déplacement en aval, qui cessa cependant tout à fait, dès que l'on eut augmenté l'enrochement jusqu'à le faire monter à la quantité considérable de 2237 mètres cubes, représentant un poids d'env. 4 millions de kilogrammes.

On sait, d'après ce qui a été relaté déjà, que des indices de déplacement se montrèrent de nouveau après quelque temps, et qu'il fallut se décider à déblayer le remblai et à le remplacer par une travée de rive, plus petite cependant que celle qui fut établie vers l'extrémité méridionale du pont.

Pile No. 6.

Pendant que l'on était occupé au fonçage des deux culées, on fit les préparatifs nécessaires pour l'établissement de la pile numéro 6, la plus proche du côté d'Aalborg.

Échafaudage.

A cause de la plus grande profondeur d'eau, mais surtout à cause du poids plus considérable qui devait y être suspendu, on donna à l'échafaudage de celle pile, de même qu'à celui des autres piles, une construction essentiellement différente de celle des échafaudages des culées. Cet échafaudage était constitué par six gros pilotes de 27 mètres de longueur et de 1 mètre de diamètre, réunis à leur sommet par des poutres rivées en fer. Des traverses en bois, placées sur ces poutres, servaient, partie à supporter les vérins et les chaînes auxquelles était suspendue la pile pendant la descente, partie à l'établissement des grues et des autres appareils de montage. Les pilotes étaient réunis entre eux à un mètre environ au-dessus du niveau par des poutres horizontales qui portaient un plancher servant à l'assemblage du caisson, à peu près comme on l'avait fait avec les culées; ils étaient en outre contreventés par des tendeurs en fer rond d'env. 4 centimètres de diamètre

dont les extrémités inférieures étaient fixées à des colliers en fer que l'on fit glisser autour des pilots jusqu'au fond de l'eau, et dont les extrémités supérieures étaient boulonnées aux moises fixées à la partie extérieure des pilots. (Voir pl. III.)

Comme nous venons de le dire, les pilots avaient une longueur de 27 mètres, de sorte qu'ils pénétrèrent jusqu'à 13 mètres dans la vase aux endroits les plus profonds. Chaque pilot était formé (voir planche III) de 8 pièces de bois assemblées avec des boulons et des tirants et constituant une masse compacte d'un mètre d'épaisseur. Afin de donner à ces pilots une résistance plus grande, on en revêtit la partie inférieure, sur toute la longueur de l'enfoncement dans la vase, de madriers qui en portèrent le diamètre à $1m_{,30}$. Comme on le voit au dessin, les 8 pièces de bois laissaient au milieu du pilot un vide formant un carré de $0m_{,38}$ et traversant le pilot dans toute sa longueur. On avait d'abord eu l'intention de tirer parti de ce canal pour l'enfoncement des pilots, voulant, en employant une méthode semblable à celle que nous avons décrite en parlant de la pile-culée numéro 7, diriger un jet d'eau à travers un tuyau placé dans le canal et forcer la vase en dessous du pilot à l'aide d'une pompe à sable. Afin de rendre la vase liquide, on avait en outre adapté à un anneau fixé au bord inférieur du pilot un appareil assez compliqué, composé de deux couteaux courbés ou racles, auxquels une roue dentée engrénée avec un pignon communiquait un mouvement de rotation.

On ne réussit cependant pas à enfoncer les pilots par cette méthode, qui s'était aussi montrée inapplicable, lorsqu'on l'essaya au fonçage de la culée numéro 7; la méthode Friedmann fut donc définitivement abandonnée, et l'on enfonga les pilots dans le fond peu consistant en les chargeant d'un poids considérable.

On établit à cet effet un échafaudage de 40 pieds ($12m_{,6}$) de hauteur sur un radeau formé de deux pontons de $11m$ de longueur, $3m_{,45}$ de largeur et $1m_{,1}$ de hauteur, accouplés au moyen de deux poutres transversales, ac et bd (voir pl. III), qui étaient placées sur l'une des moitiés du radeau, l'autre moitié en étant laissée libre afin de permettre de placer le pilot entre les deux pontons.

L'enfoncement des pilots s'effectua alors de la manière suivante: on remorquait d'abord l'échafaudage jusqu'à l'endroit où devait être enfoncé le pilot en l'amarrant solidement; on montait alors le pilot de manière à le faire pendre d'aplomb dans l'échafaudage. Après avoir descendu le pilot à travers l'eau et la couche supérieure de la vase, on en continuait l'enfoncement en le chargeant directement. On plaçait à cet effet sur le sommet des pilots deux poutres transversales servant à l'établissement de vérins et de chaînes de la même construction que celles qui furent employées pour la suspension des piles à l'échafaudage, et l'on fixait ces chaînes aux pontons par leur extrémité inférieure. On était donc en état de soulever le radeau et l'échafaudage en faisant tourner les écrous, et d'en transporter la charge sur le pilot, qui fut ainsi enfoncé dans le fond du fjord. En chargeant le radeau d'un lest en briques, on fit monter la charge du pilot, partant sa résistance, jusqu'à 75,000 kilogrammes.

Les pilots furent enfoncés de cette manière 12 ou 13 mètres dans la vase, et cette opération fut effectuée avec facilité et promptitude, de sorte que 6 à 8 ouvriers pouvaient enfoncer un pilot en deux jours.

Dès que les 6 pilots étaient enfoncés et réunis entre eux au moyen des poutres en fer et des Fonçage de la pile. traverses en bois que nous avons mentionnées plus haut, l'assemblage du caisson, qui correspond en tous points à celui des culées, fut commencé (voir pl. VIII). Il a comme la pile une longueur de $12m_{,50}$ sur $5m_{,00}$ de largeur.

La pile, qui fut commencée le 19 juin 1875, fut descendue absolument de la même manière que les culées; à une profondeur de 24 mètres et demi sous le niveau ordinaire, les chaînes de suspension furent enlevées, et le fonçage fut continué jusqu'à une profondeur de $33m_{,9}$, où le sol était composé d'argile dure et résistante. On ne réussit pas à descendre cette pile non plus absolument à plomb, et elle a gardé une inclinaison vers le midi de $0m_{,27}$.

Jusqu'ici, la chambre à air avait été constituée par un seul tube dont le plafond et le fond Modification de la étaient munis de clapets qui permettaient d'entrer dans la pile ou d'en sortir. chambre à air.

Cette construction avait cependant le grand inconvénient qu'il fallait interrompre le déblayement dans la chambre de travail, chaque fois que quelqu'un devait entrer dans la pile ou en sortir, le clapet du fond devant être fermé chaque fois, et la communication entre le caisson et le sas étant donc interrompue. A de grandes profondeurs, cette interruption est très importante, les ouvriers employés au fonçage devant être relevés toutes les trois heures et devant séjourner dans la chambre à air à peu près une heure, jusqu'à ce que l'air y soit équilibré avec l'air extérieur. La quatrième partie du temps de travail fut donc perdue inutilement, et il était naturel que l'on cherchât les moyens de remédier à cet inconvénient qui avait une grande importance financière.

On effectua donc diverses modifications de la chambre à air, qui purent servir au fonçage des derniers 6 mètres de cette pile, et à l'aide desquelles on obtint de pouvoir éviter toute interruption du travail. La planche IV contient un dessin de la nouvelle construction.

Deux chambres cylindriques, les chambres d'équilibre, de $1\text{m}_{,60}$ de diamètre et $2\text{m}_{,52}$ de hauteur furent reliées à l'ancienne chambre à air. Elles communiquaient avec l'air extérieur aussi bien qu'avec l'intérieur de la pile au moyen d'ouvertures de $0\text{m}_{,75}$ de hauteur et de $0\text{m}_{,65}$ de largeur que l'on pouvait fermer hermétiquement à l'aide de clapets garnis de caoutchouc et qui étaient munies des tuyaux nécessaires pour l'introduction et l'échappement de l'air comprimé. Les chambres d'équilibre étaient éclairées par des yeux-de-boeuf solides adaptés au plafond. Le clapet supérieur de l'ancienne chambre à air fut fermé, et l'une des ouvertures dans sa partie inférieure fut remplacée par deux trous, afin de faciliter le montage et la descente des bennes. En général, ces trous étaient ouverts — excepté lorsqu'on devait faire des réparations dans la chambre à air et que l'on fermait la communication avec l'intérieur de la pile afin de pouvoir travailler dans l'air libre — et l'ancien sas ne servait dorénavant que comme une continuation du tube de descente, l'éclusement nécessaire pour l'entrée dans la pile et pour la sortie s'effectuant maintenant dans les chambres d'équilibre. On gagna par ce procédé qu'un relais d'ouvriers put descendre dans la pile par l'une des chambres d'équilibre, et un autre en sortir par l'autre chambre, sans que le montage et le vidage des bennes dans les sas primitif fût interrompu, ce qui facilita considérablement le fonçage.

