

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

**NOUVELLE TECHNIQUE POUR L'EXECUTION DES PIEUX DE GRAND DIAMETRE**  
**NEW TECHNOLOGY IN THE CONSTRUCTION OF LARGE BORED PILES**  
**НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БУРОВЫХ СВАЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

**R. DIAMANTI, President, Geosonda S.p.A, Roma (Italia)**

Sommaire - Est en cours de réalisation le pont sur le fleuve Paranà qui joint la ville de Corrientes à celle de Chaco. Le pont a une longueur totale d'environ 2.250 m. Il est formé par trois structures distinctes: une structure centrale de 500 m. environ constituée par deux tours en béton avec une portée de m. 245 et une hauteur de m. 90, soutenant au sommet les cables de suspension du tablier; une série de cadres, type portique, sur deux rangées cote à cote pour un développement d'environ 1200 m., reliant à la rive la structure principale et placés à une distance réciproque de 82,60 m.; les viaducs d'accès à terre pour une longueur totale d'environ m. 550, formés par des travées simplement appuyées de m. 33 de portée. Le terrain de fondation est constitué par des couches de sable siliceux, d'origine alluvionnaire, de finesse moyenne à élevée et dont le degré de compacité augmente progressivement avec la profondeur. Les fondations du pont suspendu s'appuient sur des blocs massifs posés chacun sur 32 pieux de m. 1,80 de diamètre; dans les portiques d'accès, chaque couple de piles est fondée sur une plinthe à 8 pieux de m. 1,80 de diamètre, les viaducs d'accès à terre ont des fondations sur des pieux d'un diamètre de m. 1,20 et de 1,00 m. On prévoit une érosion, variable selon les zones de 10 à 25 m., pour les couches de sables superficielles moins denses. Les pieux pénètrent dans les couches de sables compactes sous jacentes, pour 15 m. au moins. Les pieux à terre ont été exécutés en introduisant des chemises d'acier définitives par moyen de vibrofonçeurs, en les vidant avec une machine à circulation inversée et en les remplissant successivement avec du béton. En ce qui concerne les pieux des fondations des portées d'accès et des piliers du pont suspendu, des raisons de charge, de technologie exécutive et de sûreté ont conduit à appliquer un type de pieu de nouvelle conception dont l'exécution a été réalisée de la manière suivante: introduction de revêtement en béton préfabriqué en éléments de 7,50 m. de longueur par moyen d'une tubeuse et réduction simultanée du frottement latéral par l'emploi de boues de bentonite; videment à l'intérieur du revêtement jusqu'à atteindre la côté de fondation; mise en oeuvre à la base du pieu d'un dispositif de pré-charge; coulée du pieu, injection de ciment à la base pour réduire les tassements, et injections tout le long de la surface latérale à travers des tubes utilisés pour l'introduction des boues afin d'augmenter le frottement latéral du pieu.

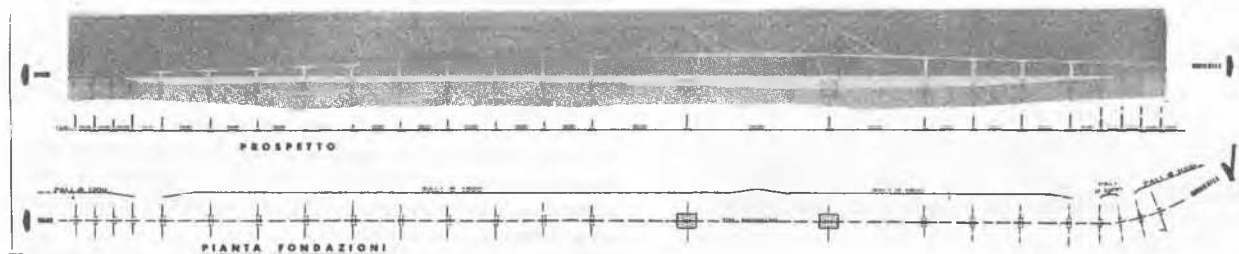


fig. 1 - vue générale de l'ouvrage

### 1.0 Généralités

Le premier pont en Argentine sur le fleuve Paraná est en cours de construction et il reliera les Provinces de Chaco et de Corrientes. Il se développera sur une longueur totale d'environ 2.250 m. et sera constitué par trois structures distinctes: une structure centrale en eau type suspendu, une série de portails reliant les rives à la susdite et les viaducs d'accès à terre.

