



© PHOTOTEQUE VINCI ET FILIALES

# TROISIÈME TRAVERSÉE SUR LE CANAL DE PANAMA : DES VIADUCS SUR TOUS LES FRONTS

AUTEURS : ÉRIC JOLY, RESPONSABLE CONCEPTION, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - LAURENT AGOSTINI, DIRECTEUR TECHNIQUE, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - SAMUEL L'HUISSIER, RESPONSABLE PONTS EN ENCORBELLEMENT, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - GUILLAUME DECOUX, RESPONSABLE PONTS POUSSÉS, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

LA TROISIÈME TRAVERSÉE DU CANAL DE PANAMA, RÉALISÉE AU NORD DES ÉCLUSES DE GATÚN SUR LA CÔTE NORD DE L'ATLANTIQUE, RÉPOND À L'ENGAGEMENT PRIS PAR L'ACP (AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ) DE DÉSENCLAVER LA RÉGION DE COLÓN APRÈS LES TRAVAUX D'ÉLARGISSEMENT DU CANAL ET LA CONSTRUCTION DU TROISIÈME JEU D'ÉCLUSES. CETTE TRAVERSÉE DE PRÈS DE 3 km COMPREND UN PONT PRINCIPAL HAUBANÉ DE 1 050 m DE LONG, AVEC UNE PORTÉE CENTRALE DE 530 m, ET DES VIADUCS D'ACCÈS DE 1 125 m À L'EST ET 906 m À L'OUEST. PRÈS DE 130 ANS APRÈS LES DIFFICULTÉS DE FERDINAND DE LESSEPS DANS LA « COUPE CULEBRA » POUR LES TRAVAUX DU CANAL, CE PROJET MARQUE LE RETOUR DE L'INGÉNIERIE FRANÇAISE AU PANAMA.

L'article traite des viaducs d'accès. Ces viaducs, tous réalisés en béton coulé en place, comprennent des parties réalisées par poussage et d'autres par encorbellements successifs (figure 3).

Le contrat initial d'un montant de 365 millions de dollars est un contrat de *Build only*, avec une conception du projet faite par CCC (China Com-

munications Construction Company), Highway Consultants et Louis Berger Group pour le compte de l'ACP (Autoridad del Canal de Panamá).

La conception initiale prévoit pour les viaducs d'accès des modules (ensemble de tabliers) en voussoirs préfabriqués mis en place au cintre auto-lanceur, et un pont en encorbellement de voussoirs coulés en place au-dessus de la voie

**1- 3<sup>e</sup> traversée du Canal de Panama - Vue d'ensemble.**

**1- 3rd Panama Canal crossing - General view.**

ferrée située à l'est (figure 4). Cette conception a dû être cependant reprise sur plusieurs points, des hypothèses sismiques jusqu'au design de détails, afin de rendre l'ouvrage constructible et réglementaire. Cette reprise de conception a donc logiquement nécessité une requalification du contrat, avec prise de responsabilités de l'entreprise sur tous les points modifiés.



© PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES

2

Dans la conception initiale, les sections transversales des caissons des tabliers, de 20,80 m de large, sont à hauteur constante pour les modules de 45 m (hauteur 2,50 m) et 78 m (hauteur 4,40 m), et à hauteur variable pour le pont coulé en place de 125 m de portée.