Modification de l'appareil de montage. En même temps que les nouvelles chambres d'équilibre furent établies, les appareils à l'aide desquels on élevait les bennes furent également modifiés. Comme nous l'avons déjà fait observer, on avait jusqu'ici employé à cet effet un élévateur, mis en mouvement au moyen de l'air comprimé. Cet élévateur n'étant cependant construit que pour une hauteur de 20 mètres et se dérangeant d'ailleurs facilement, cette méthode fut abandonnée et remplacée par le treuil montré planche IV. (coupe verticale du sas et des chambres d'équilibre), composé d'une chaîne, de deux poulies avec manivelles et d'une poulie de renvoi établie dans la partie inférieure du sas. Les axes des manivelles traversaient le sas dans des boîtes à étoupes fermant hermétiquement, et les manivelles se trouvaient en dehors, où les ouvriers les manoeuvraient.

L'établissement de cet appareil de montage était toujours une amélioration, mais il n'était pas satisfaisant en tous points. On se décida donc plus tard à placer une machine à vapeur de 6 chevaux sur le sas; cette machine montait les bennes à l'aide d'un treuil d'une construction modifiée (voir l'esquisse pl. IV). Deux roues coniques non-dentées, a et b, étaient fixées sur un arbre horizontal que la machine à vapeur faisait tourner à l'aide d'une poulie-volant et de roues dentées. En déplaçant l'arbre cité au moyen des leviers V et V', dans le sens horizontal, les roues coniques peuvent être alternativement pressées contre une troisième roue conique dont l'arbre porte la poulie K qu'enroule la chaîne de montage. On était donc en état de tourner la poulie dans une direction ou dans l'autre, et de monter ou descendre les bennes à volonté, sans renverser le mouvement de la machine, et l'on pouvait même arrêter le mécanisme de montage sans arrêter la machine à vapeur.

Achèvement des travaux.

Après que l'on eut arrêté le fonçage de la pile à une profondeur de $33\text{m}_{,9}$ sous le niveau ordinaire, on coula le béton dans la chambre de travail et l'on diminua peu à peu la pression de

l'air. L'eau n'ayant pas pénétré à travers le béton, on put dévisser le tube de descente et l'enlever sans employer l'air comprimé. On acheva alors la maçonnerie en remplissant le vide intérieur de la pile et en élevant les dernières assises en pierre de taille, qui commencent à env. 2 m₂ au-dessous du niveau; à cet effet, on continua provisoirement l'enveloppe en tôle qui entoure la maçonnerie, jusqu'à env. 1 m au-dessus du niveau, la faisant ainsi servir de batardeau.

La pile était achevée le 27 juillet 1876; on y avait donc travaillé pendant 13 mois en tout, y compris une interruption de 5 mois pendant l'hiver.

On commença l'enlèvement de l'échafaudage, avant même que la pile fut terminée et pendant qu'elle était encore sous l'influence de l'air comprimé.

Éloignement de l'échafaudage.

Les quatres pilotes du milieu furent enlevés, deux pilotes à la fois de la manière suivante: deux des poutres massives en fer qui avaient servi pour l'échafaudage furent placées en travers de la pile et réunies aux deux bouts par des traverses, sur lesquelles étaient installés quatre des vérins employés pour la descente de la pile — deux pour chaque pilote — les écrous reposant sur les traverses et les extrémités inférieures des vérins étant fixées aux pilotes au moyen d'une chaîne. On réussit alors, quoiqu'avec peine, à enlever les pilotes en tournant les écrous.

Les deux pilotes extérieurs furent, à l'aide de treuils placés sur la rive et sur la pile la plus proche, tirés obliquement vers un côté, et arrachés ainsi en biais.

Le dessin de la planche VII donne un aperçu général des travaux pendant la descente d'une pile. La pile est encore suspendue à l'échafaudage, où un ouvrier est justement en train de tourner les écrous pour descendre la pile. Quatre ouvriers se trouvent dans la chambre de travail (le caisson), occupés à creuser le sol, tandis qu'un cinquième ouvrier, placé dans la chambre à air (le sas), est en train de vider les bennes dans la caisse qui est appliquée sur le côté du sas. On voit au dehors, la locomobile qui commande l'appareil de montage et le bateau couvert, avec la machine à vapeur et les pompes foulantes servant à envoyer l'air comprimé dans la pile, amarré à côté de celle-ci. Vers le sommet de la pile, les maçons sont occupés à éléver les deux murs annulaires, autour du tube de descente et le long de l'enveloppe extérieure en tôle de la pile, tandis que le reste de la pile est laissé vide provisoirement, afin d'en pouvoir régler le poids pendant la descente.

Aperçu des travaux de fonçage.

Pile No. 5.

L'établissement de l'échafaudage de cette pile fut commencé à peu près en même temps que celui de la pile précédente, de sorte que la maçonnerie put commencer le 21 septembre 1875.

Le travail même s'effectua absolument de la même manière que celui des autres piles et ne présenta rien qui eût un intérêt spécial. Après l'achèvement du fonçage cependant et du coulage du béton dans le caisson, il arriva un de ces malheureux accidents qui accompagnent si souvent les grands ouvrages, et sur la cause desquels on ne saurait se former qu'une idée plus ou moins fondée, tandis qu'il ne sera jamais parfaitement éclairci, où et chez qui se trouve la véritable faute.

Lorsque le béton du caisson fut durci et que l'on voulut enlever le tube de descente, travail Arrachement du tube de descente. qui n'avait pas causé la moindre difficulté pour les autres piles, on découvrit que le tube ne se laissait pas ébranler. On crut que c'était la virole inférieure que du mortier, des débris de briques, etc., perdus dans l'intervalle entre le tube et le mur environnant, auraient serrée contre ce mur, et l'on se décida donc à démonter le tube un peu plus haut et à abandonner la virole inférieure.

L'eau étant pénétrée dans la pile en traversant le béton, on envoya de nouveau de l'air comprimé dans le tube et l'on y fit descendre trois ouvriers qui devaient démonter le tube et enlever les boulons. Trois heures après la descente des ouvriers dans la pile, on entendit une détonation sourde, et immédiatement après, le tube de descente, qui avait une longueur de 30 mètres, fut arraché de la pile et projeté à une telle hauteur, que le bord inférieur en fut élevé jusqu'à environ 10 mètres au-dessus de la pile pour tomber ensuite dans le fjord en se renversant vers l'ouest et en faisant dans sa chute un grand trou dans l'enveloppe en tôle provisoire.

La maçonnerie ayant été arrêtée à 1 mètre env. au-dessous du niveau ordinaire pour donner place aux assises en pierre de taille, l'eau pénétra immédiatement dans la pile et la noya tout à fait, ce qui causa la mort de deux des ouvriers qui se trouvaient dans l'intérieur du puits. Le troisième fut projeté en l'air avec le sas et se noya dans le fjord.

Au premier moment après l'accident, on était disposé à l'attribuer à une explosion dans l'intérieur de la pile, mais les recherches que l'on fit plus tard démontrent qu'une telle explosion n'avait pas pu avoir lieu, et que la cause de l'accident devait être attribuée à la pression de l'air dans le tube de descente.

En effet, il résulte comme probable de l'instruction que les ouvriers avaient démonté le tube dans la pile et donné le signal de diminuer la pression d'air, qui était de 2,3 atmosphères. Au même moment, l'air comprimé aurait eu le dessus et aurait, après avoir brisé les rares boulons qui restaient encore, lancé le tube en l'air. Le calcul qui va suivre confirme ultérieurement la justesse de cette supposition.