La structure centrale suspendue d'une longueur totale de m. 500 environ est constituée par deux tours en ciment armé distantes de m. 245, d'une hauteur de m. 90 de la plinthe de fondation et portant au sommet les câbles de suspension de l'échafaudage. L'échafaudage présente en clef une articulation constituée par une travée appuyée de m. 20.20 d'ouverture. Il est formé par deux travées emboîtées adjacentes en ciment armé précontraint préfabriquées en creux et reliées par des semelles et des traverses qui sont aussi préfabriquées. Les creux préfabriqués sont montés avec le procédé d'avancement au repoussé et rendus solidaires entre eux par le système "nothickness joint". L'ouvrage a une importance particulière et est l'une des constructions les plus hardies du monde.



fig. 2 - vue générale du chantier -

La liaison entre le pont suspendu et les rives, pour un développement d'environ 1200 m., est constituée par deux rangées accouplées à des châssis du type portique au repoussé. Chaque châssis consiste en deux appuis en ciment armé précontraint distants de mètre 82,60 et une travée emboîtée en ciment armé précontraint d'une longueur de m. 145. La liaison longitudinale des portiques est réalisée par des travées appuyées de m. 20.20 d'ouverture. Même les susdites travées sont préfabriquées en creux, montées et jointes avec la même technique adoptée pour les grandes ouvertures centrales. Les viaducs à terre, d'une longueur totale de m. 550 environ, sont formés par une série de travées simplement appuyées de m. 33,3 d'ouverture. L'échafaudage de ceux-ci est en ciment armé précontraint et entièrement préfabriqué.

### 2.0 Fondations

#### 2.1 Données de caractère géologique.

Tout le long de la nouvelle ligne de trafic, les terrains sous le Rio Paraná et sur les rives du côté Corrientes et du côté Chaco sont tous constitués par des sédiments principalement psamitiques et pélitiques. Toutefois, il existe une nette différence entre les séries stratigraphiques, appartenant à la région mésopotamique (province de Corrientes et Entre Rios) et celle de la région du Chaco (province du Chaco et de Santa Fé) intéressant cette dernière, le même substratum de l'actuel cours du fleuve.

Dans la série de Corrientes et jusqu'aux profondeurs étudiées, paraissent deux ensembles stratigraphiques discordants entre eux: le plus profond, dénommé "Ituzaingo", est représenté par des sables mio-pliocènes, d'origine fluviale au sommet cimenté par des oxydes de fer et ces derniers connus sous le nom d'"Asperon"; le plus superficiel, dénommé "Yupoí", est constitué par des argiles plus ou moins sableuses de l'époque quaternaire moyenne, de origine lacustre.

Par contre, la série du Chaco, dans la zone examinée, peut se diviser en trois ensembles stratigraphiques principaux nettement séparés par des surfaces de discordance stratigraphique d'origine érosive. L'ensemble inférieur, argilo-sableux, paraît légèrement plissé et disloqué par un système de failles. La partie centrale, principalement sableuse, est par contre érodée et partiellement remplacée par de nouveaux sédiments. Enfin, l'ensemble supérieur correspond à des sédiments limoneux-argileux et sableux.

Les deux séries sont séparées par une importante ligne de discontinuité tectonique de di-

rection NE-SW, qui délimite la rive gauche du Rio Paraná tout le long de son cours moyen. Celle-ci a provoqué l'élévation de la région mésopotamique par rapport à celle du Chaco. Les territoires qui se trouvent donc au-dessous de l'actuel cours du fleuve et de la rive droite, d'origine fluvio-lacustre ou continentale, sont nécessairement plus récents que ceux de Corrientes et vu que l'ensemble "Yupoi", le plus récent connu appartenant à cette série, au moins dans la zone examinée date approximativement à l'époque quaternaire moyenne, la série du Chaco doit être attribuée à l'époque quaternaire supérieure et actuelle et qu'elle possède des épaisseurs extrêmement élevées. Un sondage plus profond fait dans un but stratigraphique sur la rive droite du fleuve, pour démontrer la présence, sous la couverture plus récente des terres examinées sur la rive gauche, ne les a pas en effet découvert bien qu'ayant atteint le profondeur d'environ 100 m.

