

LES VIADUCS DU PROJET GAUTRAIN

GAUTRAIN PROJECT VIADUCTS

VALÉRY PREMAUD - LOUIS MARRACCI

Bouygues Travaux Publics, Design Office, St Quentin en Yvelines, France

1. INTRODUCTION

Le projet Gautrain est un des plus importants projets réalisés par Bouygues Travaux Publics. Il s'agit de développer, concevoir et construire, exploiter et maintenir un système de transport rapide de 77km de longueur, 9,000 places de parkings réparties sur les 10 stations et enfin un réseau secondaire de bus dédié au projet et desservant une zone de 10 km autour de chaque station. C'est un projet complet et complexe pour lequel Bouygues TP a joué le rôle de leader technique et a contribué avec la société Murray & Roberts ainsi que le groupe d'intérêt Sud-africain Strategic Partner Group à la construction du génie civil. Bombardier et RATP complète le panel de la société de concession et ont fourni respectivement le matériel roulant et les systèmes ferroviaires d'une part, 15 ans d'exploitation et de maintenance des infrastructures d'autre part.

Sur les 77 kilomètres de ligne que compte le projet Gautrain, une place particulière est faite aux viaducs avec pas moins de 13 ouvrages (Figure 1). Ils se décomposent ainsi :

- 2 viaducs à poutres précontraintes (Photo 2)
- 2 viaducs construits selon la méthode des encorbellements successifs avec voussoirs coulés en place (Photo 3)
- 9 viaducs réalisés avec des voussoirs préfabriqués (Photo 4)

1. INTRODUCTION

The Gautrain Rail project is one of the most important projects developed and built by Bouygues Travaux Publics. It consists of developing, designing, constructing, operating and maintaining a 77km long railway line to provide domestic and airport train services, together with a dedicated bus network servicing a radius of 10km around each of the 10 stations, and 9,000 specific parking spaces within the station precincts. In this comprehensive and complex project, Bouygues TP ensured the technical leadership and, in association with local groups Murray Roberts and Strategic Partners Group, implemented the construction of the civil infrastructure. Bombardier and SPG are supplying the rolling stock and railway systems and RATP, M&R and SPG will manage the 15 years of operation and maintenance with Bombardier being heavily involved in the maintenance of the railway.

On the 77 km Gautrain project tracks, particular emphasis is given to the viaducts with no less than 13 viaducts (Figure 1):

- 2 viaducts with prestressed beams (Photo 2)
- 2 cast in situ concrete cantilever viaducts (Photo 3)
- 9 precast segments viaducts (Photo 4)

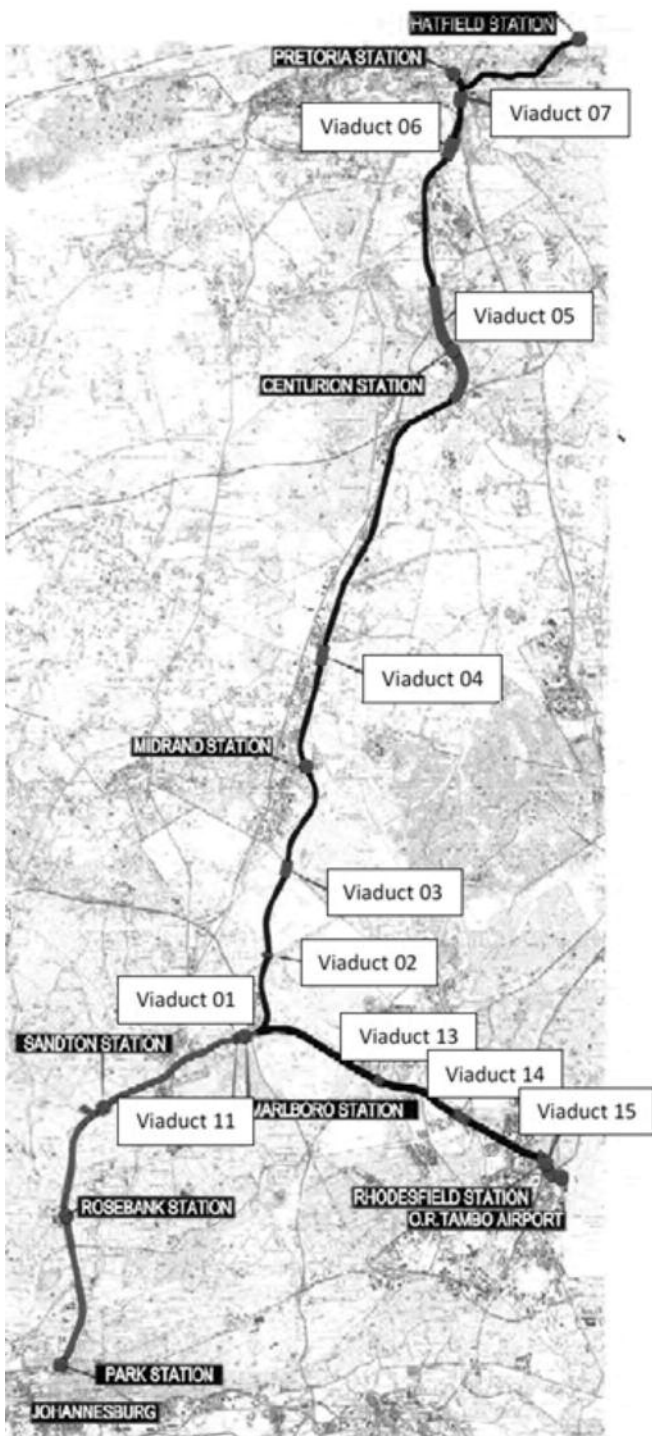


Fig. 1 : Localisation des ouvrages / Bridges locations.