En nommant

$$D \text{ le diamètre du tube de descente} = 2 \text{ mètres}$$

$$h_1 \text{ la hauteur} = 30 \text{ mètres}$$

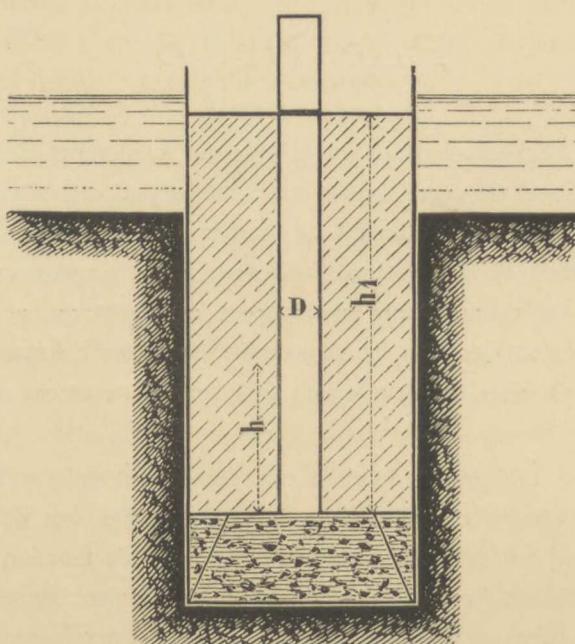
p la pression d'air = 2,3 atmosphères = 23,775 kilogrammes par mètre carré, on aura, au commencement du mouvement, pour

la pression intérieure sur le couvercle du tube:

$$P_o = \frac{D^2 \pi}{4} p = 74,656 \text{ kilogrammes.}$$

Dès que le bord inférieur du tube sera soulevé jusqu'à une certaine hauteur h_1 , la pression descendra et sera d'après la loi de Mariotte

$$P_h = P_o \frac{h_1}{h_1 + h}$$



Si l'on suppose maintenant que la force d'expansion de l'air cesse d'agir au moment où le bord inférieur du tube dépasse la pile, on aura: le travail consommé pour l'élévation du tube, égal à la quantité de travail développée par la dépression de l'air de P_o à P_h , partant égal à

$$\int_0^{h_1} P_h \, dh = \int_0^{h_1} \frac{h_1}{h_1 + h} \, dh = P_o \, h_1 \log_{\text{nat}} 2 \\ = 74,656 \times 30 \times 0,693 = 1,552,098 \text{ kilogrammètres.}$$

Ce travail devant être égal au travail consommé par la charge, partant au produit du poids V du tube, qui était de 36,000 kilogrammes, par la hauteur x jusqu'à laquelle a été projeté le tube, on a

$$Vx = 1,552,098 \text{ kilogrammètres,}$$

d'où l'on déduit

$$x = 43,1 \text{ mètres.}$$

Le bord inférieur du tube aurait donc dû être projeté jusqu'à une hauteur au-dessus de la pile de

$$H = x - h_1 = 43,1 - 30 = \text{env. } 13 \text{ mètres.}$$

Ce calcul ne tenant compte, ni de la résistance de l'air extérieur, ni du frottement entre le tube et la maçonnerie, ni enfin de la perte de travail occasionnée par le jeu entre la pile et le tube de descente, on verra que ce résultat correspond assez bien avec la hauteur observée d'env. 10 mètres.

Il a été question que la maçonnerie eût pu souffrir par la pression d'air; mais cette pression n'ayant pas surpassé 2,4 kilogrammes par centimètre carré, et le mortier de ciment frais supportant au moins 8 à 10 kilogrammes par centimètre carré, la maçonnerie étant d'ailleurs ultérieurement fortifiée par l'enveloppe en tôle qui l'entoure, il n'y avait rien à craindre à cet égard, ce qui fut aussi confirmé par un examen détaillé de la pile.

On commença, dès que l'on eut réparé l'enveloppe provisoire en tôle autour de la pile, à extraire les matériaux qui s'étaient accumulés dans le puits de descente. On fit usage pour ce travail, qui devait être fait sous l'eau, d'une »drague américaine«, dont la construction ressemble aux excavateurs généralement employés aujourd'hui, et l'on réussit de cette manière à extraire la couche supérieure, composée de laitance de béton, de sable et de vase; sous cette couche limoneuse, il y avait du sable pur qui fut également enlevé, à l'exception des deux derniers mètres près du fond qui étaient parfaitement tassés et que l'on crut pouvoir laisser, parce qu'il était impossible qu'ils pussent nuire en restant.

On commença alors le coulage du béton dans le puits; les premiers 9 mètres furent coulés sous l'eau en employant du béton très gras. Dès que le béton eut fait prise, le puits fut vidé et soigneusement examiné. On ne découvrit cependant pas la moindre lésion, et l'on acheva le coulage.

Cette opération étant finie le 25 février 1877, la pile fut terminée en posant les dernières assises en pierre de taille. On y avait travaillé pendant une période de 17 mois, avec plusieurs interruptions, il est vrai.

Achèvement de la pile.

Pile No. 2.

Aussitôt que la pile No. 5 eut atteint une profondeur de 22 mètres, l'échafaudage de la pile la plus proche du côté de Nørre-Sundby fut construit, et le caisson fut assemblé et descendu dans l'eau de la manière décrite plus haut. On commença alors, le 10 juin 1876, la maçonnerie de cette pile qui devait obtenir une si triste célébrité dans l'histoire du pont.

Le travail fut continué sans accidents sous l'air comprimé, comme d'habitude, jusqu'à ce que la pile eut atteint une profondeur d'env. 16 mètres. A ce moment, une tempête éclata pendant laquelle le bateau qui portait la pompe foulante et la machine à vapeur fit eau et chavira. La chaudière s'enfonça dans le fjord, tandis que la pompe et la machine à vapeur restèrent suspendues

au bateau. L'envoi de l'air comprimé ayant été arrêté, la pile s'affaissa subitement, mais par bonheur l'enveloppe en tôle resta au-dessus de l'eau.

On ne travaillait pas dans l'intérieur de la pile à cause de la tempête et il n'y eut donc pas d'autre malheur; mais cet accident eut cependant par ses suites une influence fatale sur la marche des travaux, car il faut sans doute admettre qu'il a été — sinon la seule cause — au moins une des causes essentielles du malheur qui arriva quelque temps après, le renversement de la pile, malheur qui fit que non-seulement le fruit des travaux des derniers mois fut anéanti, mais que l'on fut placé vis-à-vis d'un ouvrage des plus difficiles et des plus précaires.

Renversement de la
pile.

La perte des chaudières ayant fait que l'on ne pouvait plus envoyer l'air comprimé dans la pile, on se décida, afin de ne pas perdre de temps, à continuer la maçonnerie sans extraire simultanément les déblais dans la chambre de travail; on laissa donc la pile s'enfoncer librement dans la vase par son propre poids. Cette méthode n'a pas d'inconvénients, lorsque le sol est parfaitement uniforme, mais s'il ne l'est pas, ou s'il contient des pierres ou des objets semblables, on comprendra que la pile sera très exposée à des déplacements, dès que le tranchant du caisson ne rencontre pas sur tout son pourtour un sous-sol de la même consistance, et que la pile n'est pas supportée et tenue en équilibre par l'air comprimé.

Dans le cas en question, la pile était encore en partie soutenue par les quatre chaînes dans lesquelles elle avait été suspendue dès le commencement, mais au fur et à mesure qu'elle s'enfonçait davantage, elle commença à s'incliner vers le côté, d'abord vers le nord, le déplacement ayant atteint une grandeur d'env. $0^{\text{m}},_{33}$ le 22 juillet. On réussit cependant, à l'aide d'une charge unilatérale, c'est à dire en continuant la maçonnerie du côté méridional seulement, à redresser la pile peu à peu, de sorte qu'elle était verticale de nouveau le 7 août. Elle commença cependant alors à se déplacer vers le sud, et ce mouvement continua, quoi que l'on tâchât de remettre la pile en équilibre en élévant la maçonnerie du côté septentrional.

Vers midi le 8 août, on remarqua que les chaînes du côté septentrional étaient détendues, tandis que la pile était exclusivement suspendue aux chaînes méridionales, qui menaçaient de se rompre. On lâcha les chaînes afin d'éviter une rupture, mais alors le mouvement vers le sud augmenta jusqu'à atteindre un déplacement de 1 centimètre et demi par heure. On établit, afin de soutenir la pile, le cric entre celle-ci et les pilotes méridionaux, mais la pile entraîna les pilotes; on entassa des briques sur le côté méridional de la pile et l'on se préparait à amarrer la pile à la rive septentrionale, mais avant que l'on eût pu effectuer ces dispositions, l'échafaudage commença à céder visiblement, les ouvriers sautèrent dans les barques, et un moment après, à 6 heures de l'après-midi, la pile se coucha tout à fait en se dirigeant vers le midi et entraîna l'échafaudage.

Le fonçage avait atteint à ce moment une profondeur de $21^{\text{m}},_1$ sous le niveau ordinaire, et la maçonnerie était élevée jusqu'à $0^{\text{m}},_{32}$ au-dessus de la surface de l'eau. La pile se coucha exactement dans la direction longitudinale du pont et se déplaça en même temps un peu vers le nord comme le montre le profil de la planche IX.

Quant à la question des causes de l'accident, il y eut des opinions divergentes entre les ingénieurs du gouvernement et ceux de la Compagnie de Fives-Lille. Ces derniers étaient portés à chercher la cause de l'accident dans l'enrochement à pierres perdues exécuté autour de la culée du côté de Nørre-Sundby, alléguant que la poussée de l'enrochement se serait transmise à travers la vase jusqu'à la pile numéro 2 et en aurait causé le renversement. La quantité totale de l'enrochement était d'env. 527 mètres cubes, pesant env. 950,000 kilogrammes. Il avait été exécuté deux mois et trois quarts avant le commencement de la maçonnerie de la pile et était resté intact depuis.