**LA NÉCESSITÉ D'UNE MULTITUDE DE CHANTIERS**

La réalisation de ces viaducs d'accès est un défi au même titre que le pont

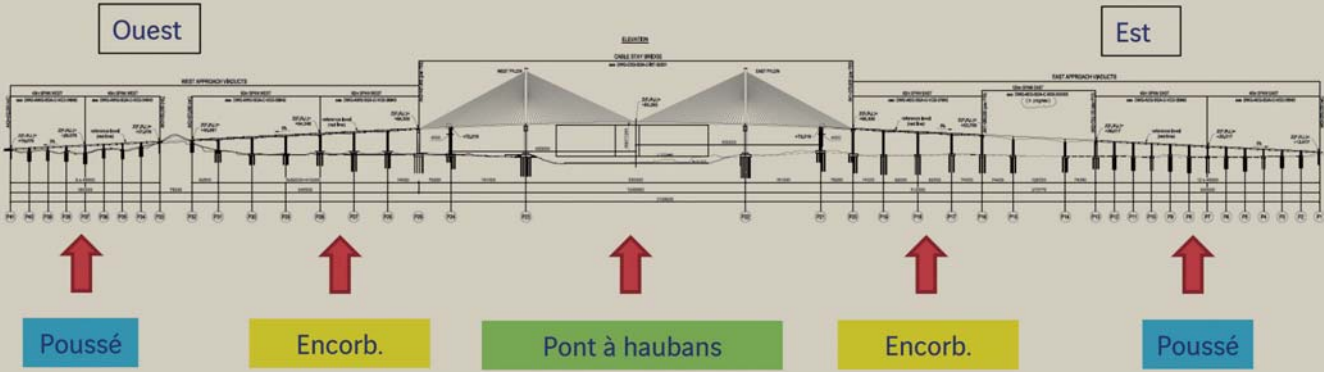
**2- 3° traversée du Canal de Panama - Situation.**  
**3- Élévations des ouvrages - Vue générale.**

**2- 3rd Panama Canal crossing - Location.**  
**3- Elevation views of the works - General view.**

principal, tant par la longueur totale à réaliser, plus de deux kilomètres, que par la variété des ouvrages. Les modes constructifs choisis ont été revus, avec pour objectifs de rationaliser les moyens et de respecter les délais très courts, et les structures ont dû être reprises, des principes de ferrailage jusqu'à la précontrainte. En effet, la préfabrication de voussoirs de deux hauteurs différentes et leur pose à l'aide de cintres n'étaient pas viables : les linéaires en jeu n'étaient pas suffisants,

le transport des voussoirs par barge à travers le canal était très compliqué, l'installation d'une usine de préfabrication de chaque côté du canal nécessitant des fondations lourdes dans un sol inconsistant était hors de question. Rationaliser les moyens, cela veut aussi dire qu'il faut, certes, avoir des ouvrages répétitifs, mais aussi et surtout suffisamment d'équipes de compagnons qualifiés pour les réaliser. Il n'est en effet pas question de les réaliser l'un après l'autre.