Photo 2 : Pont à poutres précontraintes / Prestressed beams bridges.



Photo 3 : Viaduc 05d construit par encorbellement avec voussoirs coulés en place / Cast in situ concrete cantilever viaduct 05d.



Photo 4 : Viaduc 03 avec voussoirs préfabriqués / Precast segments viaduct 03.

Les tabliers comportent deux voies ferroviaires pour accueillir le futur train Electrostar. Les longueurs des ouvrages vont de 174m (Viaduc 02) à 3278m (Viaduc 5c). La longueur cumulée de tous les viaducs est d'environ 10 km. Certains de ces ouvrages ont la particularité d'accueillir les futures stations : Rhodesfield, Orta (Viaduc 15) et Centurion (Viaduc 5c). Les 2 Viaducs V5b (John Vorster) et V5d (Jean Avenue), coulés en place assurent le franchissement avec un très fort biais de 2 importantes autoroutes assurant la liaison entre Johannesburg et Pretoria. Les plus grandes travées de ces

Decks have two railways for the future train Electrostar. The lengths of these viaducts range from 174m (Viaduct 02) to 3278m (Viaduct 5c). The total length of all the viaducts is about 10km. Some of these viaducts have railway stations: Rhodesfield, Orta (Viaduct 15) and Centurion (Viaduct 5c). The 2 cast in situ concrete cantilever viaducts V5b (John Vorster) and V5d (Jean Avenue) ensure the crossing of two major highways between Johannesburg and Pretoria with a strong bias. The largest spans of these two bridges are 110m (John Vorster) and 121m (Jean Avenue).

2 ouvrages sont de 110m (John Vorster) et 121m (Jean Avenue).

En ce qui concerne les fondations de ces différents viaducs, l'article spécial concernant la zone dolomitique explicite le choix fait pour les fondations des ouvrages situés dans cette zone.

Hors zone dolomitique, les fondations des ouvrages sont de 2 types :

- Semelles superficielles reposant directement sur le rocher
- Fondations sur pieux de diamètres variant de 600 à 1500mm et ancrés dans le rocher

2. HISTORIQUE DU PROJET DES VIADUCS

L'idée de réaliser des viaducs avec des voussoirs préfabriqués était apparue pendant l'offre. La maîtrise de la technique par les entreprises Bouygues TP et VSL et une analyse économique avaient justifié ce choix. Les travées prévues à l'époque étaient plutôt de l'ordre de 40 m.

Dans la zone de Centurion à 10 km au sud de Pretoria, il y avait 2 grands franchissements d'autoroutes à très fort biais qui nécessitaient des portées allant jusqu'à 120 m. A cette phase des études, 2 ouvrages de 600 m de long chacun étaient proposés en béton précontraint avec voussoirs coulés en place réalisés avec la méthode des encorbellements successifs.

Jean Muller International et Ingerop étaient les bureaux d'études en charge des études des viaducs en phase d'Avant Projet Détaillé. Ingerop avait en charge la zone de Pretoria et de l'aéroport et JMI s'occupait des autres ouvrages.

Ingerop a étudié principalement les viaducs préfabriqués. Les principales questions posées pendant cette phase étaient :

- le type de précontrainte ; tout en précontrainte interne, tout en externe ou mixte.
- Utilisation de la colle entre les voussoirs ou non
- La mise en place de précontrainte additionnelle
- La pose d'une étanchéité sur les tabliers ou étancher seulement les joints entre les voussoirs

JMI a aussi étudié les voussoirs préfabriqués mais dans la zone de Centurion.

Pour les 2 grands ouvrages de franchissement d'autoroutes, le bureau d'études de Bouygues TP était en charge de la solution béton à voussoirs coulés en place et construits par encorbellement afin de franchir des portées atteignant au maximum 120m.

Enfin, afin de prendre en compte l'effet de la continuité des rails, des études poussées d'interaction rail-structure ont été réalisées par Systra et Ingerop dès la phase APD. Ces calculs ont permis d'optimiser les fondations.

3. LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Organisation générale

En phase d'exécution, le chantier a été divisé en 4 zones géographiques. Les études ont suivi sensiblement le même

Foundations of these viaducts are explained in the article about the dolomitic area.

Excluding dolomitic area, foundations of these structures are of 2 types:

- *Spread Footings on the rock*
- *Piles with diameters ranging from 600 to 1500mm and anchored in the rock*

2. PROJECT VIADUCTS HISTORY

The idea of precast segments viaducts was mentioned during the tender. Bouygues TP and VSL's technology and an economic analysis justified this choice. Spans provided at the tender were about 40 m.

In the Centurion area 10 km in the south of Pretoria, there were two major crossings of highways that required skew bridges with spans up to 120 m. At this stage of studies, two cast in situ concrete cantilever viaducts of 600 m length were proposed.

Jean Muller International and Ingerop were design offices in charge of preliminary detailed design of these viaducts. Ingerop was in charge of the area of Pretoria and the airport and JMI in charge of other bridges.

Ingerop studied mainly precast segments viaducts. The main questions in this phase were:

- *The type of prestressing: internal ,external or mixed.*
- *The use or not of glue between segments*
- *The additional prestressing installation*
- *The installation of a waterproofing all along decks or just on joints between segments*

JMI also studied the precast segments but in the Centurion area.

For two major viaducts over highways, the design office of Bouygues TP was in charge of the concrete solution with cast in situ segments and built by cantilever method to cross spans of a maximum of 120m.