Selon l'opinion de l'ingénieur de la compagnie, la poussée de cet enrochement aurait, dans la période du 12 juin au 22 juillet, où la pile traversa les couches supérieures peu consistantes, déplacé la base de la pile et l'aurait fait marcher $0^{\text{m}},_{37}$ vers le sud, sa partie supérieure étant soutenue par

l'échafaudage. La pile ayant rencontré le 22 juillet une couche relativement plus compacte qui en soutenait la base, la même poussée l'aurait d'abord relevée et l'aurait ensuite déplacée vers le sud.

Afin de mieux éclaircir ces faits, on leva le profil exact du fond entre les deux piles et l'on fit, à peu près au milieu de l'intervalle entre ces piles, des observations tendant à s'assurer s'il était possible d'y découvrir un effet quelconque de la poussée, provenant de l'enrochement. On ne découvrit cependant à l'aide des observations rien qui pût appuyer l'opinion émise par la Compagnie. En étudiant la table suivante, contenant les observations de la position de la pile faites du 12 juillet jusqu'au 8 août, on ne peut guère non plus en déduire que la consistance du sol ait été telle que l'a supposée la Compagnie. Car en considérant la dernière colonne de la table, qui donne la descente par 24 heures,

Date	Cote du tranchant du caisson sous le niveau ordin.	Déplacement de la pile		Descente par 24 heures.
		vers le sud	vers le nord	
Le 12 juillet 1876 .	16,95 m	"	0,13	
» 13 " "	17,10	"	0,13	{ 0,15 m
» 14 " "	17,50	"	0,17	0,40
» 15 " "	18,15	"	0,20	0,65
» 18 " "	18,60	"	0,29	0,15
» 22 " "	19,00	"	0,37	0,10
» 26 " "	19,62	"	0,30	0,15
» 28 " "	19,90	"	0,24	0,14
» 3 août "	20,29	"	0,11	0,07
» 6 " "	20,55	0,00	0,00	0,09
» 7 " "	20,69	0,25	"	0,14
» 8 " " à 7 h. du matin	20,85	0,30	"	0,16
» 8 " " medi	"	0,40	"	
» 8 " " 2 h. après midi	"	0,50	"	{ 0,65
» 8 " " 5 h. "	21,12	Reversement		.

on verra que les couches traversées du 15 juillet jusqu'au 7 août ont dû avoir à peu près la même consistance, et que, le 22 juillet surtout, lorsque le déplacement vers le nord atteint le maximum et que la pile commence à se redresser vers la position verticale, il n'y a aucun changement visible dans la consistance du sol. Ce n'est que le 7 et le 8 que la descente de la pile est assez considérable, ce qui indique que le sol est moins consistant.

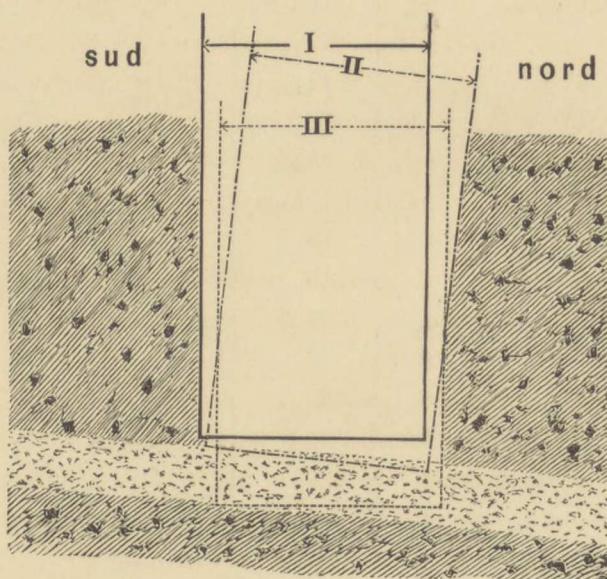
Il n'y avait donc rien qui pût faire soupçonner que le renversement de la pile eût été causé par une poussée latérale contre la pile, venue du dehors, tandis que les observations que l'on avait faites offrent plusieurs circonstances qui confirment essentiellement la justesse de l'opinion soutenue par les ingénieurs du gouvernement, que le renversement de la pile est dû tout simplement à la consistance inégale du sol et au fait que le fonçage à été effectué sans le secours de l'air comprimé.

En effet, les piles sont toujours exposées à des déplacements, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, selon que les différentes parties du tranchant du caisson rencontrent des couches de vase plus ou moins consistantes, des veines de sable inclinées, des pierres, etc. On s'oppose à ces déplacements, tantôt en descendant les chaînes, tant que la pile y est suspendue, d'un côté plus que de l'autre, tantôt en n'élevant la maçonnerie que d'un côté, tantôt, lorsque la pile est sous l'influence de l'air comprimé, surtout en ne déblayant que l'une des moitiés de la chambre de travail. Cette dernière méthode produisant particulièrement de bons résultats, et la pression d'air supportant une grande partie du poids de la pile et l'empêchant ainsi de s'enfoncer rapidement, on comprendra que l'on est privé, en tra-

vaillant sans air comprimé, d'un des moyens les plus efficaces de soutenir la pile pendant la descente.

En partant de ces considérations, les ingénieurs du gouvernement ont pensé que le renversement se sera effectué de la manière suivante:

Vers le 12 juillet, le bord inférieur de la pile aura rencontré une couche plus compacte, inclinée vers le nord (voir l'esquisse ci-jointe, position I); la pile ayant continué de s'enfoncer, sa partie méridionale aura rencontré une résistance plus grande que celle du nord, ce qui aura causé un déplacement de la pile vers le nord (voir position II). En chargeant le côté méridional de la pile et en élevant la maçonnerie de ce côté seulement, la pile aura repris sa position verticale (III), mais alors, la partie méridionale du tranchant du caisson aura traversé la couche compacte, tandis que la partie septentrionale en était toujours retenue, et la suite en aura été que la pile aura commencé à se déplacer vers le sud. La pile étant de plus considérablement chargée de ce côté, cette circonstance aura accéléré le déplacement à un tel point, que la pile a fini par se coucher dans le fjord.



Que cette explication soit l'explication correcte, c'est une question qui doit nécessairement rester indécise; mais une certaine confirmation lui est cependant donnée par la circonstance que l'on trouva effectivement, comme on l'avait supposé, une veine de sable inclinée vers le nord, lorsqu'on examina soigneusement le sol, après que l'on eut descendu la nouvelle pile jusqu'à la profondeur en question.

Construction d'une nouvelle pile.

Quelle que fût la cause de l'accident, il fallait cependant aviser aux moyens de construire une nouvelle pile au lieu de celle qui s'était couchée dans le fjord. La question sur la manière de s'y prendre présentait cependant de très grandes difficultés, parce que la pile s'était justement couchée dans la ligne du pont et qu'il serait donc presque impossible d'éviter de la rencontrer, même en changeant un peu les longueurs des travées. On aurait peut-être pu essayer d'éloigner la pile en la faisant sauter, mais d'abord c'eût été un procédé très incertain, à cause des circonstances locales, et ensuite, on avait peur d'endommager les autres piles. On n'avait en réalité que le choix entre les deux procédés suivants: ou construire deux nouvelles piles, une de chaque côté de la pile renversée, ou bien tâcher de traverser celle-ci, et construire la nouvelle pile au même endroit que l'ancienne.

Le première de ces méthodes était naturellement la plus sûre, mais c'était aussi une solution très peu satisfaisante de la question, parce qu'elle devait absolument briser la symétrie que l'on pouvait exiger d'un ouvrage comme le pont sur le Limfjord, et parce qu'elle serait en outre très dispendieuse,

deux piles devant être construites au lieu d'une et ces deux piles devant être reliées entre elles au moyen d'une construction en fer très solide et très chère qui aurait à porter la superstructure.

L'autre méthode était la solution la plus belle et la plus complète du problème, mais elle présentait des difficultés extraordinaires et était accompagnée d'un risque considérable pour les entrepreneurs. Percer d'abord, à une profondeur de 21 mètres, une masse de maçonnerie comme celle de la pile, couverte en dehors et en dedans de constructions en fer, et descendre ensuite une nouvelle pile entre les débris de l'ancienne pile jusqu'à une profondeur de 34 mètres sous la surface de l'eau, c'était un travail d'une nature si particulière et si inconnue, que l'on pouvait bien rester interdit en pensant à toutes les circonstances imprévues qui pourraient en entraver l'exécution.

Après des explorations faites pendant longtemps et avec beaucoup de soin, les entrepreneurs se décidèrent néanmoins à choisir la dernière méthode, c'est à dire à descendre la nouvelle pile en traversant l'ancienne.