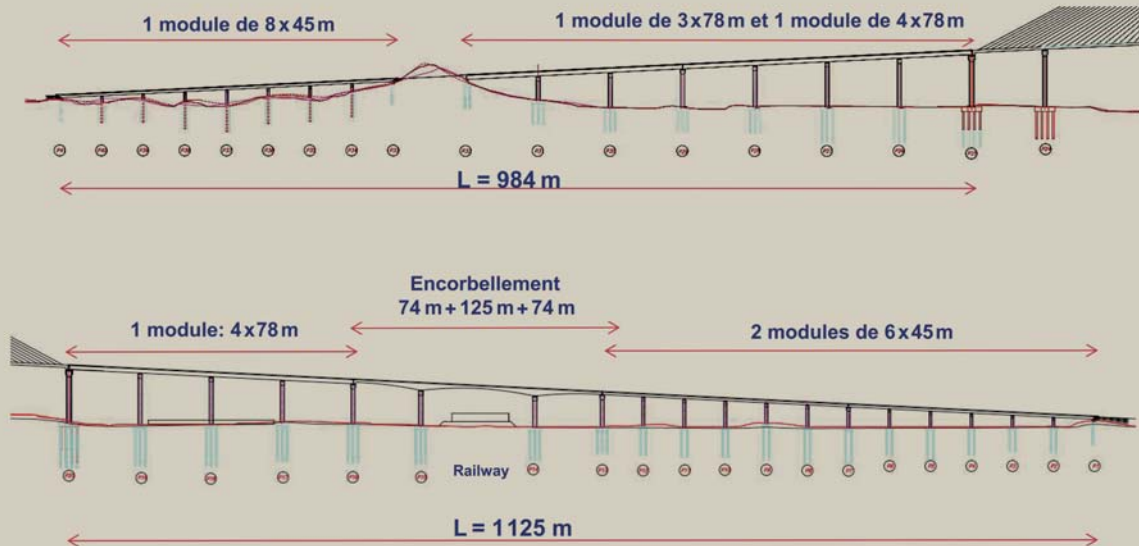
**ÉLÉVATIONS DES OUVRAGES - VUE GÉNÉRALE**



3

© PHOTOTÉQUE VINCI ET FILIALES

## TRAMAGE INITIAL DES OUVRAGES



4

© PHOTO THÈQUE VINCI ET FILIALES

Le choix d'avoir deux modes constructifs différents s'est ainsi rapidement imposé, tout comme celui d'abandonner toute préfabrication complète des voussoirs. Les contraintes du projet, avec la configuration des ouvrages d'extrémité comportant des travées répétitives de 45 m, une longueur maximale de 540 m à l'ouest et des accès complètement libres, ont rapidement imposé une construction par poussage. Seuls les profils des ouvrages nécessitaient des ajustements afin de rendre les ponts « poussables », en ligne droite ou selon une courbure en plan.

Les autres ouvrages sont construits par encorbellement de voussoirs coulés en place. Les ouvrages sont ainsi dans la configuration telle que montrée en figure 3.

### LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE ET LES CONDITIONS DE SITE

Le contexte réglementaire est basé sur les AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) « LRF Bridge Design Specifications ». Les conditions de site se distinguent par un risque sismique important avec des conditions géologiques très défavorables par endroit à cause de la présence de couches molles (Atlantick Muck) parfois très épaisses.

Le spectre de réponse au rocher a un plateau à 1,3 g pour le séisme de 2475 ans de période de retour.

Les paramètres géophysiques des sols, et notamment les vitesses de

propagation des ondes de cisaillement ayant été cependant mal estimés dans la conception initiale, une campagne complémentaire d'essais *crosshole* a permis de confirmer les paramètres plus pessimistes pris en compte par l'entreprise. Les conséquences ont été importantes pour le design des ouvrages et de leurs fondations, à la fois à cause de toutes les disposi-

4- **Tramage initial des ouvrages.**

5- **Triple appui pendulaire sphérique.**

4- **Initial framing of the works.**

5- **Triple spherical pendular support.**

tions constructives demandées par les AASTHO vis-à-vis du niveau de séisme, mais aussi à cause des effets liés aux mauvaises conditions géologiques : forts effets d'interactions cinématique sur les fondations profondes et modifications des mouvements sismiques. Les conditions de vent ne sont pas exceptionnelles, par contre l'humidité est omniprésente et le risque de corro-

## TRIPLE APPUI PENDULAIRE SPHÉRIQUE

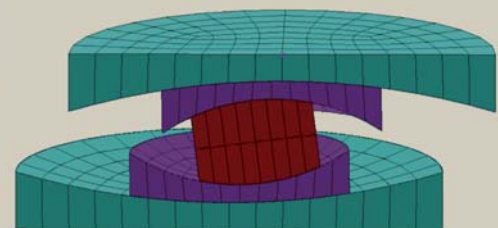


Main Concave



Slider Concave

Section of Triple Pendulum Bearing



5

© PHOTO THÈQUE VINCI ET FILIALES



© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES  
6

sion est bien réel. C'est la raison pour laquelle l'ACP a privilégié des ouvrages « tout béton » avec le souci de minimiser les besoins de maintenance durant les 100 ans de durée de vie.

### LES SOLUTIONS TECHNIQUES COMMUNES À TOUS LES OUVRAGES

Tous les ouvrages reposent sur leurs appuis par l'intermédiaire de « Triple pendulum bearings », appuis pendulaires triplement sphériques, particulièrement efficaces pour filtrer les excitations sismiques (figure 5).

Le principe de fonctionnement de ces appuis est que la période de vibration du tablier est choisie simplement avec le rayon de courbure de la surface concave. Elle est indépendante de la masse de la structure portée. L'amortissement est sélectionné en choisissant les coefficients de frottement.

Les mouvements de torsion de la structure sont minimisés car le centre de rigidité des appuis coïncide automatiquement avec le centre d'inertie de la structure portée.