Finally, to take into account the continuity of rails, extensive studies of rail-structure interaction were carried out by Systra and Ingerop from the beginning of the preliminary detailed design. These calculations were used to optimize foundations.

3. DETAILED DESIGN

General Organization

For the detailed design, the project was divided into four geographical areas. The studies followed essentially the

découpage. Les viaducs préfabriqués étaient confiés à Africon et VKE (2 bureaux d'études locaux) qui ont été assistés par le bureau d'études anglais Halcrow. Les études d'exécution des 2 viaducs de Centurion (Viaduc John Vorster et Viaduc Jean Avenue) avec les grandes travées (maximum 121m) ont été confiées au bureau d'études de Bouygues TP et les études des viaducs et ponts à poutres à SNA (bureau d'étude sud-africain) et Scott Wilson.

Afin de maîtriser les hypothèses de calcul, la direction de projet a rédigé de façon très précise les hypothèses et méthodes principales d'études avec l'appui du bureau d'études de Bouygues TP. Ces documents ont ensuite été approuvés par le client (la Province du Gauteng).

Afin d'avoir une homogénéité d'approche entre les différents bureaux d'études, la direction de projet a confié au bureau d'études de Bouygues TP la réalisation d'une « étude type » qui consistait :

- À définir et figer la géométrie des voussoirs en concertation avec les services méthodes de Bouygues TP et VSL. Ceci a permis de commander les coffrages des voussoirs bien avant la fin des études d'exécution.
- À réaliser les études de détail complète d'une travée de 44 m afin de clarifier, entre autres, en amont les problèmes liés à l'Eurocode (cf paragraphe suivant) qui n'est pas familier aux bureaux d'études locaux et de donner une base de travail commune aux bureaux d'études en coffrage, câblage et ferrailage.

Principales hypothèses de calcul

Les normes sud-africaines, à savoir TMH7 et SATS, se rapportent aux ponts route et au transport de fret lourd. Elles ne s'appliquent pas à la justification du système rapide de transport en commun de Gautrain. C'est pourquoi le groupement a proposé l'application des Eurocodes, qui constitue une chaîne complète de normes homogènes entre elles. Les Eurocodes permettent de couvrir notamment la conception des ponts en béton et d'intégrer les critères de justification les plus à jour en matière d'ouvrages ferroviaires. Les normes sud-africaines ont toutefois été appliquées pour certains sujets particuliers comme l'évaluation des efforts de vent ou les règles de façonnage des aciers de béton armé. Les viaducs de Jean Avenue et John Vorster constituent une des premières applications en vraie grandeur des Eurocodes à des ouvrages de cette importance.

L'interprétation des textes a été facilitée par les compléments édités par le SETRA, notamment quant à la justification des zones d'efforts concentrés ou la justification de la stabilité de fléaux, et par l'expertise de J.A. CALGARO du Conseil Général des Ponts et Chaussées, pour la définition des « charges verticales classifiées » (au sens de l'EN1991-2) correspondant au matériel roulant retenu.

Les principales évolutions amenées par les Eurocodes par rapport aux pratiques issues des BAEL/BPEL sont :

- L'apparition de la notion d'ouvertures de fissure à la place des notions de fissuration; l'application des critères d'ouverture de fissure à des sections quelconques restant malaisée, il a été fait application de la DAN (Document d'application nationale) qui permet de se ramener à une justification des contraintes dans les aciers.

same division. Precast bridges were entrusted to Africon and RLO (two local consulting firms) who were assisted by the English design office Halcrow. The detailed design of the two viaducts in Centurion (Jean Avenue Viaduct and John Vorster Viaduct) with long spans (maximum 121m) have been assigned to the design office of Bouygues TP and viaducts and prestressed beams bridges to SNA (South African design office) and Scott Wilson.

To master the assumptions, project management has very precisely written the assumptions and methods with the support of Bouygues TP design office. These documents were then approved by the client (Gauteng Province).

In order to have consistency between different design offices, the project management entrusted the design of a typical study to Bouygues TP design office:

- *To define and fix the geometry of the segments in conjunction with methods departments of Bouygues TP and VSL. The purpose was to order segments formworks before the end of detailed design.*
- *To carry out the detailed design of a full span of 44 m to clarify problems due to Eurocode (see next paragraph) which is not familiar with local design office and provide a common working basis to consultants in formwork, reinforcement and prestressing.*

Design assumptions

South African standards TMH7 and SATS deal with road and rail bridges for heavy freight. They do not apply to the justification of a rapid train like Gautrain. This is why the group has proposed the application of the Eurocodes, which is a consistent and complete system of standards between them. Eurocodes can cover the design of concrete bridges and integrate criteria of justification more up to date in terms of railway structures. South African standards, however, were applied to specific topics such as the evaluation of wind loads or the rules of shaping bars of reinforced concrete.

Viaducts Jean Avenue and John Vorster are the first full-scale applications of the Eurocodes to bridges of such importance.

The interpretation of texts was facilitated by books edited by SETRA, particularly with regard to the justification of concentrated efforts or justification for cantilever stability and also by the expertise of J.A. CALGARO Conseil Général des Ponts et Chaussées, for the definition of "vertical loads" (as defined in EN1991-2) corresponding to the Gautrain train.