Les ingénieurs de la Compagnie de Fives-Lille méritent la plus grande reconnaissance, parce qu'ils ne se sont pas laissés intimider par les difficultés qu'ils rencontreraient en exécutant ce travail, et il faut admirer leur habileté à surmonter tous les obstacles et la précision avec laquelle ils surent mener à bonne fin toute l'entreprise. Ainsi, la reconstruction de cette pile est devenue, grâce à leur activité, une des parties les plus belles et les plus intéressantes de tout ce grand ouvrage.

L'établissement de l'échafaudage pour la nouvelle pile fut commencé au printemps de l'année 1877. Il a fallu (voir pl. IX) disposer les pilotes d'une manière un peu différente d'auparavant, en les descendant en deux groupes, un groupe de chaque côté de la pile renversée, et reliés à leur sommet par deux poutres en fer de 16 mètres de longueur, sur lesquelles étaient installés les vérins qui portaient la pile.

Le 5 juillet 1877, onze mois donc après le renversement de la première pile, le caisson de la nouvelle pile était placé sur l'échafaudage, et la descente commença.

Après avoir continué la descente jusqu'à une profondeur d'environ 12 mètres sous le niveau ordinaire, les entrepreneurs parvinrent au résultat qu'il fallait changer la place de la pile, parce qu'elle rencontrerait, si l'on continuait la descente, le caisson de la pile renversée, dont on considérait le percement comme inexécutable.

La pile fut donc déplacée, suspendue toujours aux chaînes, sur une étendue de 3 m₁₅ vers le sud, distance qui correspond à celle qu'il y a entre deux montants de la superstructure. A cet effet, on plaça sur le sommet des pilotes les plus proches AD et BC (voir Pl. IX) des longrines doubles en bois de forte dimension que l'on prolongea au-delà des pilotes méridionaux en soutenant les extrémités libres contre ces pilotes à l'aide d'étais solides. Puis on cala entre ces longrines et le bord inférieur des deux poutres en fer, e et f, des pièces de bois que l'on recouvrit de plaques en fer, afin de former une surface unie sur laquelle les poutres citées pussent glisser pendant le déplacement.

Après avoir enlevé la partie méridionale du plancher, et après avoir envoyé, afin d'alléger la pile, de l'air comprimé dans la chambre de travail jusqu'à une pression d'une atmosphère, on poussa les poutres lentement vers le sud au moyen de crics qui furent appliqués sous chacune de leurs extrémités. Cette opération réussit parfaitement. La pile était ainsi suspendue sur le côté méridional de l'échafaudage, ce qui fit qu'il devint nécessaire d'enfoncer plus tard encore deux pilotes sous les extrémités libres des longrines citées, les pilotes de ce côté étant maintenant un peu trop chargés.

Le 25 août 1877, le bord inférieur du tranchant du caisson rencontra la pile renversée à une profondeur de 13 mètres sous le niveau ordinaire, et le percement de la pile fut commencé. Cette opération, on dut la faire avec la plus grande précaution, surtout au commencement, afin d'empêcher que la nouvelle pile ne glissât sur la surface inclinée de la pile couchée. On disposa donc, en effectuant la maçonnerie, le poids de la pile de telle sorte qu'elle pût se tenir presque flottante sans exercer aucune pression essentielle sur les objets adjacents.

Changement de
l'emplacement de
la pile.

Le percement fut exécuté au moyen de ciseaux à froid, en perçant d'abord un petit canal concentrique au tranchant du caisson et le dépassant assez pour qu'il pût librement traverser la maçonnerie environnante, et en éloignant ensuite de la même manière les autres matériaux qui se trouvaient dans la chambre de travail.

En général, ce travail fut très pénible, et l'on eut surtout de grandes difficultés à mettre en pièces le tube de descente, qui dut être brisé en petits morceaux avant qu'on pût l'éloigner de la pile.

Le travail avança cependant régulièrement; on n'avait qu'une crainte, et c'était que les pièces détachées de l'ancienne pile ne s'enfouissent dans le sol et ne serrassent la pile de manière à en entraver la descente. Cette crainte ne fut pas justifiée, mais peu de temps après que le côté méridional du tranchant eut dépassé la maçonnerie, on remarqua que la nouvelle pile commençait à s'incliner vers le nord, probablement à cause d'une pression provenant de la partie méridionale de la pile renversée.

Ce déplacement continuait, et l'on dut arrêter les travaux de fonçage — et soutenir la pile à l'aide d'un étançonnement provisoire contre la superstructure, qui était avancée à cette époque presque à mi-chemin entre la pile et la culée du côté de Nørre-Sundby (voir pl. IX).

En formant en même temps un talus de gravier devant le côté septentrional de la pile, on réussit à la redresser, de sorte que l'on put recommencer le fonçage.

Lorsqu'on eut atteint une profondeur de 20 mètres sous la surface de l'eau, on rencontra subitement de grandes pièces en fer; c'était toute la partie méridionale de l'ancien caisson avec les consoles qui y étaient rivées; mais on n'en trouva ni le plafond, ni les poutres en tôle qui le renforçaient; il faut donc supposer que le plafond et la partie septentrionale du caisson seront restés attachés à la pile. Lorsque la pile se coucha et se déplaça en même temps vers le nord, la partie méridionale du tranchant aura été retenue par le sous-sol, et cette partie du caisson se sera détachée et aura pris la position renversée montrée sur la planche IX.

L'éloignement de ces pièces en fer, que l'on rencontra contre toute attente, causa des difficultés assez considérables, toutes les pièces devant être tout à fait démontées et en partie coupées en morceaux, comme celles du tube de descente, afin de pouvoir les faire sortir à travers le sas.

On réussit enfin le 4 avril 1878 à enlever les dernières parties de la pile renversée; le percement avait ainsi en tout pris 7 mois et demi et nécessité un travail moyen, continué jour et nuit, de 40 ouvriers.

On retira de la pile, en tout: 20,300 kilogrammes de pièces en fer, 280 mètres cubes de maçonnerie et 5 mètres cubes de bois appartenant à l'échafaudage.

L'achèvement du fonçage fut effectué absolument de la même manière que celui des autres piles; seulement, la pile ne descendit pas régulièrement à fur et à mesure que l'on eut effectué les déblais, mais on fut souvent obligé de diminuer la pression d'air pour faire descendre la pile, ce qui fait supposer que les débris de l'ancienne pile auront donné lieu à un frottement assez considérable. On réussit néanmoins à descendre la pile exactement à plomb, et le 11 août 1878, donc après 13 mois de travail, la reconstruction de cette pile était terminée.

Pile numéro 3.

La construction de cette pile, qui fut commencée le 7 septembre 1876 et dura 12 mois, jusqu'au mois de septembre 1877, n'offrit aucune circonstance d'intérêt particulier, si l'on excepte que l'on réussit à descendre cette pile jusqu'à 26 mètres sous la surface de l'eau, sans employer l'air comprimé, la pile s'enfonçant par son propre poids dans la vase, que l'on extrayait ensuite du tube de descente ouvert, soit au moyen de la drague américaine, soit au commencement en déblayant le tube de la façon ordinaire, la vase étant compacte et imperméable.

A une profondeur de 26 mètres, le sol étant constitué de sable et la pile ne voulant plus descendre, on fut obligé d'employer la méthode pneumatique pour les derniers 8 mètres.

La pile, qui s'était déplacée pendant le fonçage, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, resta avec un déplacement définitif de 0^{m,12}.

Pile du pont tournant, numéro 4.

Comme la pile précédente, cette pile fut descendue jusqu'à une profondeur d'env. 26 mètres sans employer l'air comprimé pour l'extraction des déblais, et les derniers 8 mètres seulement furent enfouis à l'aide de la méthode pneumatique.

En observant le temps qui s'écoula pour effectuer cette dernière partie du fonçage et en le comparant avec le temps que nécessitaient les travaux au commencement, on verra combien l'habitude, l'expérience que l'on y avait gagnée et les perfectionnements que l'on avait introduits, avaient contribué à les accélérer.

Les derniers 8 mètres de la pile du pont tournant représentaient ainsi un volume de 568 mètres cubes et furent descendus pendant une période de 9 semaines, tandis que, par exemple, la descente des derniers 6 mètres de la pile numéro 6, représentant un volume de 324 mètres, prit 13 semaines. On put donc, pour la pile du pont tournant, effectuer un fonçage de 63 mètres cubes, mais, pour la pile numéro 6, seulement de 25 mètres cubes par semaine.