### 6- Vue du pont Est en cours de poussage.

### 7- Les 3 pousseurs en action.

### 6- View of the east bridge during pushing.

### 7- The 3 pushers in action.

La période de vibration, la capacité de charge verticale, l'amortissement, la capacité de déplacement peuvent être sélectionnés indépendamment.

Trois rayons effectifs et trois coefficients de frottement sont choisis pour optimiser les performances pour différentes forces et fréquences de secousses sismiques.

Cela permet une flexibilité de conception maximale pour tenir compte des mouvements modérés et extrêmes. Les joints de dilatation initialement présents entre les différents modules ont été supprimés, seuls sont conservés les joints entre les ouvrages.

Les comportements des tabliers et de leurs fondations ont ainsi été calculés dans toutes les phases de construction et en service en faisant des calculs non-linéaires dynamiques (calculs temporels) à l'aide du logiciel Sofistik. Les conditions géologiques au droit de chaque pile ont été prises en compte finement, ce qui s'est traduit par des mouvements sismiques différents par pile, ainsi que des interactions cinématiques (efforts induits par les mouvements des différentes couches de sol sur les pieux les traversant), au droit de chaque pile.

Les fondations de tous les ouvrages étaient prévues sur pieux. Elles ont pu être maintenues partout moyennant quelques aménagements, sauf sur les deux piles P17 et P19 à l'est décrites ci-après.



7  
© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

## LES PONTS POUSSÉS

Les ponts poussés aux deux extrémités sont différents par leurs longueurs : 360 m à l'est et 540 m à l'ouest, ainsi que par leurs tracés en plan : courbe à l'ouest [R=5000 m], et droit à l'est. Ils sont poussés sur un profil à 5 % avec un poids d'environ 35 t par mètre. (figure 6).

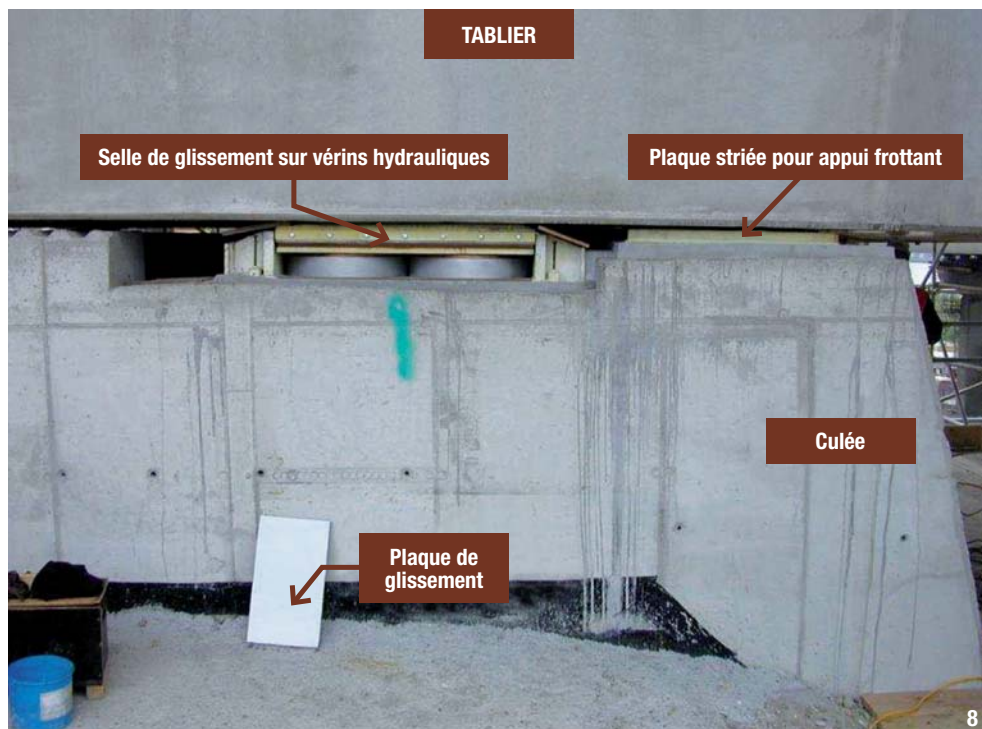
La section transversale a été légèrement optimisée avec une section de hauteur constante : 3,00 m.