The main changes done by the Eurocodes compared with standards BAEL / BPEL are:

- *The concept of crack openings instead of notions of cracking, the application of the crack opening in any reinforced concrete section being difficult, it has been applied to the DAN (Document Application National) which can justify the stresses in bars.*

- La justification des contraintes tangentes et notamment la disparition des critères de justification à l'ELS. Les justifications ELU sont également modifiées, faisant intervenir un modèle de double treillis dont on peut fixer dans certaines limites l'inclinaison des bielles.
- Le chargement réglementaire à prendre en compte pour le calcul des ouvrages a fait l'objet d'un important débat avec la Province. La Province considérait que le chargement de l'Eurostar proposé par Bombardier n'était pas réglementaire et non enveloppe du matériel roulant existant susceptible de rouler sur la ligne dans l'avenir.

4. LES VIADUCS EN ZONE COURANTE

Les viaducs avec voussoirs préfabriqués

a) Appuis (Figure 5)

Les piles sont creuses en forme de caisson avec une section de 3m par 4m. L'épaisseur des parois est de 300mm. Elles sont réalisées à l'aide de coffrages grimpants et reposent sur une semelle de section 6.5m par 6.5m et d'épaisseur 1.5m. La construction des piles se fait par levée de 4m. D'un point de vue architectural des sillons horizontaux ont été introduits pour cacher les joints de construction entre les différentes levées. Des sillons verticaux ont également été réalisés partant du bas de la pile puis s'évasant vers le haut afin de donner à la tête de pile une forme en V avec des dimensions de 4m par 4.7m.

b) Tablier (Figure 6)

Les viaducs avec voussoirs préfabriqués représentent la majorité des ouvrages.

Les travées sont isostatiques et les portées vont de 22m à 56m. Le tablier est de hauteur constante égale à 3.5m, de largeur 10.1m et repose sur des appareils d'appuis à pot.

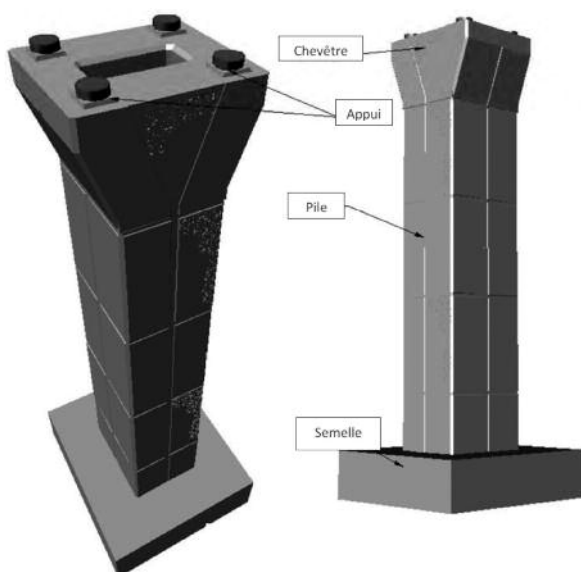


Fig. 5 : Pile des viaducs à voussoirs préfabriqués / Piers of precast segments viaducts.

- The justification of shear stresses, with the disappearance of justification criteria at SLS. The ULS justifications are also modified, involving a double lattice model in which we can fix, within certain limits, the inclination of the struts.
- Standard loads have been an important debate with the Province. Province considered Eurostar loads proposed by Bombardier not regulatory and non-envelope of existing trains which could use the line in the future.

4. VIADUCTS IN THE COMMON AREA

Precast segments viaducts

a) Piers (Figure 5)

Piers are hollow box-shaped sections of 3m by 4m. The wall thickness is 300mm. They are built using a climbing formwork. Pilecaps have a section 6.5m by 6.5m and 1.5m thick. The construction of piers is done by pouring 4m. From an architectural point of view, some horizontal recesses have been added to hide the construction joints between the different pourings. Vertical recesses have also been added from the bottom of the pier and widening upwardly in order to give a V-shape to the top pier with dimensions of 4.7m by 4m.

b) Deck (Figure 6)

Precast segments viaducts represent the majority of bridges.

The spans are isostatics and span lengths range from 22m to 56m. The deck has a constant height equal to 3.5m, 10.1m wide and is born by pot bearings.

The web thickness varies from 450 mm for segments on piers to 300mm for current segments. The deck prestressing is realized with 19T15 12T15 units. Additional ducts are also provided as additional prestressing in the future life of the bridges. The prestressing is mixed: external and internal.

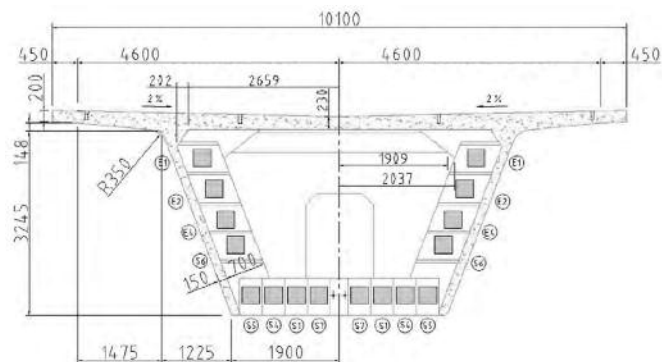


Fig. 6 : Coupe du voussoir sur pile au niveau des ancrages des câbles de précontrainte / Segment on pier cross section with prestressing anchorages.

L'épaisseur des âmes varie de 450 mm pour les voussoirs sur piles à 300 mm pour les voussoirs courants. La précontrainte du tablier est réalisée à l'aide d'unités 19T15 ou 12T15. Des gaines supplémentaires sont également prévues comme précontrainte additionnelle dans la vie future des ouvrages. La précontrainte est mixte : extérieure et intérieure.

