

LE PONT HASSAN II SUR L'OUED BOUREGREG A RABAT

THE HASSAN II BRIDGE OVER THE RIVER BOUREGREG IN RABAT

Michel Duviard

Egis JMI Paris

Benjamin Lusk

Egis JMI Bangkok

Arnold Ledan

Egis JMI Paris



1. SITUATION

Au Maroc, de part et d'autre de l'embouchure de l'oued Bouregreg, les villes de Rabat et de Salé se regardent. Sous l'impulsion du Roi, sa Majesté Mohamed VI, les deux villes font partie d'un vaste projet de rapprochement et de développement mettant en œuvre un chantier de très grande ampleur, l'aménagement de la Vallée du Bouregreg, projet global des urbanistes Bernard Reichen et Philippe Robert.

Cet ensemble est situé au pied des deux monuments symboles de la ville de Rabat qui dominent toute la vallée en rive gauche de l'oued : la Tour Hassan qui est devenue l'emblème et la fierté des Rabati, et le Mausolée Mohammed V, hautement symbolique pour le peuple marocain.

La présence de ces deux symboles a été un élément fort de la réflexion de l'Architecte Marc Mimram. Le pont devait être exceptionnel tout en respectant ces monuments tutélaires.

2. FRANCHISSEMENT

Le pont Hassan II est l'objet principal du marché de construction signé par la société marocaine SGTM avec l'Agence d'Aménagement de la Vallée du Bouregreg.

D'une longueur de 330 m, il est divisé en dix travées dont les longueurs sont les suivantes : 21 m, 26 m, 26 m, 31 m, 36 m, 76 m, 36 m, 31 m, 26 m, 21 m.

Il est composé de trois tabliers parallèles (figure 1) sur la majeure partie de la longueur de l'ouvrage.

1. BRIDGE LOCATION

In Morocco, on both sides of the mouth of the river Bouregreg, the cities of Rabat and Salé look each other. Under the leadership of the King, His Majesty Mohammed VI, the two cities are part of a larger project of merger and development by implementing a very large building site, the development of the Bouregreg Valley, global project of town planners Bernard Reichen and Philippe Robert.

The bridge is located at the foot of the monuments symbols of the city of Rabat overlooking the valley on the left bank of the river: the Hassan Tower which has become the emblem and pride of Rabati, and the Mausoleum of Mohammed V, highly symbolic for the Moroccan people.

The presence of these symbols has been a strong element of Architect Marc Mimram thinking about. The bridge had to be exceptional while respecting the tutelary monuments.

2. CROSSING

The Hassan II bridge is the main purpose of the construction contract signed by Moroccan society SGTM with the Development Agency of Bouregreg Valley.

With a length of 330 m, it is divided into ten spans whose lengths are as follows: 21 m, 26 m, 26 m, 31 m, 36 m, 76 m, 36 m, 31 m, 26 m, 21 m.

It consists of three parallel decks (figure 1) over most of the length of the item. Both upstream decks are road decks and each carry three lanes 3 m wide.

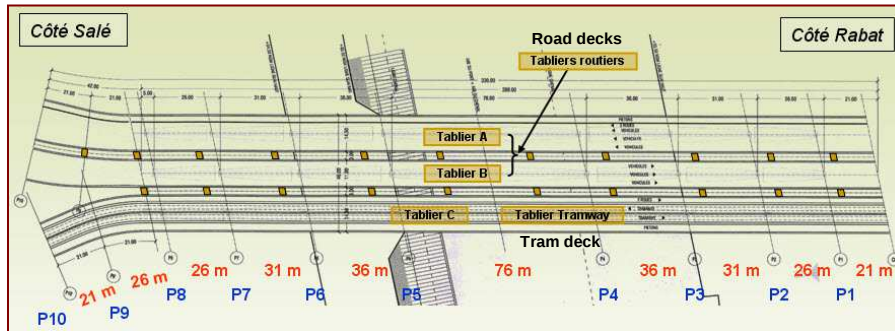


Fig. 1. Vue en plan générale / General plan view

Les deux tabliers amont sont routiers et portent chacun trois voies de circulation de 3 m de largeur. Le tablier aval est dédié au tramway qui relie Salé à Rabat et porte deux voies ferrées sur une plate-forme dédiée de 7 m de largeur.

En outre les tabliers A et C proposent chacun un trottoir et un cheminement pour les 2 roues.

Chaque tablier est composé d'un caisson à deux alvéoles en béton précontraint, axé sur un plan vertical. La stabilité d'ensemble est assurée par des entretoises de liaison (figure 2).

La plate-forme ainsi obtenue a une largeur totale de 40 m.