Le niveau de fondation a été déterminé en tenant compte que les pieux, pour assumer leur fonction de portance, doivent pénétrer d'au moins 15 m. dans le sable dense et que sous leur pointe existent encore 5 m. de sable. Par sable dense on entend celui qui demande plus de 50 coups pour un enfoncement de 30 cm. du pénétromètre Terzaghi.

## 2.2. Critères de projection

En rapport des charges et de la stratigraphie, la projection a prévu d'exécuter les pieux de fondations comme suit:

- 1) pour les viaducs d'accès à terre, 6 pieux d'un diamètre de 1,20 m. pour chaque pile du côté Chaco et 6 pieux d'un diamètre de 1,00 m. pour chaque pile du côté Corrientes. La longueur moyenne des pieux est de m. 23. La portée de chaque pieu est calculée par tonne 240.
- 2) Pour chaque portail d'accès au fleuve, 8 pieux d'un diamètre de 1,80 m. avec une longueur variable selon chaque fondation de m. 37,30 à m. 55,80 pour chaque couple de piles.
- 3) Pour les plinthes du pont suspendu 32 pieux d'un diamètre de 1,80 m. de longueur de m. 47,40 pour le pylône du côté Chaco et 32 de m. 47,50 pour le pylône du côté Corrientes. La portée des pieux du pont suspendu a été prévue de 1100 tonnes tandis que celle maximum relative aux portiques d'accès est variable de 780 à 950 tonnes. Leur longueur tient compte d'une éventuelle érosion, variable selon les zones, de 10 à 25 m.

## 2.3 Technologie exécutive

On a adopté deux techniques diverses pour la exécution des pieux selon qu'ils sont à terre ou dans le fleuve.

### 2.3.1. Pieux à terre

Soit pour les pieux d'un diamètre de 1,00 m. que pour ceux d'un diamètre de 1,20 m. l'opération commençait par l'introduction, jusque à la profondeur voulue, d'une chemise d'acier permanente d'une épaisseur de mm. 9+12, moyennant un vibreur Schenk DG 120. On effectuait successivement l'opération de creusement et le trou était rempli de béton, après avoir mis en oeuvre la cage, au moyen d'un tube convoyeur pour éviter tout délavage.

### 2.3.2. Pieux dans le fleuve

Pour les pieux des fondations des portiques d'accès et des pylônes du pont suspendu, diverses raisons, de portée, de technologie et de sûreté, ont amené à appliquer un type de pieu de conception originale, dérivé des considérations suivantes:

- 1) l'usage dans l'introduction de la chemise en tôle d'un vibreur, même de grand puissance, ne permettait pas étant donné le grand diamètre de celle-ci, d'atteindre les profondeurs voulues. Le creusement au dessous de la chemise n'était pas recommandable, car même en utilisant des boues bentonitiques, vu le grand diamètre et le type de terrain, on ne pouvait exclure des éboulements et de ce fait le cisaillement du pieu dans la période s'écoulant entre la fin du creusement et le commencement de la coulée.

On prévoyait que cette période aurait eu une longue durée, soit pour la pose des cages internes, dont les éléments devaient être soudés entre eux, soit pour l'opération de mise en oeuvre des tubes de coulée et pour la remontée du béton jusqu'au revêtement.

- 2) Le fonçage au moyen d'une tubeuse, qui aurait pu augmenter l'approfondissement du revêtement n'était pas possible, étant donné que pour des raisons de sapement et d'économie on avait exclu l'usage d'îlots s'élevant sur des supports et conseillé l'application des machines opératrices sur pontons. Dans ces conditions l'action de la tubeuse est fortement limitée à cause de l'élasticité des amarres.