À noter que les joints sont encollés à la résine époxy et qu'une étanchéité générale a été mise œuvre sur le tablier. La longueur des voussoirs varie de 2.2m à 2.6m et leur poids de 35 à 50 tonnes. Les joints de dilatation comportent une plaque en acier fixée d'un côté et se déplaçant sur Téflon et évitant la chute du ballast.

Les viaducs avec voussoirs coulés en place

a) Appuis

Les piles courantes sont elliptiques, de dimension 7mx3,5m à 7mx5m . Leur hauteur varie de 3m à 14m. Leur construction se fait par levées de 3m.

Le tracé des viaducs étant très biais par rapport au tracé de l'autoroute franchie, le grand axe des ellipses est quasiment parallèle à l'axe longitudinal du tablier.

10 des 12 chevêtres courants ont une section particulière (Photo 7). Les deux autres chevêtres ont une section elliptique s'inscrivant dans la continuité de la pile.



Chaque pile comporte deux appareils d'appui à pot. L'un est bloqué transversalement, l'autre est libre. Tous les appuis sont libres de glisser dans le sens longitudinal du pont, hormis pour les piles centrales P78 et P8 qui sont les points fixes de chacun des deux ouvrages.

Note that the joints are glued with epoxy resin and a general sealing has been installed on the deck. The length of the segments varies from 2.2m to 2.6m and the weight of 35-50 tons. Expansion joints are a steel plate attached to one side and moving on Teflon on the other side to avoid the ballast fall.

Cast in situ segments viaducts

a) Supports

Current piers are elliptical, with dimensions 7mx3.5m to 7mx5m. Their height varies from 3m to 14m. Their construction is done by pouring 3m.

Viaducts alignment is very bias to the highway below, so the main axis of the ellipse is almost parallel to the longitudinal axis of the deck.

10 of the 12 current top piers have a special section (Photo 7). The other two pier heads have an elliptical section as the pier.

**Photo 7 : Piles des viaducs coulés en place/
Piers of cast in situ segments viaducts.**

Each pier has two pot bearings. One transversely blocked, the other is free. All supports are free to slide in the longitudinal direction of the bridge, except for piers P78 and P8 which are the fixed points of the two structures.

Par appareil d'appui pour les piles courantes, les ordres de grandeurs des charges sont les suivants :

- Efforts verticaux : 3600 tonnes
- Efforts longitudinaux : 350 tonnes (appui fixe seulement)
- Efforts transversaux : 300 tonnes

Les appareils d'appui à pot sont de dimensions maximales 1500*1720mm.

Des vérins sont prévus de part et d'autre des appareils d'appui pour permettre le changement éventuel de ces appareils.

b) Tablier

Caractéristiques générales

Les viaducs de Jean Avenue et John Vorster sont très similaires du point de vu des tabliers : nombre de travées similaire, formes architecturales identiques. Ils sont constitués de 6 travées pour une longueur totale de plus de 1km. (Photo 8)

Loads per bearing for current pier are about:

- *Vertical forces: 3,600 tons*
- *Longitudinal forces: 350 tons (fixed bearing only)*
- *Transversal forces: 300 tons*

*The pot bearings are maximum dimensions 1500*1720mm. Jacks are provided on either side of the bearings in order to change these devices.*

b) Deck

Main characteristics

Viaducts Jean Avenue and John Vorster are very similar from the point of view of decks: similar number of spans, the same architectural forms. They have 6 spans for a total length of about 1km. (Photo 8)

