

SUR UN SYSTÈME DE PONT TOURNANT À DEUX TRAVÉES SYMÉTRIQUES STATIQUEMENT DÉTERMINÉES.

Application de ce système aux ponts construits sur les bras Balda et Bousane du delta de la Volga (Russie) près de la ville d'Astrakhan, chemin de fer Riasan-Oural.

Par M. Dr. Ing. ST. de KUNICKI.
Professeur à l'École Polytechnique de Varsovie, M. S. J. C. F.**)

MOTTO:

„On reason build resolve"
„That column of true majesty in man."

Burns.

En 1909 on a rendu à l'exploitation régulière deux grands ponts en acier doux (fer fondu) construits en 1907 et 1908 sur la ligne d'Astrakhan par la Société des Chemins de fer Riasan-Oural (en Russie), notamment:

1. le pont d'Astrakhan tout près de la grande ville de ce nom sur la Balda — un bras du delta de la Volga vers la mer Caspienne, et
2. le pont de Bousane sur un autre bras du même delta.

Chacun de ces grands ponts était muni de parties mobiles, dont une seule dans le pont de Bousane et deux parties mobiles dans celui d'Astrakhan (sur la Balda), par une sur chaque embranchement de ce bras, divisé par une île.

Les ponts mobiles (ponts-machines) étaient projetés comme ponts tournants symétriques, c'est à dire ayant chacun deux travées égales d'ouverture nette à 32 mètres^{*)}, avec passage inférieur pour une voie normale de chemin de fer, le tablier étant en bois sur toute la largeur du pont entre les grandes poutres pour utiliser ce pont comme *pont-route* dans l'intervalle du passage des trains.

Comme ce projet présente quelques idées nouvelles et originales une courte notice sur ce sujet sera peut-être susceptible d'intéresser les techniciens.

L'idée fondamentale de ce projet est facile à comprendre en jetant un coup d'oeil sur le croquis (fig. 1).

Le trait caractéristique du projet consiste dans un certain arrangement de la ferme du pont mobile afin qu'elle soit *statiquement déterminée*, quoique restant sur trois piles (voir le croquis schématique, fig. 2).

^{*)} La portée entre points d'appui adoptée dans l'avant-projet, était de 34,4 mèt., dans le projet définitif — 34,8 mètres.

^{**)} Vice-président du groupement franco-polonais des Ingénieurs, anc. Recteur à l'Institut des Ing. des voies de communication à St. Pétersbourg, anc. Vice-Président du Conseil de Génie, anc. Président de la Commission des Ponts, anc. Conseiller Privé.

On est arrivé à ce résultat en projetant le pont mobile de manière, que dans la position fermée, c'est à dire préparée pour le mouvement des trains, — il présente

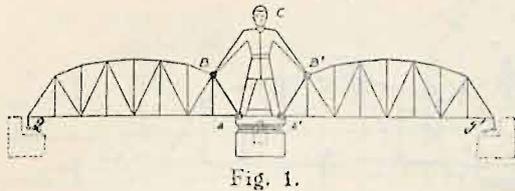


Fig. 1.

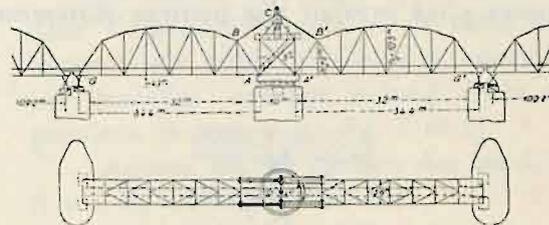


Fig. 2.

deux travées simples, *statiquement déterminées*, reposant librement et chacune seulement sur deux appuis.

Les moyens d'obtenir une construction statiquement déterminée.

Cela provient de ce que les tiges BC et $B'C$ (voir fig. 2) ne sont pas tendues en ce moment (elles n'ont aucune réaction axiale), mais elles reposent librement aux points B et C et relativement B' et C , sur lesquels agit seulement le poids propre de ces tiges.