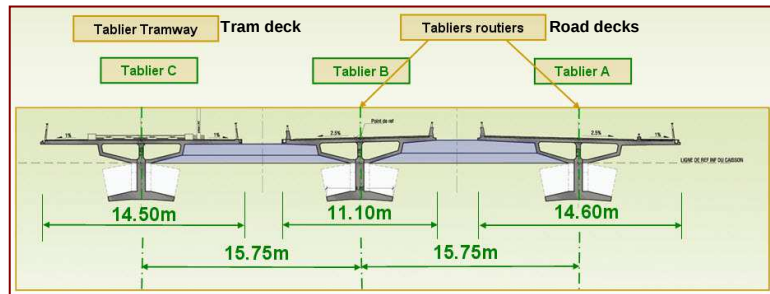


Fig. 2. Coupe transversale générale / General cross section

Each deck is composed of a prestressed concrete box girder with two compartments, based on a vertical plane. The overall stability is ensured by connecting cross beams (figure 2).

The platform thus obtained is 40 m wide.

3. MISSION D'EGIS JMI

La mission d'Egis JMI a été de réaliser la mise au point des études de conception et les études d'exécution de l'ouvrage. Pour le calcul de la structure deux logiciels principaux ont été utilisés : ST1 et Esa Prima Win.

En ce qui concerne le dessin, une modélisation spatiale de la structure a été réalisée. Cette vision précise et détaillée en 3D, incluant tous les ancrages et câbles de précontrainte, a été, compte tenu de la complexité de la géométrie de la structure, la condition sine qua non pour une conception maîtrisée. Elle a également permis de fiabiliser la production des plans d'exécution, puisque ceux-ci sont produits par exploitation directe de la maquette volumique.

4. SOL ET SEISME

La stratigraphie du site de l'ouvrage est la suivante : des remblais récents, des argiles vasardes ou des vases moles sableuses, des sables argileux vasards et enfin des sables fins compacts. Ces terrains ne sont pas liquéfiables sous l'action du séisme. Pour un ouvrage appartenant à la classe D (intégrité primordiale

3. MISSION OF EGIS JMI

The Egis JMI mission was to achieve the development of the structure preliminary design, and realize the final design studies. For the structure calculations, two main softwares were used: ST1 and Esa Prima Win.

As regards the final drawings, a spatial structure modeling was performed. This detailed and accurate 3D vision, including all prestressing anchors and tendons, was, given the complexity of the structure geometry, the sine qua non for a controlled design. It also permits the production of reliable performance final drawings, since they are produced by direct use of the volume model.

4. SOIL AND SEISMIC DATA

The stratigraphy of the bridge site is the following: recent backfills, silty clay or sandy soft silts, silty clayey sands and finally dense fine sands. These formations are not liquefiable under the action of earthquake. For a structure belonging to the class D (essential integrity for maintaining of traffic), the earthquake to be considered is characterized by a

pour le maintien des circulations), le séisme à prendre en compte est caractérisé par une période de retour de 975 ans et un spectre élastique pondéré correspondant à une accélération maximale de 0,16 g.

Les efforts auxquels l'ouvrage est soumis ont été calculés par analyse multimodale classique, en prenant en considération les 85 premiers modes propres. Sous l'action du séisme, les piles P5, qui constituent le point fixe de l'ouvrage dans le sens longitudinal sont soumises à des efforts de l'ordre de 4 500 kN pour une fréquence de 0,53Hz, soit une accélération de 0,5 m/s².

return period of 975 years and a weighted elastic spectrum corresponding to a maximum acceleration of 0.16 g.

Efforts, to which the work is submitted, were calculated by conventional multimodal analysis, taking into account the first 85 eigenmodes. Under the action of earthquake, P5 piers, which are the fixed point of the structure in the longitudinal direction, are subjected to forces of about 4,500 kN at a frequency of 0.53 Hz, i.e. an acceleration of 0.5 m/s².

5. PILES ET FONDATIONS

La totalité des 11 lignes d'appui portant l'ouvrage, soit 33 piles, repose sur des fondations profondes constituées de pieux forés Ø 1200 mm (figure 3).

Les piles ont fait l'objet d'une recherche esthétique très sophistiquée. Le coffrage de la pile comporte ainsi 8 faces non planes, dont les intersections par paires constituent les arrêtes du fût. De même, les appareils d'appui à pot d'élastomère sont dissimulés par des caches qui sont amovibles pour permettre de disposer d'assez d'espace pour implanter des dispositifs de vérinage.

5. PIERS AND FOUNDATIONS

The whole of the 11 lines of the bridge supports, i.e. 33 piers, is based on deep foundations consisting of bored Ø 1200 mm piles (figure 3).