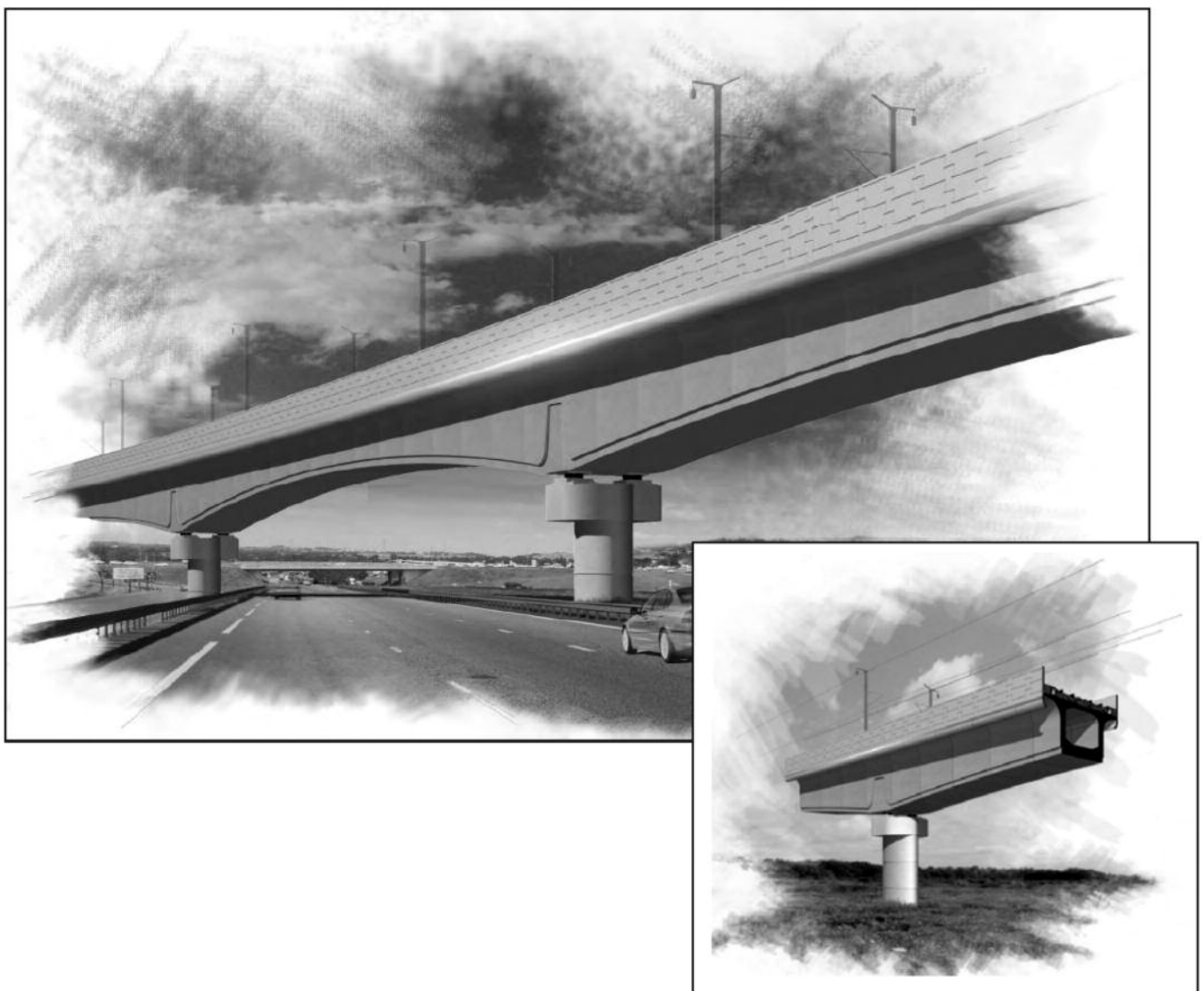


Photo 8 : Vue architecturale de Jean Avenue / Architectural view of Jean Avenue viaduct.

Le viaduc de Jean Avenue est en alignement droit et celui de John Vorster présente une courbe en plan de 1172 m de rayon.

Les tabliers ont une largeur constante de 10,75m et une hauteur variable de 3,5 à 7,5m pour le viaduc de Jean Avenue et de 3,5 à 6.2m pour le viaduc de John Vorster.

Le viaduc de Jean Avenue est composé de 151 voussoirs courants, de 2 voussoirs sur culée de 3.4 m de long, et de 5 voussoirs sur pile de 9 m de long. Celui de John Vorster est composé de 126 voussoirs courants, de 2 voussoirs sur culée de 3.5 m de long, et de 5 voussoirs sur pile de 9 m de long.

Le câblage suit la technologie de la précontrainte mixte, c'est-à-dire comprenant à la fois des câbles intérieurs et extérieurs au béton.

On distingue 3 familles de câbles (**Figure 11**) :

- Les câbles de fléau, intérieurs, nécessaires à l'assemblage des voussoirs successifs ; ils sont constitués d'unités 19T15 super. Une paire de gaines vides avec ancrages 19T15 est prévue sur chaque fléau à titre de précontrainte complémentaire.
- Les câbles éclisse intérieurs, qui solidarissent entre eux les fléaux; ils sont également constitués d'unités 19T15 super. Une paire de gaines vides avec ancrages 19T15 est prévue au niveau de chaque clavage à titre de précontrainte complémentaire.
- Les câbles extérieurs, qui règnent sur deux travées, sont ancrés sur les voussoirs sur pile et sont déviés au niveau des voussoirs déviateurs (2 par travée). Ils sont constitués d'unités 37T15 super. Ces câbles sont démontables et remplaçables. Une paire de câbles extérieurs de 37T15 est prévue à titre de précontrainte additionnelle.

Méthodes de calcul

Modèle global PONT

L'étude de la flexion longitudinale en service comme en phases de construction est effectuée au moyen du logiciel PONT, développé par la direction scientifique de Bouygues TP. Ce logiciel permet la prise en compte de l'historique construction en intégrant le calcul scientifique des pertes de précontrainte différées et la redistribution des efforts internes à la structure. Le tablier est représenté par un modèle filaire spatial. Ce modèle sert également de base au réglage géométrique.

Modèle de flexion transversale

L'étude de la flexion transversale des voussoirs courants est menée à partir de modèles cadre en 2D. Les sections aciers de flexion transversale sont ensuite cumulées aux sections issues de la justification sous effort tranchant / torsion longitudinaux, ainsi qu'aux aciers de diffusion. Le cumul se fait selon les règles de l'EC2 complété par les recommandations du SETRA.

Modèles de voussoirs spéciaux

Les voussoirs spéciaux tels que les voussoirs sur pile et les voussoirs sur culée ont fait l'objet de modélisation 3D aux éléments finis sous ANSYS, permettant de s'assurer de l'intégration correcte de l'ensemble des phénomènes agis-

Jean Avenue viaduct is straight and John Vorster has a plan radius of 1172 m.

Decks have a constant width of 10.75 m and a height varying from 3.5 to 7.5 m for the Jean Avenue viaduct and 3.5 to 6.2m for the John Vorster viaduct.

Jean Avenue viaduct has 151 current segments, 2 segments on abutments of 3.4 m long and 5 segments on piers of 9 m long. John Vorster has 126 segments, 2 segments on abutments of 3.5 m long and 5 segments on piers of 9 m long.

The prestressing is mixed with internal and external cables.