Pour que cela soit possible on a projeté ces tiges en *eye-bars* avec des diamètres des trous (eyes, yeux) au point C plus grands que le diamètre du pignon du doigt KC (voir fig. 3).

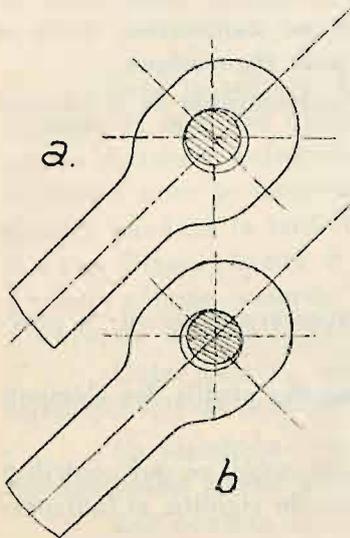


Fig. 3.

La différence de ces diamètres était calculée de manière, que dans la position fermée du pont — la surface intérieure de l'oeil de la tige BC ne vienne pas presser contre le pignon (la barre horizontale) du doigt KC , c'est à dire ne donne pas une réaction axiale sur la tige BC . Il en est de même pour la tige CB' .

Ce doigt KC — représente une barre tendue tournante autour du point supérieur K , c'est à dire un simple pendule (voir fig. 6).

Cette barre pendule travaille seulement quand le pont est ouvert pour faire passer les navires, alors les deux travées du pont sont en équilibre.

Quand on ouvre le pont pour faire passer les navires on imprime d'abord un mouvement graduel de rotation sur un certain angle aux tronçons inférieurs des supports G et G' des travées du pont, comme si on fléchissait les jambes HF et $H'F'$ des supports autour des genoux G et G' (voir fig. 1 et 4).

Il s'ensuit un abaissement graduel des points G et G' et les travées commencent à tourner autour des articulations réelles A et A' et, en conséquence, les points B et B' tournent autour des points A et A' jusqu'à ce que les tiges BC et $B'C$ ne soient pas tendues.

Alors les travées ne s'appuient plus sur les piles extérieures aux points G et G' , mais elles sont fixées dans ce cas aux points A et C et relativement A' et C . Elles ressemblent alors à des poutres encastrées à un bout (AC ou $A'C$), c'est à dire de nouveau elles présentent des poutres *statiquement déterminées*.

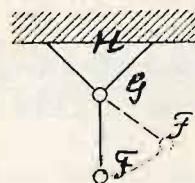


Fig. 4.

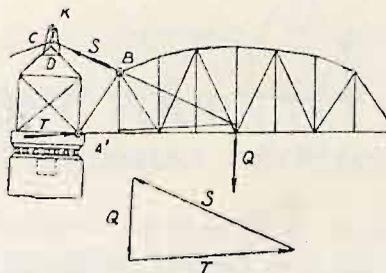


Fig. 5.

Chaque trois articulations A , B et C et relativement A' , B' et C — représentent un arc à triple articulation formé de deux barres droites (p. ex. AB et BC), sur lesquelles vient s'appuyer en suspension la travée correspondante (fig. 5).

Les traits particuliers du système.

De cette manière dans les deux positions: pont fermé et ouvert—nous avons un système statiquement déterminé, ce qui donne la possibilité d'une calculation facile et exacte et permet de simplifier la construction en la rendant plus économique.

Un second trait particulier de ce pont est un rapport considérable de la hauteur moyenne ($hm = 9$ mètres) à la portée définitive ($l = 34,8$ m)

$$\frac{hm}{l} = 0,26,$$

c'est à dire un peu plus d'un quart, ce qui a donné une sérieuse économie sur le poids du métal.

Le troisième trait caractéristique consiste dans le choix des profils des éléments de la ferme.

Tous les éléments de la grande poutre ont reçu un profil *evldé*, ce qui contribue à diminuer leur poids en leur donnant en même temps une grande rigidité, si indispensable dans les ponts mobiles, c'est à dire les ponts-machines.