3. Superstructure.

Le tablier des deux travées fixes de chaque côté du pont tournant est formé par quatre poutres prismatique à treillis de 6^{m,30} de hauteur. Chaque poutre a une longueur de 132^{m,3}, tandis que les poutres de la travée du pont tournant ont 53^{m,55} de longueur. Les poutres sont à diagonales croisées du système double, formant un angle de 45 degrés avec la ligne horizontale, et coupant les montants verticaux, espacés de 3^{m,15}, en deux parties.

Les deux poutres étant espacées, de milieu à milieu, de 4^{m,90} (voir la section transversale du tablier sur la pl. VI), et les montants ayant une largeur de 500 millimètres, la largeur intérieure libre est de 4^{m,40} sur 4^{m,961} de hauteur libre au-dessus du sommet des rails.

Les semelles, supérieures et inférieures, ont la forme de T; les âmes verticales en tôle sont de 600×13, les deux cornières de $\frac{110 \times 110}{16}$ et les tables superposées en nombre variable (de 1 à 7), sont de 700×10. Les diagonales, qui sont formées de fers en L, sont reliées directement sur les âmes verticales des semelles. Dans le cours du pont, les montants sont composés de 4 cornières reliées par un treillis en tôle de 100×8 m. m.; au-dessus des piles et sur le milieu de la travée du pont tournant, ce treillis est remplacé par deux tôles de 10 m. m., assemblées avec l'âme à l'aide de cornières, et les montants sont de plus renforcés par un cadre de 600 millimètres de largeur, également en cornières (voir pl. XI).

A la partie supérieure, les semelles des poutres à treillis sont reliées, à l'aide de goussets en tôle de 8 m. m., au droit de chaque montant, par des poutres transversales à croisillons de 600 millimètres de hauteur. Afin d'en augmenter la stabilité, ces poutres sont à âme pleine au-dessus des piles, et la construction est ultérieurement renforcée par deux contreventements, des croix de

fers en T, formant le contreventement supérieur, et des croix de Saint-André en fer Saint-André de plat formant le contreventement inférieur.

Les pièces de pont correspondant aux montants ont 600 millimètres de hauteur et sont en forme de I, avec âme pleine et deux cornières supérieures et inférieures $\frac{100 \times 100}{14}$; elles reposent par leurs extrémités sur les tables inférieures des poutres, et sont en outre reliées aux âmes verticales des semelles et aux montants à l'aide de goussets vitaux.

Au-dessous des rails règnent deux cours de longerons en forme de I, avec âme pleine de 450 millimètres de hauteur et 8 millimètres d'épaisseur, et 4 cornières de $\frac{70 \times 70}{13}$, qui supportent, avec deux autres cours de longrines latérales formées de fers en L, une de chaque côté, les traverses en bois sur lesquelles sont fixés les rails et le plancher.

Les grandes travées n'ont qu'un appui fixe, à leur point de rencontre avec la travée tournante; les autres supports sont munis de rouleaux permettant la dilatation et la contraction des travées par suite des changements de température. Les appuis fixes sont constitués par des pièces en fonte de 1 m. 20 de longueur et de 451 millimètres de hauteur, encastrés dans la maçonnerie à l'aide de nervures sur leur face inférieure. Les supports mobiles sur les culées et les piles sont respectivement constitués de 7 et de 12 rouleaux de 285 millimètres de diamètre, retenus dans leur position à l'aide de bandes en fer de 100 millimètres de largeur, deux de chaque côté des rouleaux.

Mécanisme de rotation.
Planche XIII.

La rotation du pont tournant est effectuée au moyen d'un pivot en fer forgé de 300 millimètres de diamètre, et d'un système de 24 galets coniques en acier, reliés entre eux au moyen de fers en L formant un anneau de 5 m. 30 de diamètre. La couronne de roulement inférieure est en fonte, et elle est réunie par 8 bras également en fonte avec le moyeu, la pièce centrale qui entoure le pivot. Le moyeu sert à soutenir le pivot et les rouleaux dans leur position, des barres en fer rond de 50 millimètres de diamètre reliant ces derniers au moyeu à l'aide d'un anneau en fer forgé qui l'entoure.

La pile du pont tournant étant creuse, le moyeu est porté par une poutre solide double en tôle de 800 m. m., servant en même temps à soutenir et à guider le pivot.

La couronne de roulement supérieure qui sert à répartir la charge du pont sur la couronne de roulement inférieure, est en fer, en forme de I, de 328 millimètres de hauteur; ses huit bras sont des fers en L, assemblés au centre par deux fortes plaques circulaires en tôle, enfermant un collier en fonte que traverse le pivot.

Afin de pouvoir fixer le tablier du pont autour du pivot, la pièce de pont qui se trouve au-dessus de la pile est partagée en deux pièces de pont qui se réunissent vers les extrémités, en laissant au milieu un espace libre de 550 millimètres qui contient une forte pièce en fonte entourant le pivot; cette pièce est solidement boulonnée aux pièces de pont.

Afin de remédier à des affaissements éventuels irréguliers de la maçonnerie et à l'augmentation du frottement dans la couronne de roulement, une partie de la charge du pont peut être transmise sur le pivot. A cet effet, la crapaudine est composée de trois disques superposés en acier logés dans la pièce en fonte citée; ils sont surmontés d'une plaque en fer de 100 millimètres d'épaisseur qui transmet au pilot la charge du pont par l'intermédiaire de 4 boulons de 70 millimètres. Ces boulons ont leurs extrémités sous les plaques circulaires qui soutiennent les bras de la couronne supérieure.

Le mécanisme de rotation est entouré d'une cuve en fonte (voir pl. XII) qui sert à empêcher autant que possible l'eau de pénétrer dans la pile; la moitié de cette cuve porte sur sa face intérieure un demi-cercle denté, et le mouvement de rotation se fait au moyen d'un pignon engrenant avec la couronne dentée. Ce mécanisme ne permettant cependant d'ouvrir le pont que dans une seule direction, jusqu'à un angle de 90 degrés, et n'étant d'ailleurs qu'à simple engrenage, on le modifia plus tard (voir la pl. XII) en installant autour de la cuve en fonte encore une couronne dentée, encastrée dans la pile même et engrenant à double engrenage avec deux pignons en acier fondu. Une cuve en tôle fut installée tout autour de cette couronne dentée afin de l'abriter.

On gagna par cette disposition, non-seulement une augmentation considérable de la force de rotation, due au double engrenage et au diamètre plus grand de la couronne, mais aussi le grand avantage de pouvoir tourner le pont dans toutes les directions, ce qui est très important; car on facilite essentiellement la rotation en tournant le pont »avec le vent».

Quand le pont est fermé, chaque extrémité du pont tournant repose sur deux cames de support fixées sur un même axe et pouvant être manoeuvrées de manière à éléver le tablier à la juste hauteur, au moyen d'une vis verticale qui actionne un arbre fixé à l'axe. Un verrou qui s'avance en même temps dans la travée fixe attenante, empêche le pont de se tourner de côté.

Afin de pouvoir arrêter le pont provisoirement, lorsqu'on est en train de le fermer, encore un verrou qui se laisse visser à la travée fixe attenante, est placé à chaque extrémité du pont sur le dernier des montants.

Le tablier des travées de rive établies sur les extrémités du pont (voir pl. XIV) est formé de deux poutres prismatiques à treillis de $3\text{ m},_{15}$ de hauteur, avec diagonales croisées du système simple. La section transversale de leur construction correspond en tous points à celle des grandes travées du pont. Elles sont fixées sur les deux piles-culées à l'aide de pièces en fonte encastrées dans la maçonnerie, leur autre extrémité reposant, à cause des dilatations et des contractions occasionnés par les changements de la température, sur des rouleaux placés sur les fondements établis dans les remblais de raccordement et destinés à supporter les travées de rive.

Travées de rive.

Tous les fers servant à la superstructure ont été fabriqués et ajustés dans les ateliers de la Montage et mise en Compagnie de Fives-Lille à Lille, d'où ils furent expédiés à Aalborg. Les travées fixes ont été construites sur les remblais de raccordement derrière les culées; le pont tournant, au contraire, a été monté sur place au moyen d'un échafaudage établi dans le fjord. Cet échafaudage était formé de longues poutres en bois de 12 pouces ($0\text{ m},_{32}$) d'équarrissage allant d'une pile à l'autre et soutenues par une poutre transversale en fer reposant sur deux des pilotes qui avaient déjà servi au fonçage des piles. On se servit, pour le montage, d'une grue roulante qui se mouvait sur une voie de fer le long de tout le pont tournant (voir pl. X).

Les travées fixes ont été montées et rivées, nous venons de le dire, sur les remblais; c'est qu'on voulait les mettre en place en les roulant sur les piles.

La manière d'effectuer cette opération est montrée sur la planche XIII, qui représente aussi l'outillage et les appareils employés pour la mise en place.