There are 3 kinds of cables (Figure 11):

- *Internal cantilever cables required for construction of successive segments, they are 19T15 units. A pair of empty ducts with anchorages 19T15 is provided at each cantilever as additional prestressing.*
- *Internal continuity cables, which secure the cantilever. They are also 19T15 units. A pair of empty ducts with anchorages 19T15 is also provided at each stitching as additional prestressing.*
- *external cables which are on two spans, are anchored to the segments on piers and are deflected at the deviators segments (2 per span). they are 37T15 units. These cables are removable and replaceable. A pair of external cables 37T15 is provided as additional prestressing.*

Calculation methods:

Global model PONT

The longitudinal bending analysis in service and during construction is performed using the inhouse software PONT, developed by the Scientific department of Bouygues TP. This software allows to take into account the construction by incorporating scientific calculation of prestressing losses and the redistribution of internal forces in the structure. The deck is modeled by beams. This model was also used for the geometry control.

Transversal analysis

The transversal analysis was carried out with 2D frames models. The transversal reinforcement was then added to the shear and longitudinal torsion reinforcement and also to the diffusion reinforcement. The summation was done according to the rules of the EC2 completed by SETRA recommendations.

Models of special segments

Special segments such as segments on piers and abutments have been modeled with 3D finite elements models in ANSYS, to ensure the proper integration of all loads acting on these highly stressed components and the results were

sant sur ces éléments fortement sollicités; les résultats ont été comparés à des modèles 2D ou à des mécanismes de bielles-tirants, permettant d'isoler les phénomènes en présence.

Calcul de confort des passagers

Un calcul de confort des passagers a été effectué. L'objectif de ce calcul est de vérifier qu'un passager à l'intérieur d'un véhicule lors de son passage sur les viaducs ne subit pas d'accélération verticale supérieure à 0.1g (en moyenne quadratique).

Le principe du calcul est le suivant:

1. Modélisation dynamique de la structure
2. Génération des modes propres
3. Génération du modèle dynamique du train
4. Génération de l'historique de chargement induit par le train pour chaque vitesse
5. Résolution du problème dynamique transitoire
6. Réponse dynamique du véhicule
7. Vérification du critère de vibration verticale pour les différentes vitesses critiques et pour différents véhicules du train,

Les vitesses étudiées sont comprises entre 50 et 200 km/h avec un pas de 5 km/h.

Le critère de confort est largement vérifié avec une moyenne quadratique de l'accélération maximale de 0.17 m/s² pour une vitesse de 200 km/h, nettement inférieure à 0.1 g = 0.98 m/s²

Câblage 3D

Le coffrage et le câblage des viaducs ont fait l'objet d'une modélisation complète 3D sous Inventor, permettant de générer directement les plans de coffrage et de câblage.

Le réglage géométrique

Le réglage géométrique est réalisé à l'aide d'un logiciel interne BOUYGUES-TP : DATUM. Ce logiciel permet le suivi du réglage géométrique qui prend en compte les contre-flèches (calculées à la mise en service suivant le phasage travaux) et les déformées de l'équipage mobile.

Principales quantités des viaducs coulés en place (Figure 9)

	Deck concrete (m3)	Rebars (t)	Rebars ratio (kg/m3)	Prestressing (t)	Prestressing ratio (kg/m3)
John Vorster Viaduct	5 808	1 229	212	304	52
Jean avenue Viaduct	6 730	1 396	207	414	62
Total	12 538	2 625	Average ratio: 209 kg/m3	718	Average ratio: 57 kg/m3

Fig. 9 : Quantités des viaducs coulés en place / Main quantities for cast in situ viaducts.

compared to easier 2D models or mechanisms of struts and ties.

Calculation of passenger comfort

A calculation of passenger comfort was carried out. The purpose of this calculation is to check a passenger inside a vehicle during its passage over the viaducts suffers no more than 0.1g vertical acceleration.

The principle of this calculation is as follows:

1. Dynamic modeling of the structure
2. Generation of eigenmodes
3. Generation of the dynamic model of the train
4. Generating historical load induced by each train speed
5. Resolution of the transient dynamic problem
6. Dynamic response of the vehicle
7. Criterion verification for different vertical vibration and critical speeds for different wagons of the train, Speeds studied are between 50 and 200 km /h with increments of 5 km/h.

The comfort criterion is widely checked with a root mean square of the maximum acceleration of 0.17 m/s² for a speed of 200 km /h, significantly less than 0.1g = 0.98 m /s²

3D prestressing

The formwork and the prestressing of viaducts have been done with 3D models with software Inventor in order to directly generate formwork and prestressing drawings.

The geometry control

The geometry control is performed using an internal software-Bouygues TP: DATUM. This software allows the monitoring of the geometry that takes into account precambers (calculated at the commissioning and following the construction stages) and the deflections of the formwork traveler.

Main quantities for cast in situ viaducts (Figure 9)

5. MÉTHODES DE CONSTRUCTION

a. Viaducs à voussoirs préfabriqués

Les viaducs à voussoirs préfabriqués sont construits en utilisant des lanceurs dits « par dessous ».

2 types de lanceurs sont utilisés : 1 avec des poutres porteuses latérales triangulées à treillis (type T1, photo 10), le deuxième avec des poutres latérales à âme pleines (type T2, photo 11).

Les lanceurs de type T1 et T2 ont été conçus pour poser des travées de 50m et 44m respectivement. Étudiés à Singapour et construits en Chine ces deux cintres mesurent 105m et 118m respectivement et pèsent approximativement 400 tonnes chacun.



Photo 10 : Lanceur type T1/ Launcher T1.

b. Viaducs à voussoirs coulés en place

L'équipage mobile

2x2 équipages par viaduc ont été spécialement conçus pour ce projet.