Outre cela aux extrémités des travées se trouvent des cadres inclinés très rigides.

Les contreventements ont été projetés sous forme de la lettre K, ayant en vue l'économie.

Dans le calcul du pont la pression du vent a été supposée 235 kg/m^2 au maximum. Pour diminuer l'effet du vent sur les grandes poutres AG (fig. 2) on a adopté définitivement un plus grand espacement entre les noeuds de fermes, à savoir 5,8 mét. (au lieu de 4,3 m.), voir fig. 6, en réduisant la largeur de la tour à 5,6 mét.

La quatrième particularité de ce pont se trouve dans la centralisation du mouvement en un point unique à l'étage supérieur de la tour, au milieu du pont sur le pilier rond de 10 mètres de diamètre.

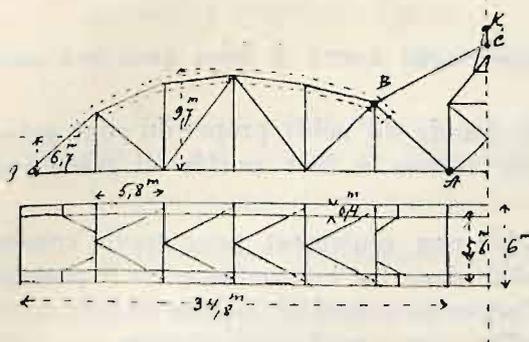


Fig. 6.

La section des machines est située dans l'espace triangulaire de cette tour, formant une petite maisonnette, accessible par l'escalier, arrangé le long de la diagonale de la tour (voir fig. 2 et 6).

Autour de la section des machines il y a un balcon de service.

Le pont mobile tourne sur une plaque tournante (turn-table) au moyen d'un système de roues-galets, raccordés à l'axe vertical de milieu. L'axe de milieu ne reçoit aucun chargement; il sert exclusivement pour diriger le mouvement de rotation.

Aux points A , A' , B , B' , C , G et G' sont arrangées des articulations réelles.

Les doubles tiges (eye-bars) BC et $B'C$ — étaient exécutées en acier de haute résistance, acier au nickel (nickel-steel) pour avoir un surcroit de sureté, à cause de la grande fatigue de ces tiges, dont les réactions sont très grandes et à cause de leur importance, car elles soutiennent en suspension tout le pont lorsqu'il est ouvert pour faire passer les navires.

La section des machines.

Dans la section des machines, laquelle présente un plan en rectangle, sont disposés le long des diagonales de ce rectangle, mais dans des niveaux différents, deux arbres d'essieux entrecroisés. L'un sert pour le mouvement de rotation du pont mobile et l'autre pour le mouvement vertical (abaissement ou surélévation) des extrémités des travées pendant le fermeture ou l'ouverture du pont. Deux moteurs à gaz de pétrole *) système Ursus, chacun à 15 HP, se trouvent dans la section des machines, l'un deux servant comme réserve. Ces moteurs ont été fournis par l'usine polonaise „Ursus” à Varsovie d'après la recommandation de l'auteur du projet du pont.

Outre cela au même endroit étaient établis des mécanismes mus à la main pour faire mouvoir le pont en cas d'une avarie des machines à gaz.

La plateforme de la section des machines est construite sur des poutres en fer sur lesquelles repose une tôle ondulée remplie et couverte par une couche de béton.

Les poutres de la plateforme sont renforcées en bas par des tirants en fer ronds formant trapèzes.

Le toit est en tôle ondulée.

*) Pour l'économie le combustible devait être du mazout (c'est à dire un résidu combustible de la distillation des pétroles bruts).

Les avantages du projet.

On voit, que le susdit projet présente quelques avantages, à savoir:

1. simplicité de construction;
2. facilité et exactitude du calcul, puisque nous avons à faire avec une construction statiquement déterminée;
3. une valeur comparativement pas trop grande du poids propre du pont, grâce au grand rapport de la hauteur des fermes à leur portée et grâce aux sections évidées de leurs éléments.