The pier formwork is the result of a very sophisticated aesthetic research. So, this pier formwork has 8 faces which are not plane. These face intersections by pairs are the edges of the pier shaft. Similarly, elastomer pot bearings are hidden by covers, that are removable, to allow to have enough space to put jacking devices on pier heads.



Fig. 3. Coupe longitudinale générale / General longitudinal section

6. STRUCTURE DE L'OUVRAGE

Chaque tablier avec ses bracons, correspond à un squelette sur lequel le caisson correspondant sera mis en place. Ce squelette comprend : les palmes qui sont préfabriquées, les béquilles, les âmes centrales et les nœuds qui sont coulés en place ; les nœuds réalisent la jonction des éléments précédents et constituent les entretoises des caissons (figures 4 et 5).

La préfabrication a été également une exigence de l'Architecte pour le tablier, découpé en demi-voussoirs, venant encadrer l'âme centrale.

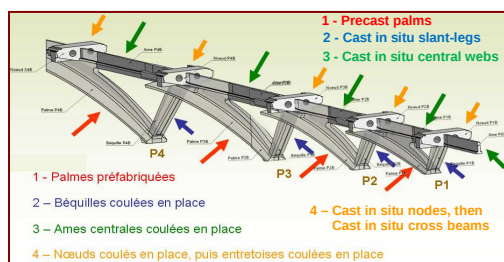


Fig. 4. Maquette numérique du squelette de la structure / Structural skeleton model

6. BRIDGE STRUCTURE

Each of the 3 decks, with its braces, palms and slant-legs, is a skeleton on which the box constituting the deck will be put in place. This skeleton includes palms that are prefabricated, slant-legs, central webs and nodes that are cast in place; the nodes perform the junction of the foregoing and constitute the box girder diaphragms (figures 4 and 5).

Precasting was also a requirement of the Architect for the deck, cut into half segments, to be placed on each side of the central web.



Fig. 5. Squelette de la structure sur chantier / Structural skeleton on site

7. PALMES ET BÉQUILLES

Les 24 palmes de l'ouvrage, constituées d'un béton B65 à fumée de silice blanche, comme tout le reste de la structure, ont une longueur qui varie de 24,6 m à 31,7 m et un poids allant de 150 t à 260 t (figure 6).

Les six palmes principales, sur P4 et P5 sont dotées en pied de 6 ancrages 19T15 de précontrainte intérieure ; les 6 palmes suivantes sur P3 et P6 sont équipées d'un ancrage 31T15. Pour fabriquer la grande arche de l'ouvrage il faut placer entre les 2 palmes principales une palme centrale de 13,5 m de longueur et pesant 101 t (figure 7).

Les béquilles en béton armé sont coulées en place entre le pied d'une palme et la palme suivante (figure 8).

7. PALMS AND SLANT-LEGS

The 24 palms of the structure, composed of B65 concrete with white silica fume, as the whole structure, have a length ranging from 24.6 m to 31.7 m, and a weight from 150 t to 260 t (Figure 6).

The six main palms P4 and P5 are provided at the bottom with 6 anchors 19T15 for internal prestressing, the following six palms on P3 and P6 are equipped with an anchor 31T15. To make the great arch of the bridge, palms 13.5 m in length and weighing 101 tons should be placed between the two main central palms (figure 7).

The slant-legs are made of reinforced concrete cast in place between the foot of a palm and the next one (figure 8).



Fig. 6. Les 6 palmes principales au stock / The 6 main palms in stock



Fig. 7. Les 3 palmes de l'arche centrale / Central arch 3 palms



Fig. 8. Ferrailage d'une béquille / Slant-leg reinforcement

8. ÂMES, NOEUDS ET ENTRETOISES

Les âmes centrales sont coulées en place en prolongement des âmes des palmes. Les nœuds achèvent de constituer le squelette de la structure. Ils sont percés de trous d'homme pour permettre une circulation dans les caissons. Ils servent aussi de déviateur à la précontrainte extérieure au béton passant dans les alvéoles, et de bloc d'ancrage pour cette précontrainte (figures 9 et 10).

Désolidarisées des encorbellements des caissons, les entretoises sont coulées en place (figure 11).

8. WEBS, NODES AND CROSS BEAMS

Central webs are cast in place in line with the palm webs. The nodes form the complete structure skeleton. They are pierced by manholes to permit circulation in the box girder. They also serve as deviator for external prestressing tendons inside the box girder cells, and as anchor block for these tendons (figures 9 and 10).

Cross beams are cast in situ; they are dissociated from the box girder cantilevers (figure 11).