Outre les bancs de poussage et les palées provisoires qu'il a fallu rajouter entre les culées et la première pile, les problèmes majeurs pour la conception de ces ponts ont été :

- La fabrication, l'acheminement et le montage/démontage/remontage de l'avant- bec ;
- Le schéma de précontrainte de poussage avec des câbles principalement extérieurs au béton ; les prescriptions des AASHTO sont en effet très limitatives pour l'utilisation des câbles extérieurs, ce qui est dû surtout au fait que ce mode de construction par poussage est très peu utilisé outre-atlantique ;
- La capacité des pousseurs qui devait être dimensionnée pour l'ouvrage le plus long (près de 19000 t) en intégrant la pente de 5%, des pousseurs existants devant être réutilisés (figure 7) ;
- Les dispositifs complémentaires de retenue des ouvrages, les frottements pouvant être mobilisés sur culée et palées provisoires étant insuffisants pour l'ouvrage le plus long.

Pour chaque ouvrage, un banc de poussage de 68 m de long, constitué de 3 longrines fondées sur pieux, a été prévu à l'arrière de la culée. Une palée provisoire a été rajoutée dans la première travée, à 17 m de la culée.

Chaque travée de 45 m est coulée en quatre tronçons sur le banc, dont un vousoir sur pile et deux déviateurs, chaque tronçon étant coulé en deux phases : d'abord le U inférieur constitué du hourdis inférieur et des âmes du caisson, puis la table supérieure. Avant chaque poussage la précontrainte longitudinale est mise en tension : 2 câbles 12C15s et 2 câbles 19C15s internes, et 8 câbles 27C15s externes par travée, la précontrainte transversale 4F15s@600 mm est mise en tension avant le poussage de la travée totale. Un avant-bec métallique de 32,75 m de long pesant 90 t (figure 6) a été utilisé, il est fixé au tablier par l'intermédiaire de barres de précontraintes horizon-



**8- Détail des appuis sur culée pendant le poussage.**  
**9- Dispositifs de freinage complémentaire.**

**8- Detail of supports on the abutment during pushing.**  
**9- Additional braking devices.**

tales. L'avant-bec ayant une hauteur de 3,6 m plus importante que celle du tablier [3,0 m], des plots en béton ont été provisoirement rajoutés sur le hourdis supérieur, ces plots sont fixés par des barres verticales de précontrainte. Pour prévenir tout désordre en cas de séisme pendant les phases de construction, les piles ont été équipées en tête de dispositifs provisoires servant à la fois de guidage latéral et d'amortissement transversal [systèmes à ressort précontraint].

Les pousseurs sont ceux de l'entreprise précédemment utilisés sur le projet de l'Oresund pour les éléments de tunnels. Ces pousseurs, au nombre de trois (figure 7) et d'un poids unitaire de 25 t, sont constitués de deux vérins hydrau-



liques avec une course de 1200 mm et une capacité par poussoir de 615 t, donc 1850 t au total. Ils sont fixés par serrage sur chacune des longrines. Le poussage du pont se fait travée par travée sur des plaques en acier avec un contact acier/acier, les coefficients de frottement pris en compte sont variables selon les phases considérées :

- Sur le banc de poussage : 25% en phase de démarrage et 15% en phase de poussage ;
- Sur les appuis glissants : 2,5% en phase de démarrage et moins de 2% en poussage.

Pendant les phases de poussage, un seul poussoir est suffisant pour « retenir » le pont jusqu'à la 8<sup>e</sup> travée, au-delà, il faut prévoir de déplacer les pousseurs un par un.

À la fin du poussage de chaque travée, le tablier est déveriné sur la culée et la palée provisoire afin qu'il repose sur des tôles striées et que ces deux appuis puissent assurer par frottement le freinage du pont (figure 8).