Il faut avoir en vue que le pont est destiné non seulement pour servir comme *pont-rail*, mais aussi pour servir comme *pont route* dans les intervalles entre le passage des trains. C'est pourquoi le tablier du pont présente un plancher continu en bois entre les grandes poutres, ce qui augmente le poids. D'un autre côté pour donner une rigidité nécessaire à la membrure des grandes poutres, qui travaille tantôt à la tension, tantôt à la compression et pour diminuer les déformations des grandes poutres, il fallait abaisser exprès le taux du travail du métal. Ce qui est une deuxième cause de l'augmentation du poids propre du pont.

En tout cas ce poids n'a pas dépassé 4,2 tonnes par mètre-courant du pont, ce qui dans ces circonstances n'est pas beaucoup;

4. grande rigidité des fermes;
5. centralisation des mécanismes dans un seul point en haut de la tour, reposant directement sur le grand pilier rond au milieu du pont.

Après cet exposé purement technique et concernant seulement le pont tournant il serait peut-être intéressant de donner quelques renseignements sommaires d'ordre général sur l'ensemble de la construction de toutes les parties des ponts d'Astrakhan et de Bousane.

Le pont d'Astrakhan (sur la Balda).

Sur la fig. 7, est représenté une vue d'ensemble du pont d'Astrakhan ayant la longueur totale d'un kilomètre*), traversant les deux bras de la rivière Balda (Krivaya Balda, c'est à dire la Balda Courbe et la Bolschaya Balda ou la Grande Balda et l'île, entre ces deux bras, qui est submergée par les hautes eaux).

Le débit maximum de la rivière Balda est de 5500 mèt³/sec.

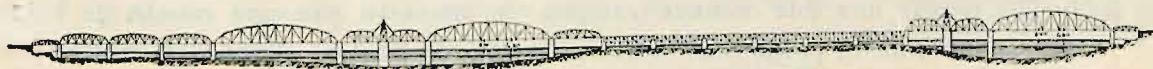


Fig. 7.

L'ouverture libre pour le passage des eaux est de 873,5 mètres, à savoir:

a) sur la Krivaya Balda:

$$3 \times 42,6 + 2 \times 106,5 + 2 \times 32 + 42,6 \text{ mètres;}$$

*) 469 saignées russes. ce qui donne: $466 \times 2.133 = 1000.377$ mètres.

b) sur l'île (submergée par les hautes eaux):

$$6 \times 42,6 \text{ mèt.}$$

c) sur la Bolschaya Balda:

$$2 \times 32 + 106,5 \text{ mèt.}$$

La longueur totale du pont (y compris deux viaducs d'accès de 24 mètres de portés chacun) est environ de 1000 mètres.

Le pont comporte 19 travées, reposant sur 20 supports (deux culées et 18 piliers).

La répartition des travées est la suivante:

a) trois (3) grandes travées de 109,2 mètres de portée chacune (dont deux se trouvent sur la Krivaya Balda et une sur la Bolschaya Balda):

$$3 \times 109,2 \text{ mèt.} = 327,6 \text{ mèt.}$$

b) deux ponts tournants chacun avec une portée totale de 75,2 mèt.:

$$2 \times 75,2 \text{ } 150,4 \text{ mèt.}$$

c) quatre travées de 45 mètres de portée avec voie à la partie inférieure des grandes poutres

$$4 \times 45 \text{ m } 180,0 \text{ mèt.}$$

d) six travées de 45 mèt. de portée sur l'île avec la voie au dessus des poutres (pour l'économie en métal)

$$6 \times 45 \text{ m } 270 \text{ mèt.}$$

e) deux viaducs d'accès de 24 mètres de portée

$$2 \times 24 \text{ m } 48,0 \text{ mèt.}$$

En ajoutant les culées et l'espacement existant sur les piles entre les portées théoriques, — nous aboutissons à un kilomètre de longueur totale du pont.