Pour ces raisons on décida d'exécuter les pieux d'un diamètre de 1,80 m. avec le procédé suivant:

- a) le revêtement du pieu, est constitué, comme indiqué dans la figure annexée, par des éléments en béton coulé préfabriqués de m. 7,50 de longueur. Chaque tube présentait, dans son épaisseur, des trous pour la circulation des boues bentonitiques ainsi que deux manchons, soudés avec la cage de l'élément, placés aux deux extrémités. L'élément talus, outre à posséder un tranchant et un diamètre interne égal aux éléments type, avait une épaisseur supérieure donnant ainsi une saillie qui permettait la circulation de la boue

bentonitique au-dessus du tube talus. La position des cages était rigoureuse pour la partie de fer contenue dans l'épaisseur des éléments préfabriqués et la continuité des fers était garantie par le type du joint employé. Au fur et à mesure que le creusement continuait les éléments en béton étaient unis en soudant entre eux les manchons d'extrémités. Le poids du revêtement ainsi posé favorisait l'enfoncement de la colonne, facilité en outre par la circulation de boue bentonitique. En effet, celle-ci une fois introduite dans les trous faits dans la couche, sortait par l'ouverture faite par la saillie du talus, circulait tout le long de la couche en diminuant fortement le frottement entre revêtement et terrain. L'usage de la tubeuse, dans ces conditions de frottement limité, était possible et facilitait l'enfoncement. L'épaisseur des éléments en béton était de cm. 13.

b) Après avoir procédé au creusement et à l'enfoncement de la colonne à la cote voulue, on pouvait donc introduire, en toute tranquillité, la boîte nécessaire pour la précharge, la cage supplémentaire et mener ainsi l'opération de coulé en toute sécurité.

c) Pour améliorer le frottement latéral, on procédait, après lavage de l'anneau de bentonite externe à la chemise en béton, à l'in-

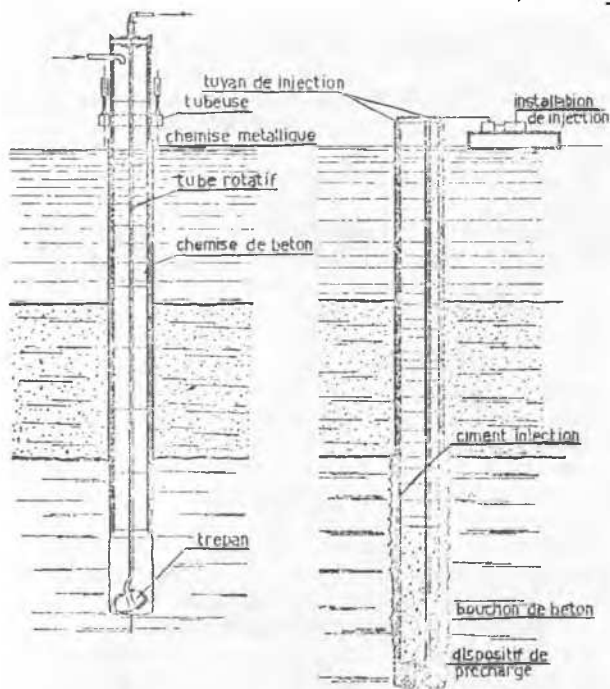


Fig. 3  
Perforation à l'eau  
lourde en circulation  
inversée

Bétonnage et pré-  
charge

jection de mortier de ciment de saturation.

### 3.0 Précharge

L'opération était faite de la manière suivante: un dispositif de distribution, dit cellule de précharge, était placé au fond du trou à la fin de la perforation; il communiquait avec le sommet du pieu par deux tubulures d'un diamètre de 1.5". On posait successivement la cage et on exécutait la coulée qui ne pouvait pénétrer dans la cellule à cause de la présence d'une soupape en caoutchouc. La double communication avec le sommet du pieu avait les deux buts suivants:

- 1) garantir la possibilité d'exécuter la précharge même en cas de rupture de l'un des circuits;
- 2) de permettre le lavage entre une phase de précharge et l'autre dans le cas d'injection en cycles successifs. Le cycle des opérations commençait par un lavage fait avec injection d'eau auquel suivait l'injection d'un mélange de précharge (ciment de densité croissante jusqu'à obtenir la pression désirée) La pression d'injection était généralement égale à la valeur de la pression de la charge unitaire à la pointe dans les conditions d'exercice. Sa valeur maxima était, de toute façon imposée par la réaction constituée par le frottement latéral du pieu sous le poids. Pendant l'exécution des injections, les pressions étaient contrôlées avec un appareil spécial, de même que les éventuels mouvements du pieu. Les avantages de cette technologie sont:

- amélioration du comportement géotechnique du pieu pour la simultanéité de la réaction à la pointe et du frottement latéral. En effet, dans des conditions normales, en des terrains semblables à ceux considérés, le travail à la pointe se développe lorsque le travail par frottement latéral a atteint les valeurs maximums;
- réduction des affaissements à parité de charge pour la raison indiquée au paragraphe précédent;
- assainissement du terrain à la base.