Le bureau des méthodes de BOUYGUES-TP a réalisé le cahier des charges ainsi que les plans de définition de l'équipage mobile. L'étude détaillée et les plans de fabrication ont été réalisés par l'Entreprise Thaïlandaise SMS qui a construit les 8 équipages mobiles. Les équipages ont été acheminés en Afrique du Sud par bateau cargo.

Les équipages ont été conçus pour reprendre le poids du voussoir le plus lourd soit 122 tonnes. Le poids de l'équipage mobile est de 70 tonnes. (Photo 12)



Photo 12 : Equipage mobile / Form traveller.

5. METHODS OF CONSTRUCTION

a. Precast segments viaducts

The precast segments viaducts are built using "from below" launching girders.

Two types of launchers are used: one with lateral truss beam (type T1, photo 10), the second with full webs beams (type T2, photo 11).

Launchers T1 and T2 type were designed for spans of 50m and 44m respectively. Studied in Singapore and built in China, these two launchers measure 105m and 118m respectively and weigh approximately 400 tons each.



Photo 11 : Lanceur type T2/ Launcher T2.

b. Cast in situ segments viaducts

The formwork traveler

2x2 form travelers by bridge have been specifically designed for this project.

Bouygues TP method department produced the specifications and drawings about form traveler. The detailed design and manufacturing drawings were made by the Company SMS in Thailand who built the eight form travelers. Form travelers were sent to South Africa by cargo ship.

They have been designed to take the weight of the heaviest segment 122 tons. The weight of the form traveler is 70 tons. (Photo 12)



L'équipage mobile permet également le clavage des fléaux. Il est constitué de deux poutres treillis longitudinales extérieures au caisson du tablier et situées sous les encorbellements. Ces poutres assurent le maintien du coffrage extérieur et intérieur du voussoir. L'équipage est brêlé au tablier à l'aide de 4 tiges de précontrainte par poutre treillis, développant un effort de 50 tonnes dans les encorbellements du caisson.

Le déplacement de l'équipage mobile est réalisé grâce à des roulettes de part et d'autre du voussoir.

Le principe de stabilité de fleau

Un système mixte a été choisi pour assurer la stabilité du fléau. En effet un clouage sur pile ainsi que l'utilisation de palées provisoires assurent la stabilité d'ensemble du fléau. Le tablier est coulé sur appuis définitifs (appareils d'appuis à pot mono ou bi- directionnel)

La réaction verticale du poids propre du fléau est reprise par les appuis définitifs et le déséquilibre du fléau par les palées provisoires. Chaque palée est constituée d'un fut béton de diamètre 1500mm et d'une partie métallique sur laquelle repose un vérin hydraulique. Un suivi des réactions aux vérins permettent de vérifier la bonne répartition des charges et d'ajuster si nécessaire les efforts dans les vérins. La charge maxi par palée peut atteindre 1200 tonnes dans le cas de déséquilibre le plus défavorable.

Les critères de stabilité pris en compte et définis dans le guide du SETRA sur les ponts en encorbellements sont les suivants :

- Déséquilibre d'un voussoir
- Chute d'un équipage mobile

Cinématique de construction

Les câbles de fléau sont des unités 2x19T15 et ils sont tendus à l'avancement.

L'ordre de clavage des fléaux est tributaire du phasage d'utilisation des équipages mobiles et ne suit pas une séquence logique. Par exemple sur Jean Avenue, le premier clavage prévu est entre la pile P6 et P7 puis entre la culée A5 et P6. Seule la moitié des câbles de précontrainte de continuité (19T15) sont tendus après clavage. Les câbles extérieurs 37T15 sont prévus pouvant être tendus soit pendant la construction soit après la construction complète du tablier.

6. CONCLUSION

L'utilisation de ces différentes techniques de construction nous a permis de réaliser plus de 10 kilomètres de viaducs dans les meilleures conditions de qualité et de délai et dans un environnement africain très spécifique.

Aujourd'hui l'ensemble de la ligne est en service avec un très bon niveau de fiabilité.

The form traveller can also build the stitch between cantilevers.

It consists of two longitudinal outer lattice beams under the external top slab. These beams provide the bearing of external and internal formworks. The form traveller is attached to the deck with four prestressed bars with a total effort of 50 tons per beam.

The displacement of the form traveller is done with wheels on either side of the segment.

The cantilever stability

A mixed system was chosen to ensure the stability of the cantilever. Indeed nailing and the use of temporary props ensure the stability of the cantilever.

The deck is cast on definitive bearings (bearings with single or bi-directional free directions)

The vertical reaction of the weight of the cantilever is born by definitive bearings and the unbalance of the cantilever by temporary props. Each prop is constituted by a concrete tube diameter 1500 mm and a metal part at the top with hydraulic jacks. Each jack is monitored to verify the correct load distribution and adjust if necessary. The maximum load on prop is about 1200 Tons (unbalance case).

The stability criteria considered and defined in the SETRA guide on cantilevers bridges are:

- *One segment unbalanced*
- *Form traveler fall*

Construction stages

Cantilever cables are 2x19T15 units and they were tensioned at the advancement.

The order of cantilever stitching depends on the phasing of form traveler and does not follow a logical sequence. For example on Jean Avenue, the first stitch was between P6 and P7 and after between P6 and abutment A5. Only half of the continuity cables (19T15) are tensioned after stitching. The 37T15 external cables are provided to be tensioned during construction or after the complete construction of the deck.

6. CONCLUSION

These different construction techniques allowed us to achieve more than 10 kilometers of viaducts in the best conditions and quality of time and in a very specific African environment.

Today all the railway lines are open with a very high level of fiability.