L'élevation des fermes (avec voie en bas des grandes poutres) sur les hautes eaux est environ 6,2 mètres.

La différence entre les niveaux des hautes eaux et des eaux ordinaires est de 3,7 mètres.

La base du rail s'élève à environ 1,32 mètres sur le bord inférieure des fermes.

La profondeur des fondations des piliers au dessous du niveau des eaux ordinaires est au maximum:

a) sur la Krivaya Balda

de 26,5 mètres.

b) sur la Bolschaya Balda

de 28,6 mètres;

au minimum:

- a) sur la Krivaya Balda de 18 mètres;
- b) sur la Bolschaya Balda de 19 mètres.

La nature du sol est de sable fin.

Comme fondations on a employé des caissons à air comprimé.

Le poids du métal pour toute la superstructure du pont (sans compter les rails, contre-rails, leurs attaches et les mécanismes) est environ 3604 tonnes.

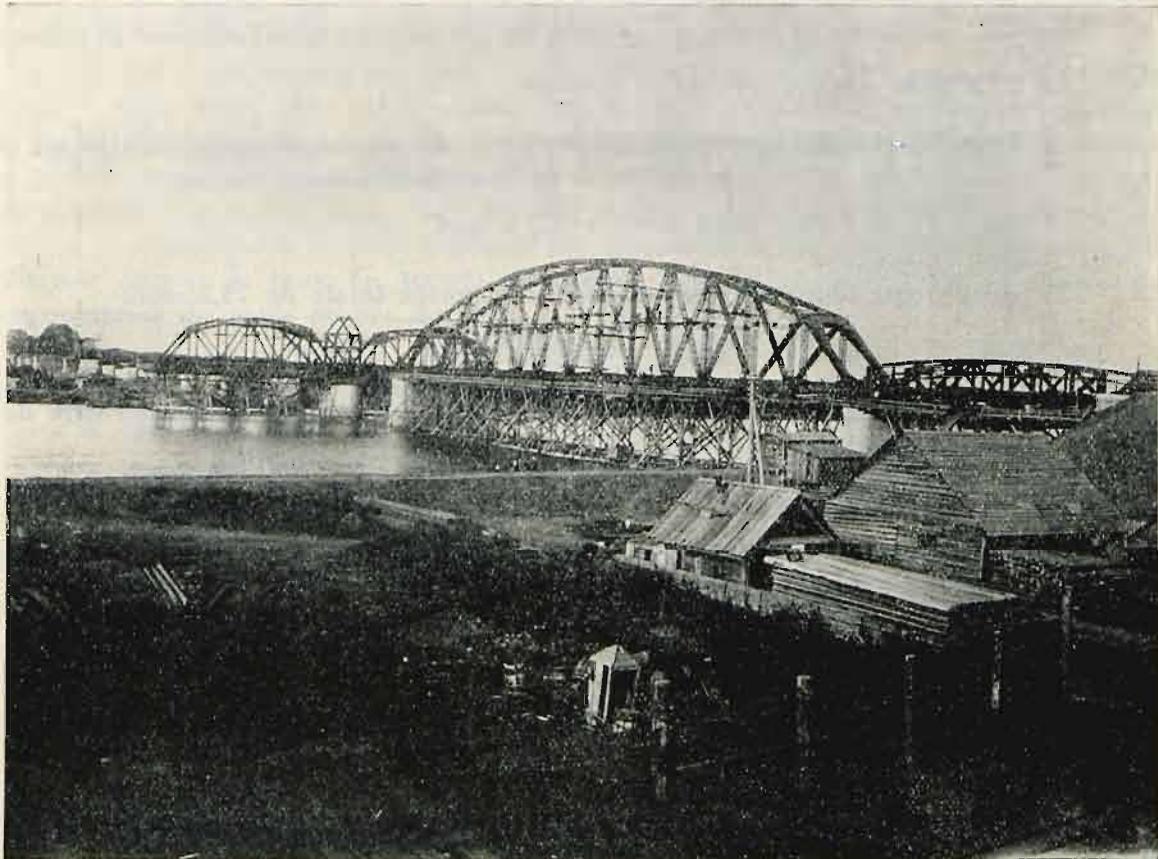


Fig. 8.