Dans le but de confirmer les avantages obtenus avec le procédé de précharge, nous reportons les diagrammes relatifs à un pieu diamètre 1,80 m. d'où il résulte l'augmentation de la portée du pieu par suite de l'application de la précharge à parité d'affaissements.

### 4.0 - Construction des éléments préfabriqués en béton.

Pour leur exécution on installa un chantier de préfabrication. Le nombre des éléments de construction était de 1150 et le chantier fut équipé et organisé de manière à satisfaire le rythme requis pour maintenir le programme d'exécution des pieux dans le fleuve. Le chantier était articulé en trois sections. La première

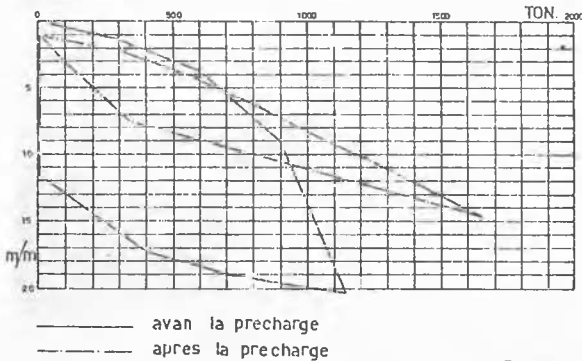


Fig. 4 - Essai de charge du pieu Ø 1,80 m.

préparait les cages et les manchons. La seconde exécutait les coulées tandis que la troisième s'occupait de la maturation et du dépôt des éléments.

La coulée du béton se faisait en des moules horizontaux particulièrement étudiés pour contenir, en plus des cages et des manchons, les tubes pour la circulation de la bentonite. Une considérable précision était demandée dans l'exécution des éléments préfabriqués car pendant la phase de montage, les surfaces des manchons de deux éléments en rapport, devaient être parallèles pour faciliter leur parfaite soudure.

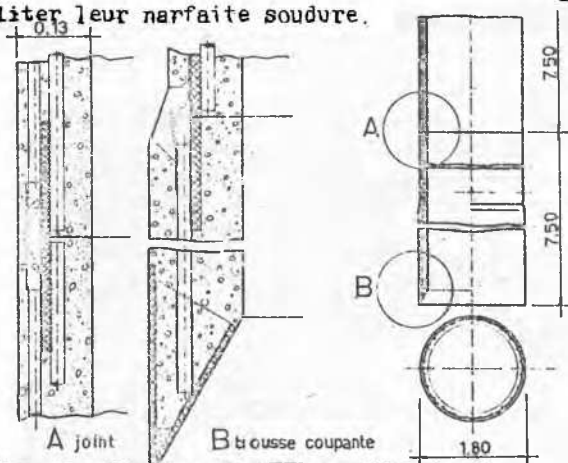


Fig. 5 - Chemise de béton préfabriquée

Le béton employé était de haute qualité, à cause des sollicitations des éléments pendant leur manoeuvre en phase de construction du pieu ainsi que pour les demandes permanentes sur le pieu des charges fléchissantes transmises par la structure du pont. Pour diminuer le nombre des moules, la maturation de coulée était faite à la vapeur. Les éléments préfabriqués étaient transportés à la place de leur utilisation au moyen de pontons équipés.