On cala sous les travées, des pièces de bois placées sur les piles et sur les remblais, sur lesquelles étaient fixés des rouleaux en fonte de la forme représentée sur le plan. Afin de prévenir une rupture des axes des rouleaux, occasionnée par des chocs provenant de la travée, ces axes reposaient sur une cale élastique constituée de disques concaves en acier superposés, enfermés dans une boîte en fer et recouverts d'une plaque en tôle.

Après avoir mis en place les rouleaux, il a fallu renforcer provisoirement les montants du milieu de la travée à l'aide de 10 pièces de 8 pouces (21 cm.) d'équarrissage, fixées par des boulons, afin de pouvoir résister aux efforts de flexion transversale qui se produisent, dès que la travée a dépassé la première pile et qu'elle n'est pas encore soutenue par la pile suivante. Enfin, l'extrémité de derrière de la travée fut chargée de rails, afin d'empêcher qu'elle ne basculât.

La mise en place fut effectuée à l'aide de deux treuils solides avec poulies. Les treuils étaient placés sur le tablier (voir le plan), tandis que les poulies étaient fixées soit à la partie inférieure des travées, soit à des pièces de bois mises en travers des piles et s'appuyant sur les cales qui s'y trouvaient, faisant cesser ainsi la charge de la travée lorsqu'elle s'avancait sur la pile.

La mise en place fut effectuée par 8 manoeuvres pour chaque treuil. La travée, qui pesait 385,000 kilogrammes, avançait régulièrement sur les rouleaux avec une vitesse moyenne de 6 mètres par heure. Dès qu'une travée avait atteint une pile, on en soulevait l'extrémité à l'aide de crics

jusqu'à ce qu'elle reposât sur les rouleaux. L'abaissement de l'extrémité libre de la travée était au maximum $0^{\text{m}},_{27}$, ce qui montre suffisamment combien cette méthode de montage fatigue les matériaux de la superstructure.

Dès que les travées eurent dépassé les piles, elles furent descendues sur leurs supports définitifs, après que l'on eut d'abord placé, sur les trois piles, des crics puissants tendant à alléger les travées, afin de pouvoir éloigner les cales et les rouleaux intérimaires. Afin de descendre les travées régulièrement et lentement sur leurs supports, on se servit de tonneaux de sable disposés comme ceux que l'on emploie pour le décintrement des voûtes.

Le pont fut terminé vers la fin de l'année 1878; il fut alors soumis aux épreuves prescrites dans le traité, la charge morte et roulante correspondant à 1 tonne anglaise par pied linéaire, soit 3250 kilogrammes par mètre linéaire.

La charge était formée par un train composé d'une machine à marchandises et de 20 wagons remplis de gravier, marchant à la vitesse d'env. 30 kilomètres par heure.

Avec le poids mort, la plus grande flèche a été de 25 millimètres dans les épreuves par travée isolée et de 20 millimètres lorsque deux travées consécutives étaient chargées simultanément. Sous le poids roulant, la plus grande flèche observée a été de $12^{\text{mm}},_5$.

Toutes les flèches ont disparu après le déchargeement.

Les volées du pont tournant n'ont subi aucune flexion pendant les essais. Pendant l'ouverture, les mêmes volées non-chargées ont présenté aux extrémités un abaissement de $13^{\text{mm}},_5$.

Les travaux ont été dirigés sur les lieux par les ingénieurs suivants:

Pour la Compagnie de Fives-Lille:

M. Pinguet, ingénieur, mort à Aalborg 1875

M. Audebert, ingénieur.

Pour le Gouvernement danois:

M. Tegner, ingénieur en chef

M. Simoni, ingénieur.

E. Aperçu
des
dépenses occasionnées par la construction d'un pont
en tole sur le Limfjord pour les communications
par chemin de fer.

A. Piles.

Culée numéro 1; descendue jusqu' à 18 mètres profondeur
Pile numéro 2; descendue jusqu' à 28 mètres profondeur ... 274,000 fr.
item fonçage additionnel: 6 m₁ à 8,300 fr..... 50,630 -
Pile numéro 3; descendue jusqu' à 28 mètres de profondeur .. 274,000 fr.
item fonçage additionnel: 6 m₀₅ à 8,300 fr..... 50,215 -
Pile du pont tournant, no. 4; descendue jusqu' à 30 mètres
de profondeur 268,000 fr.
item fonçage additionnel: 4 m à 8,700 fr..... 34,800 -
Pile numéro 5; descendue jusqu' à 28 mètres de profondeur .. 274,000 fr.
item fonçage additionnel: 6 m₄ à 8,300 fr..... 53,120 -
Pile numéro 6; descendue jusqu' à 28 mètres de profondeur .. 274,000 fr.
item fonçage additionnel: 5 m₉ à 8,300 fr..... 48,970 -
Culée numéro 7; descendue jusqu' à 18 mètres de profondeur . 163,000 fr.
item fonçage additionnel: 16 m₆ à 6,200 fr. 102,920 -

	Sommes partielles		Somme totale	
	Francs	Cent.	Francs	Cent.
Culée numéro 1; descendue jusqu' à 18 mètres profondeur	163,000	»		
Pile numéro 2; descendue jusqu' à 28 mètres profondeur ...	274,000			
item fonçage additionnel: 6 m ₁ à 8,300 fr.....	50,630	-	324,630	»
Pile numéro 3; descendue jusqu' à 28 mètres de profondeur ..	274,000			
item fonçage additionnel: 6 m ₀₅ à 8,300 fr.....	50,215	-	324,215	»
Pile du pont tournant, no. 4; descendue jusqu' à 30 mètres de profondeur	268,000			
item fonçage additionnel: 4 m à 8,700 fr.....	34,800	-	302,800	»
Pile numéro 5; descendue jusqu' à 28 mètres de profondeur ..	274,000			
item fonçage additionnel: 6 m ₄ à 8,300 fr.....	53,120	-	327,120	»
Pile numéro 6; descendue jusqu' à 28 mètres de profondeur ..	274,000			
item fonçage additionnel: 5 m ₉ à 8,300 fr.....	48,970	-	322,970	»
Culée numéro 7; descendue jusqu' à 18 mètres de profondeur .	163,000			
item fonçage additionnel: 16 m ₆ à 6,200 fr.	102,920	-	265,920	»
			2,030,655	»
B. Superstructure.....			885,000	»
C. Travaux additionnels.				
Travée de rive de la culée numéro 7.....	49,600	fr.		
Fondement dans le remblai.....	51,900	-		
Difficultés de montage de la travée (5—7)	25,000	-	126,500	»
Renforcement de la pile du pont tournant, numéro 4.....			120,500	»
Ancres destinées à renforcer les piles			6,000	»
A reporter....	253,000	»	2,915,655	»

	Sommes partielles		Somme totale	
	Francs	Cent.	Francs	Cent.
Report....	253,000	"	2,915,655	"
Pattes d'oie devant le pont tournant				
Patte d'oie à l'ouest du pont.....	151,100	fr.		
— — à l'est du pont	151,400	-		
Enrochements autour des piles				
Pierres prov. de la mer: 7,485,53 mètres				
cubes à 17 fr.	127,254	fr. 01 cent.		
Gravier passé à la claire: 5,174,4 mètres				
cubes à 12 fr.	62,092	- 80 -		
Travaux exécutés par la Compagnie de Fives-Lille ensemble, francs	189,346	81	744,846	81
			3,660,501	81
	Kroner	Ore		
3,660,501 francs 81 centimer à 0,72 Kr.	2,635,561	30		
Remblais de raccordement.				
Terrassements	Kr. 24,275.00		33,715	28
Empierremens..... -	18,378.79		25,524	71
Déplacement de la pile méridionale	- 5,902.25		8,197	57
Travaux divers	- 12,075.14		16,711	03
	60,630	18		
Ensemble....			84,208	59
Établissement de la voie de fer.				
1,475 mètres linéaires de voie en fer, avec matériaux ..	33,161	66	46,057	86
			130,266	45

Prix total de la construction:

Kroner: 2,729,353.14 = Francs: 3,790,768.25.

En se basant sur les prix payés qui se trouvent ci-dessus sous A et B, on en déduit les prix des unités suivantes:

Les 7 piles ensemble contiennent 11,400 mètres cubes de maçonnerie:

le prix par mètre cube de la maçonnerie dans la pile est donc $\frac{2,030,655}{11,400} = 178,13$ francs.

Le poids total des fers de la superstructure est de 941,000 kilogrammes,

les prix par kilogramme de la superstructure est donc $\frac{885,000}{941,000} = 0,94$ francs.

Aarhus, en septembre 1884.