En plus, pour le pont Est, il faut pouvoir mobiliser une capacité de freinage de



10  
© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

**10- Le pont en encorbellements Ouest.**

**11- Étaieiment lourd Hebetec en rive.**

**10- The west cantilever bridge.**

**11- Heavy Hebetec strutting on the bank.**

925 t et il a fallu prévoir à partir de la travée 8 des dispositifs complémentaires de freinage pouvant reprendre 500 t supplémentaire, les efforts étant transmis par butonnage de la sous-face du tablier sur la culée (figure 9). Au final, le cycle de poussage d'une travée se fait sur trois semaines. Les câbles extérieurs de continuité (6 câbles 27C15S) complètent la précontrainte.

## LES PONTS EN ENCORBELLEMENT

Les travées des ponts à modules de 78 m ont en fait été revues afin d'optimiser les travées de rive tout en respectant l'harmonie générale, le découpage final des ouvrages est le suivant :

- À l'ouest (figure 10), les 7 x 78 m ont été remplacés par : 62,50 m – 5 x 82 m – 74 m ;
- À l'est, les 4 x 78 m ont été remplacés par : 74 m – 2 x 82 m – 74 m ;
- Le pont sur la voie ferrée est resté dans sa configuration initiale : 74 m – 125 m – 74 m.

Les sections transversales ont été légèrement optimisées avec une section à hauteur variable : 2,80/4,40 m pour les travées de 82 m et 3,00/7,50 m pour la travée de 125 m.

Les fléaux sont coulés en place à l'aide d'équipages mobiles de 60 t chacun pour les fléaux de 82 m et de 70 t chacun pour les fléaux de 125 m. Deux paires d'équipages sont utilisées pour couler les 9 fléaux de 82 m, et une paire pour les deux fléaux de 125 m. ▷



© PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES  
11



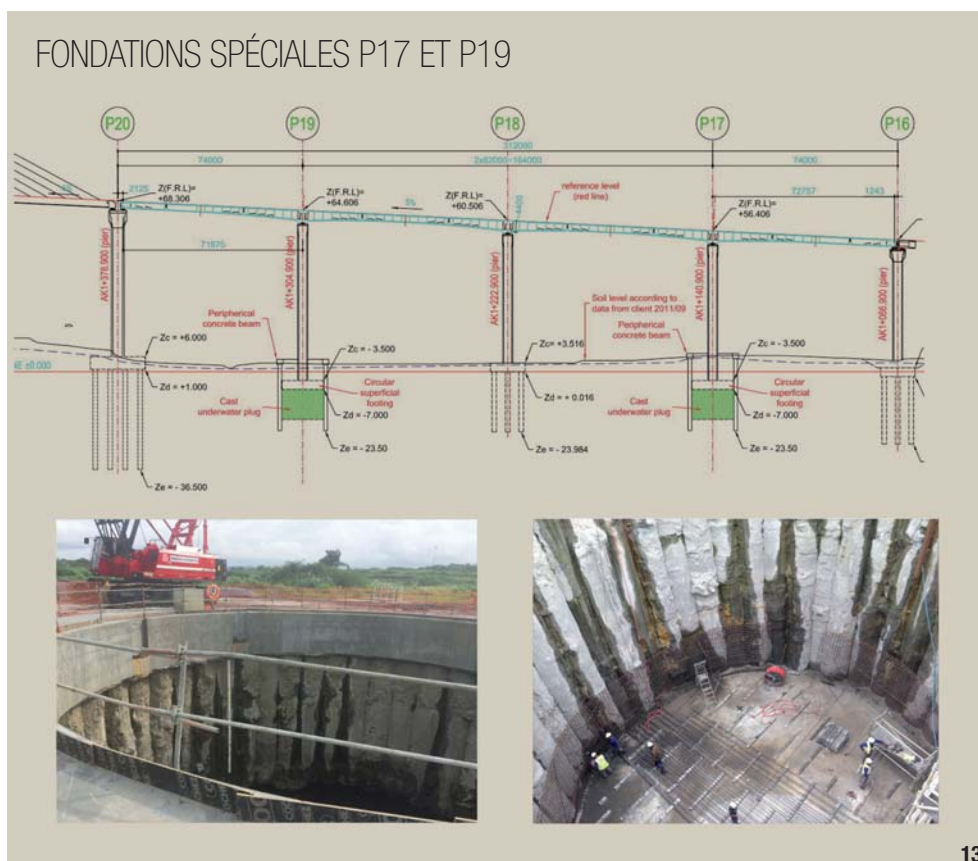
12

© PHOTO THÈQUE VINCI ET FILIALES

**12- Fléau du 125 m et console de rive.**  
**13- Fondations spéciales P17 et P19.**

**12- 125-metre deck section and edge cantilever girder.**

**13- Special foundations P17 and P19.**



13

© PHOTO THÈQUE VINCI ET FILIALES

Chaque voussoir de 3,50 m est précontraint par 2 câbles 25C15s.

La configuration particulière avec des ouvrages de part et d'autre du canal a nécessité 58 opérations de hissage/déhissage de matériels lourds (coffrages spéciaux, équipage mobile, cintre...) et transferts par barge sur le canal.

Pour la travée spéciale de 125 m au-dessus de la voie ferrée, une grue mobile a été utilisée sur le tablier pour achever les extrémités des fléaux.

La construction cyclique des fléaux est classique et se déroule sur 4 jours par paire de voussoirs :

- Avancée et réglage de l'équipage ;
- Mise en tension de la précontrainte de fléau des voussoirs précédents ;
- Pose de la cage d'armature en U préfabriquée ;
- Avancement du noyau coffrant intérieur ;
- Pose de la cage d'armature « table supérieure » préfabriquée ;
- Fermeture des masques et bétonnage.

Les travées de rive ne pouvaient pas être construites par sur-encorbellements pour les fléaux de 82 m.

Une innovante tour d'étalement de forte capacité auto-télescopique de grande hauteur (60 m) a spécialement été développée par Vinci Construction Grands Projets et Hebetec pour le projet (figure 11).

Les fléaux sont cloués provisoirement sur les piles par 4 câbles 19T125s, les appuis définitifs étant mis en place après clavage des fléaux entre eux. Les câbles d'éclisse (8 câbles 23C15S par travée) et les câbles extérieurs de continuité (8 câbles 22C15S) complètent la précontrainte.

Pour les fléaux de 125 m dont les travées de rive font aussi 74 m, donc relativement courtes par rapport aux fléaux (balancement  $0,59 \times L$ ), il a été possible d'utiliser des consoles directement accrochées aux piles P13 et P16 (figure 12).

Les appuis P17 et P19 du viaduc Est ont nécessité une attention particulière du fait des configurations géologiques très défavorables sous excitations sismiques, qui généraient des sollicitations inacceptables pour

des fondations profondes sur pieux. La solution finale se devait de protéger au maximum la pile et sa fondation des effets cinématiques d'interaction.

Les principes retenus sont les suivants (figure 13) :

- Supprimer les pieux principaux en conservant uniquement la semelle de la fondation sous la pile ;
- Substituer le mauvais sol par un gros béton entre la sous-face de la semelle et le niveau supérieur de la couche de rocher (Gatun Rock), soit sur 12 m de hauteur ;
- Prévoir une enceinte périphérique de plus de 18 m de diamètre en pieux sécants fichés dans le rocher, et travaillant uniquement en « touches de piano » sans reprise de traction annulaire.

Les efforts ont été évalués en considérant un modèle global 3D « Sol + Structure », y compris la modélisation de la masse du tablier (3800 t) et de ses appuis pendulaires parasismiques sur la pile, grâce à une analyse aux Éléments Finis (logiciel Dynaflo) et des calculs prenant en compte les non-linéarités du sol avec des lois de comportement complexes (Multi-yield Elastoplastic model with kinematic hardening based on plasticity theory). Ces analyses compliquées ont permis ainsi d'évaluer au plus juste l'ensemble des sollicitations sur la semelle de fondation et l'enceinte de pieux sécants issus à la fois des effets inertiels (les réponses du pont au séisme) et des interactions cinématiques (les effets du aux mouvements propres des couches de sol sur les fondations). □