Ce poids se répartit de la manière suivante:

a) trois grandes travées	3×538	t = 1614 t
b) deux ponts tournants	$2 \times 321,5$	t = 643 t
c) quatre travées de 45 mètres de portée avec voie en bas des grandes poutres	$4 \times 134,25$	t = 537 t
d) six travées de 45 mètres de portée avec voie au dessus des grandes poutres (sur l'île)	6×115	t = 690 t
e) deux viaducs d'accès, chacun de 24 mètres de portée	2×60	t = 120 t
Total		3604 t

La calcul du pont a été fait pour les normes de charges russes de 1896, c'est à dire pour deux locomotives de 60 tonnes chacune, à quatre essieux à 15 tonnes de charge sur chaque essieu, avec tenders de 37,5 tonnes (par 12,5 ton. de charge sur l'essieu) et avec des wagons de 20 ton. (par 10 ton. de charge sur l'essieu). Ces normes quoique surannées ont été prescrites parce que la ligne d'Astrakhan était envisagée comme une ligne secondaire, plutôt d'intérêt local. Le métal de la superstructure du pont d'Astrakhan, avec transport et montage, a coûté comparativement peu, à savoir seulement 3 roubles et 21 copecs par poud*), ce qui donne (en comptant 219800 pouds de métal) une somme de 705558 roubles.