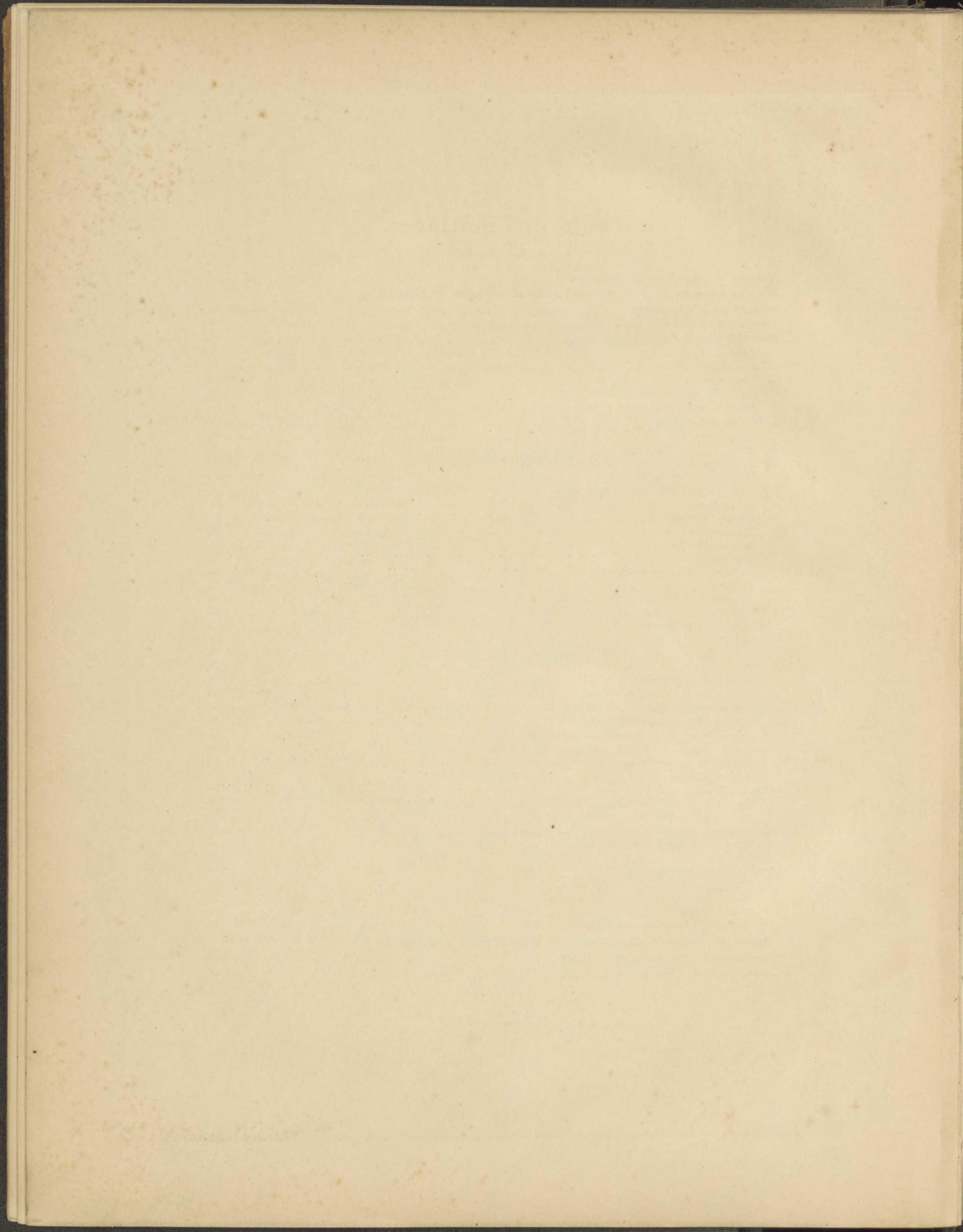
Tegner.

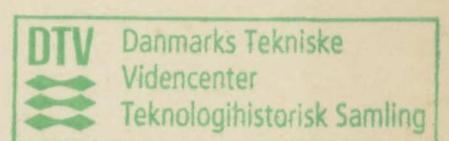
L'Ingénieur en chef
des chemins de fer de l'état danois.

Planche V.	Culée, no. 7. Vue latérale. Plan et coupes sur C. D. et A. B. <i>Mudder</i> — vase; <i>Sand</i> — sable.	Pile du pont tournant, no. 4. Vue latérale. Plan et coupes sur N. M. et K. L.
Planche VI.	Coupe transv ^{le} du tablier devant la pile no. 3 à 1:40.	Pile no. 3 à 1:100. Plan. Coupes sur E. F. et C. D. Coupe sur A. B.
Planche VII.	Pile, en train d'être descendue. Coupe verticale, traversant l'axe longitudinal de la pile. <i>Luftslange</i> — tuyau à air; <i>Vindkjedel</i> — régulateur à air; <i>Dampkjedel</i> — chaudière à vapeur.	
Planche VIII.	Caisson d'une pile. Coupe verticale A. B. Plan. <i>Nedgangsrør</i> — tube de descente. <i>Arbeidskammer</i> — chambre de travail.	Coupe verticale C. D. <i>til en Landpille, seet fra oven.</i> <i>Caisson d'une culée</i> (Plan).
Planche IX.	Reconstruction de la pile no. 2, à 1:200. Profil entre les piles no. 1 et no. 2, avec l'échafaudage de la nouvelle pile no. 2. <i>Stilling af Pille No. 2 efter Omstyrningen</i> — position de la pile no. 2 après le renversement.	Percement de la pile no. 2 État des travaux le 20 mars 1878. <i>Pillet flyttet</i> — changement de place de la pile. <i>Afstyrning</i> — étançonnement. <i>Midlinie</i> — ligne centrale; <i>tidligere M.</i> — ancienne l. c. <i>Stilling af Pillen efter</i> { position de la pile après <i>Gjenembrydningen</i> } le percement. <i>Opfyldning</i> — remblai; <i>Grus</i> — gravier.
Planche X.	Pompe à air avec bateau. Élévation et plan.	Échafaudage de la nouvelle pile no. 2. Vue latérale. Plan.
Planche XI	Superstructure. Extrémité du tablier Élévation sur une culée. Vue latérale. Coupe horizontale.	Assemblage de la travée tournante avec la travée fixe. Vue latérale. Coupe horizontale.
	Tablier. Élevation sur une pile. Vue latérale et coupe longitudinale. Coupe horizontale.	
Planche XII.	Mécanisme de rotation du pont tournant.	
Planche XIII.	Mise en place du tablier. Plan et vue latérale à 1:250. Rouleaux, à 2:25. Supports élastiques, à 2:25.	Poulies, à 2:25. Treuil, à 1:25.
Planche XIV. (Travaux additionnels).	Travée de rive. Vue latérale et plan, à 1:100. Pattes d'oie devant la pile du pont tournant. Vue latérale, à 1:100. Plan..... à 1:100.	Étançonnement entre les pilotes. Vue latérale et coupe sur A B, à 1:20.

Table des matières.

A. Mesures et dispositions préparatoires	3.
B. Mise en concours des plans de construction et conslusion du traité	4.
Rapport du la commission	5.
Conclusion du traité	7.
C. Description générale du pont	8.
Piles	8.
Profondeurs de fonçage des piles	9.
Enrochements à pierres perdues autour des piles	9.
Pattes d'oie devant le pont tournant	9.
Remblais de raccordement sur les deux rives	10.
D. Exécution des travaux	10.
1. Chantiers	10.
2. Piles	11.
Application de la méthode pneumatique au fonçage des piles	11.
Maladies parmi les ouvriers	12.
La culée du côté d'Aalborg. Pile no. 7	13.
Échafaudage	14.
Chambre de travail	14.
Suspension de la culée	14.
Descente dans l'eau	14.
Maçonnerie	14.
Déblayement dans l'air comprimé	15.
Explosion	15.
Achèvement du fonçage	16.
Déplacement de la culée	17.
Culée du côté de Sundby. Pile no. 1	17.
Pile no. 6	18.
Échafaudage	18.
Fonçage de la pile	19.
Modification de la chambre à air	19.
Modification de l'appareil de montage	20.
Achèvement des travaux	20.
Éloignement de l'échafaudage	21.
Aperçu des travaux de fonçage	21.
Pile no. 5	21.
Arrachement du tube de descente	21.
Achèvement de la pile	23.
Pile no. 2	23.
Renversement de la pile	24.
Construction d'une nouvelle pile	26.
Changement de l'emplacement de la pile	27.
Percement de la pile renversée	27.
Pile no. 3	28.
Pile du pont tournant, no. 4	29.
3. Superstructure	29.
Mécanisme de rotation	30.
Travées de rive	31.
Montage et mise en place des travées	31.
E. Aperçu des dépenses occasionnées par la construction d'un pont en tôle sur le Limfjord pour les communications par chemin de fer	33.
F. Table explicative des planches	35.





TB
624.4
Com

461249

1884



300189575