## QUANTITÉS PRINCIPALES

Pont poussé Longueur totale = 900 m	Béton	Armatures	Précontrainte
Pieux et semelles	12 785 m <sup>3</sup>	1 596 t	-
Culées Piles et têtes de piles	4 740 m <sup>3</sup>	757 t	-
Tabliers	11 470 m <sup>3</sup>	2 530 t	677 t

Pont en encorbellement Longueur totale = 1 132 m	Béton	Armatures	Précontrainte
Pieux et semelles	14 747 m <sup>3</sup>	1 752 t	-
Culées Piles et têtes de piles	6 083 m <sup>3</sup>	1 300 t	-
Tabliers	18 025 m <sup>3</sup>	3 965 t	975 t

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

### CLIENT :

ACP (Autoridad del Canal de Panamá)

### INGÉNIEUR CONSEIL :

China Communications Construction Company Highway Consultants et Louis Berger Group

### ENTREPRISE GÉNÉRALE :

Pasa (Vinci Construction Grands Projets)

### BUREAU D'ÉTUDES :

Vinci Construction Grands Projets (Vcgp) -

Département Conception et Études de Structures (Dces)

### PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES :

Vinci Construction Grands Projets - Département Scientifique - Pôle géotechnique

### PARAMÈTRES SISMIQUES ET ANALYSE P17-P19 :

Géodynamique et Structure

### PRÉCONTRAITE : Freyssinet

### BUREAU DE CONTRÔLE STRUCTURES :

International Bridge Technology (IBT)

### BUREAU DE CONTRÔLE GÉOTECHNIQUE :

Dan Brown and Associates

## ABSTRACT

### THIRD CROSSING OVER THE PANAMA CANAL: VIADUCTS ON ALL FRONTS

ÉRIC JOLY, VINCI - LAURENT AGOSTINI, VINCI - SAMUEL LHUISSIER, VINCI - GUILLAUME DECOLUX, VINCI

After a significant reappraisal of the initial design, both the design and the construction technique for the access viaducts to the third bridge over the Panama Canal were optimised in response to challenges related to the site constraints: geological profiles, earthquakes, and impossibility of using work barges on the canal permanently. It was also essential, from a human resource viewpoint, to provide for two different construction techniques. The general configuration was very suitable for the design of launched bridges at both ends of the canal, and cantilever bridges elsewhere. All the structures rest on their piers via spherical pendular supports, which are extremely effective with respect to seismic risk. The highly varied geological profiles, sometimes very unfavourable due to the presence of large soft layers (Atlantic Muck), in some cases required strengthening of the deep foundations with piles, or even changing the foundations for special foundations of an original design. □

### TERCER PASO SOBRE EL CANAL DE PANAMÁ: VIADUCTOS EN TODOS LOS FRENTEROS

ÉRIC JOLY, VINCI - LAURENT AGOSTINI, VINCI - SAMUEL LHUISSIER, VINCI - GUILLAUME DECOLUX, VINCI

Tras la revisión a fondo del diseño inicial, los viaductos de acceso del tercer puente sobre el canal de Panamá se han optimizado a la vez en su diseño y su modo de realización para responder a los problemas generados por las restricciones del emplazamiento: perfiles geológicos, sismos e imposibilidad de utilizar permanentemente barcasas de trabajo en el canal. Asimismo, ha sido imprescindible prever dos modos de construcción en términos de medios humanos. La configuración general ha facilitado el diseño de los puentes pretensados en los dos extremos del canal, y de puentes en ménsula en el resto de puntos. Todas las construcciones reposan sobre sus pilotes mediante apoyos pendulares esféricos, especialmente eficaces ante el riesgo sísmico. Los perfiles geológicos muy variados, y en ocasiones desfavorables a causa de la presencia de importantes capas blandas (Atlantic Muck), han exigido en algunos casos refuerzos de los cimientos profundos mediante pilotes, e incluso cambiar dichos cimientos por cimientos especiales de diseño original. □