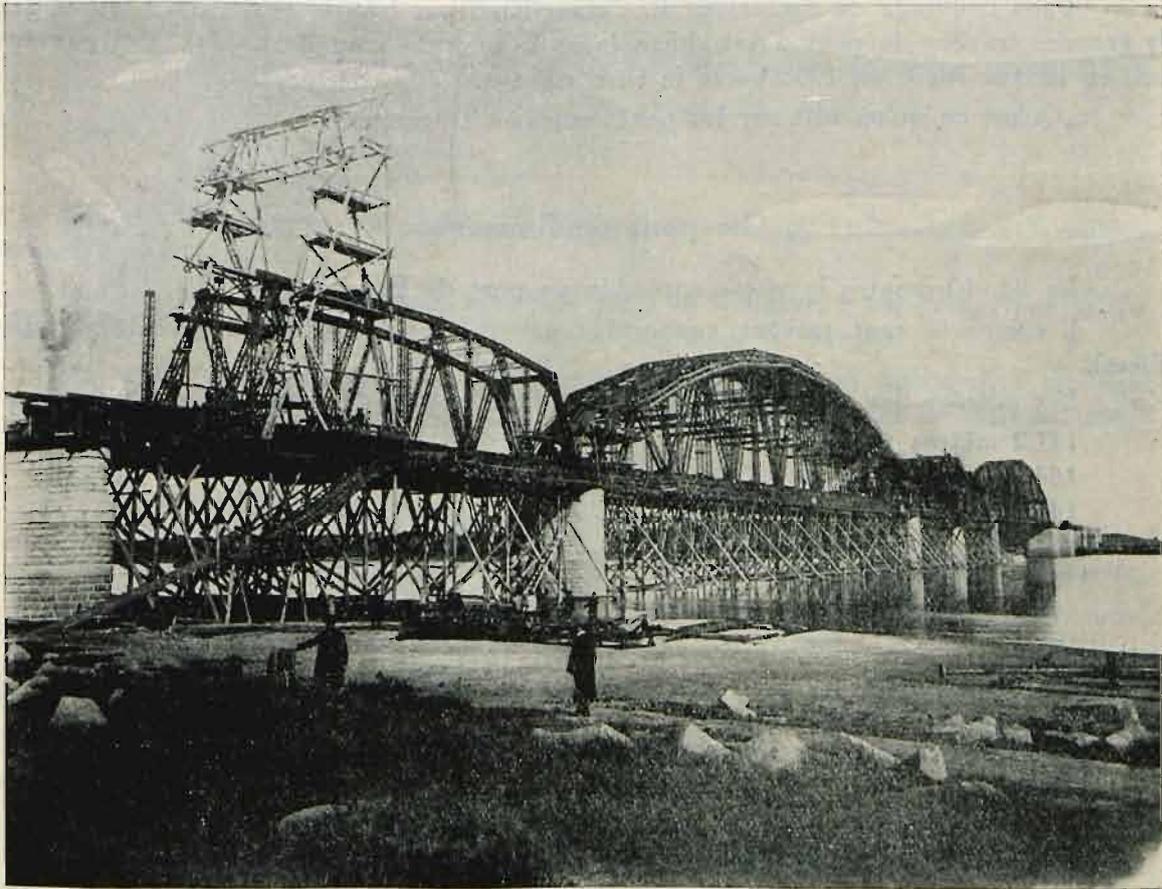


Fig. 9.

Avec les supports, le tablier et les mécanismes le pont entier a coûté un peu plus que deux millions de roubles.

Le projet du pont d'Astrakhan a été dressé en entier (avec les parties mobiles) par l'auteur de cet article.

Les photographies (fig. 8 et 9) montrent le montage du pont d'Astrakhan. Sur la fig. 8 nous voyons le montage du pont-tournant sur un échafaudage situé le long de la rivière, ce pont était ensuite tourné à 90 degrés pour prendre sa place définitive.

*) pour comparer: 1 tonne métrique = 61,05 pouds; d'après le cours d'alors 1 rouble = 4 francs.

La fig. 9 montre la perspective du pont d'Astrakhan pendant le montage au mois de septembre 1908.

Une mention sur les grandes travées du pont d'Astrakhan (sous le nom du pont de Balda) se trouve dans l'ouvrage du Professeur A. Rhon (Zürich) „Bemerkenswerte Brückenbauten der drei letzten Jahre 1907/1909“ (Rascher, Zürich, 1910, pages 14 et 15).

Quelques renseignements sur ce pont se trouvent aussi dans les ouvrages suivants, écrits en langue russe par Mr. l'ingénieur K. Oppenheim:

1. Les ponts sur la Volga et sur son delta". Petrograde, 1915.
2. „Précis sur le développement des ponts-routes en Russie". Petrograde, 1916.

Dans l'ouvrage du Professeur E. Paton (Kieff) on trouve aussi une mention sur les grandes travées du pont d'Astrakhan (sous le nom du pont de Balda). Cet ouvrage écrit en langue russe en 1908 porte le titre suivant:

„Qu'est ce qu'on sait sur les ponts russes à l'étranger“?

Le pont de Bousane.

La fig. 10 montre la vue d'ensemble du pont de Bousane.

Il comporte sept travées supportées par 8 supports (dont deux culées et six piliers).

Les portées des travées sont (en comptant du côté de Saratof) les suivantes:

141,2	mètres	
164	"	
141,2	"	
34,8	}	pont tournant du même système qu'au pont d'Astrakhan
34,8		
76,8	"	
76,8	"	

La longueur totale du pont est environ 700 mètres. L'ouverture libre pour le passage des eaux est de 647 mètres.



Fig. 10.

Parmi les grandes poutres de ce pont on distingue celle de la deuxième travée représentant une poutre à deux consoles (poutre cantilever) avec la partie médiane de 164 mètres entre les piliers et avec deux consoles de 32 mètres de longueur chacune. La longueur totale de cette poutre à consoles est de

$$164 + 2 \times 32 = 228 \text{ mètres.}$$

La semelle supérieure de cette poutre, représente une combinaison de cinq paraboles. La hauteur de la poutre sur les piliers est de 24 mètres et au milieu de la

poutre de 20 mètres. La distance en plan entre les deux grandes poutres est de 7,5 mètres.