Fig. 6 - Dispositif de precharge

5.0 Mise en oeuvre des éléments dans le fleuve et execution des pieux. Pour l'organisation du chantier on considéra deux solutions. La première qui envisageait l'emploi d'îlots sur supports où placer tout le matériel des machines ainsi que l'équipement nécessaire et la seconde qui prévoyait l'emploi de pontons flottants. On décida pour la seconde solution. En effet, l'îlot, à part son coût considérablement supérieur, était sujet, étant donné la nature du fond et les caractéristiques du fleuve, à de grands sapements qui auraient pu nuire à un cours régulier des opérations. Le choix se révéla particulièrement heureux lorsque, après une campagne géognostique particulièrement étudiée, faite avant le début des travaux, il apparût nécessaire d'augmenter soit le nombre des pieux, soit leur longueur. Par conséquent, il fallut augmenter de toute urgence le nombre des equi-

pements et des pontons; chose bien difficilement réalisable dans les limites du temps disponible pour l'exécution de l'ouvrage, si on avait prévu l'emploi d'îlots sur supports. On choisit un type de ponton en H (voir fig 7) Cette disposition permis l'installation à bord de deux machines opératrices pour la pose et l'enfoncement des éléments tubulaires préfabriqués après leur creusement interne. L'inconvénient de devoir attendre la fin du second pieu pour le déplacement du ponton était plus que compensé par le partage en moitié des stations et la réduction des services auxiliaires, comme grue, installation des boues bentonitiques qui furent communes pour les deux machines opératrices. Même pour le personnel on obtenait ainsi une économie.



Un soin particulier, étant donné la vitesse des eaux du Paraná et la possibilité de crues de considérable intensité, fut donné aux amarres des pontons. Les pièces mortes furent particulièrement étudiées et sur les pontons on plaça des cabestans permettant le réglage de la tension des câbles et de ce fait la fonction des pontons en rapport à l'hauteur du fleuve et à la vitesse des eaux. Même dans le cas de fortes crues, on n'eut à déplorer aucun inconvénient.

#### 6.0 Machines Opératrices

##### 6.1 Machine à circulation inversée.

Pour l'exécution des pieux dans le fleuve, on adopta une machine à circulation inverse. On devait en effet unir les mécanismes nécessaires pour le creusement et une tubeuse pour le mouvement alternatif du revêtement tubulaire en béton pour son blocage, pour toute la durée de l'opération concernant la liaison d'un élément préfabriqué au revêtement déjà en cours d'enfoncement. Un mât, relié à la machine, soutenait l'élément tubulaire en position, pendant l'opération de soudure. La machine à circulation inverse était en outre

étudiée pour permettre l'emploi de hammergrabs monocablé nécessaires pour traverser les couches dures, ce qui ne pouvait pas être fait avec la machine à circulation inverse. On joignait par conséquent les avantages d'emploi d'une machine à rotation avec ceux d'une machine à percussion, éliminant les défauts propres de ces types d'équipements et obtenant la production maxima.

##### 6.2 Tubeuse

Elle était formée par un châssis d'acier ayant deux colliers: l'inférieur fixe, le supérieur mobile.

Les deux colliers étaient équipés avec 8 vérins hydrauliques pour serrer la chemise sur laquelle exerçait une force de 104 tonnes. Le collier supérieur était équipé avec verins verticaux qui permettaient d'exercer une action de poussée de 10 tonnes pendant les phases de fonçage et d'arrachage des chemises. Cette valeur au moment de l'exécution des pieux qui atteignaient des profondeurs supérieures à celles prévues sur projet, a été augmentée par environ 70 tonnes de lest qui, appuyées sur les chemises mêmes, amélioraient

le fonçage dans le terrain.

Enfin, un verin horizontal, agissant lui aussi sur le collier supérieur, permettait de transférer aux chemises de béton un mouvement de louvoisement.

### Conclusions

Le type de pieu adopté a permis l'exécution du travail dans le délai prévu et les nombreux essais de charge effectués ont confirmé la validité du choix fait au point de vue technique. On considère donc que ce type de pieu peut avoir d'intéressantes applications à l'avenir pour des travaux similaires qui demandent l'emploi de pieux de grand diamètre avec un considérable battant d'eau soumis à de fortes charges axiales et à des moments fléchissants pour lesquels, des considérations de sûreté, comportent le revêtement permanent préventif du pieu et la garantie de la position des cages ainsi que la application de dispositifs de précharge. Bien qu'ayant déjà employé précédemment les diverses technologies, on ne les avait jamais employées ensemble au cours d'un même projet. Le pont a été réalisé par un Consortium d'Entreprises Italiennes.



Fig. 8 - Essai de charge



Fig. 9 - Vue générale du chantier