Le poids du métal dans la superstructure aux consoles (sans compter les rails, les contre-rails et leurs attaches) est environ 2086 tonnes.

Le poids du métal de chaque travée libre de 109,2 mètres s'appuyant d'un côté sur la poutre aux consoles et d'un autre côté sur un support fixe est de 503 tonnes, ce qui fait

$$2 \times 503 = 1006 \text{ t.}$$

Le poids du métal du pont tournant est le même qu'au pont d'Astrakhan, à savoir 351,2 t.

Enfin le poids du métal des deux travées de 76,8 mètres de portée (chacune) est:

$$2 \times 263,75 = 527,50 \text{ t.}$$

Total environ 3941 tonnes.

Le coût de métal de ce pont avec transport et montage était évalué à 3 roubles 60 copecs le poud.

Le projet des parties immobiles du pont de Bousane a été dressé par le feu professeur N. Belelubsky en collaboration avec l'ingénieur B. Person.

La partie mobile du pont de Bousane (c'est à dire le pont tournant) a été projeté par l'auteur de cet article et elle présente le même système, que les parties mobiles du pont d'Astrakhan.

L'exécution des travaux.

Les travaux de la construction métallique du pont d'Astrakhan ont été exécutés par l'Usine de Kolomna (ville près de Moscou) et celles du pont de Bousane par l'usine des constructions navales de Nikolayewsk (port de la mer Noire).

Les mécanismes. Mr. le Docteur Ralph Modjeski et le pont-tournant „Rock-Island-Bridge“.

En projetant les mécanismes des susdits ponts mobiles l'auteur de cet article a beaucoup profité des idées de l'illustre ingénieur américain et français (par son éducation) Mr. le Docteur Ralph Modjeski *) décrites dans le traité de Ch. Wright „The Designing of Draw-Spans“, concernant particulièrement le pont tournant „Rock-Island Bridge“.

L'auteur se fait un agréable devoir d'exprimer ici sa profonde gratitude à l'éminent ingénieur américain.

Pour décrire ce rapport sommaire, l'auteur se base principalement sur sa propre mémoire, parceque presque tous les documents, dessins et calculs relatifs aux projets mentionnés ci dessus sont restés, après la révolution boscheviste, en Russie avec une grande partie de la bibliothèque de l'auteur.

*) Polonais d'origine.

Le Congrès International de la Construction Métallique a Liège en 1930.

Au Congrès International de la Construction Métallique à Liège en Septembre 1930, pendant la discussion sur les ponts mobiles, l'auteur a fait un petit rapport sur le susdit système des ponts tournants et il a invoqué l'attention de l'auditoire sur l'application du système d'un arc à trois articulations.

En effet chaque moitié du pont tournant possède trois articulations A , B et C et présente, dans la position ouverte pour faire passer les navires, un arc à trois articulations, formé des deux barres droites AB et CB , sur lequel est suspendue la travée (fig. 5).

L'échange des idées techniques.

Cette courte notice nous montre l'énorme utilité de l'échange des idées techniques (pour ainsi dire de la collaboration mentale) et en général de la solidarité entre ingénieurs des différents pays.

Nous y voyons comment les conceptions techniques d'un ingénieur polonais (de l'école franco-russe *) combinées avec les idées d'un ingénieur américain-polonais (de l'école française **) se sont réalisées dans des constructions érigées dans les steppes lointains de la Russie du Sud, aux bords de la Mer Caspienne, y donnant en même temps accès aux produits de l'industrie polonaise des machines.

*) Institut des Ingénieurs des voies de communication à St. Pétersbourg fondé par les professeurs et ingénieurs français et ayant conservé les traditions françaises.

**) École nationale des ponts et chaussées à Paris.

DU MÊME AUTEUR:

Observations sur les voûtes en béton et sur les ponts en ciment-armé. Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, 1928. Juillet-Août

Quelques questions sur l'utilisation du béton armé ou de l'acier dans les ponts de très grande portée. Varsovie. 1930.