Fig. 9. Une entretoise liant 2 nœuds /
2 nodes linked by a cross beam



Fig. 10. Un nœud / A node



Fig. 11. Les entretoises /
Cross beams

9. TABLIERS

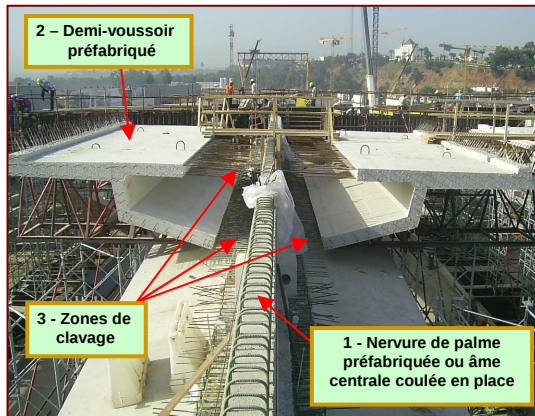


Fig. 12. Demi-voussoirs avant clavage /
Half segment before closure

D'une longueur variant de 5,05 m à 10,16 m, 150 demi-voussoirs courants ont été fabriqués. Ces demi-voussoirs sont solidarisés à l'âme centrale par bétonnage en place des 2 clavages inférieurs et du clavage supérieur (figure 12) et entre eux par clavage longitudinal.

Pour assurer un rendu architectural uniforme, les 60 éléments de parement extérieur des nœuds ont été également préfabriqués (figure 13).

Entre les piles P8, et les piles P10 et T10, les 3 tabliers sont courbes et leurs formes très complexes ; en particulier certaines surfaces sont gauches (figure 14). L'ensemble des 6 travées a donc été bétonné en place, sur cintre général (figure 15).

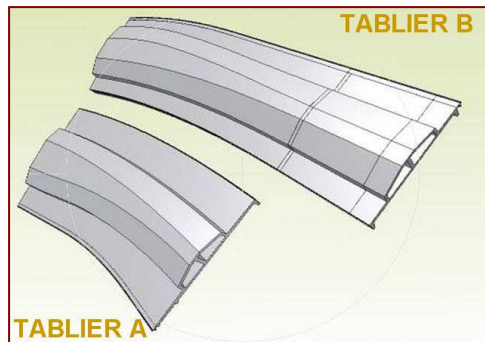


Fig. 14. Géométrie complexe des coffrages /
Formwork complex geometry



Fig. 13. Parements préfabriqués des nœuds centraux /
Precast facings of central nodes

With a length ranging from 5.05 m to 10.16 m, 150 standard half-segments were manufactured. These half-segments are linked to the central web by concrete pouring in place both lower closures and upper closure (figure 12) and to each other by longitudinal closure.

To ensure a uniform architectural appearance, 60 elements forming node external facings were also precast (figure 13).

Between P8 piers, and P10 and T10 piers, the 3 decks are curved and have a very complex formwork; particularly some surfaces are not plane (figure 14). The corresponding six spans have been concreted in situ, using a general scaffolding (figure 15).

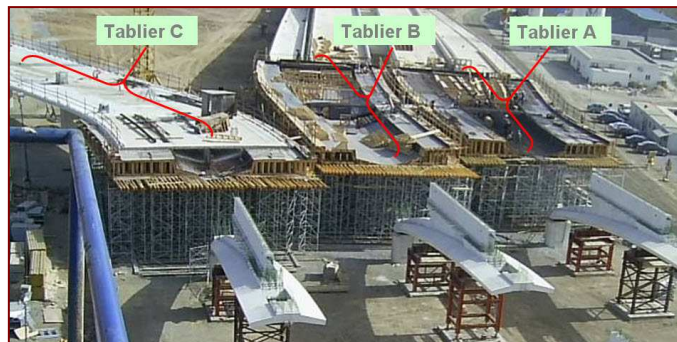


Fig. 15. Six travées d'extrémité bétonnées sur cintre /
Six end spans concreted using scaffolding

10. PRÉCONTRAINTE DE LA STRUCTURE

Chaque tablier est précontraint par deux familles de câbles :

- Des câbles noyés dans le béton :
 - o allant du pied de palme P4 au pied de palme P5, soit 6 unités 19T15, et du pied de palme P3 au pied de palme P6, soit 1 unité 31T15,
 - o régnant uniquement dans le tablier : unités 7T15, 13T15, 19T15 et 31T15.
- Des câbles 31T15 extérieurs au béton, hormis les zones d'ancrage et de déviation, mis en œuvre dans les alvéoles du caisson.

La modélisation en 3D de tous les câbles a permis la maîtrise des conflits potentiels et des diverses interactions (figures 16 et 17).

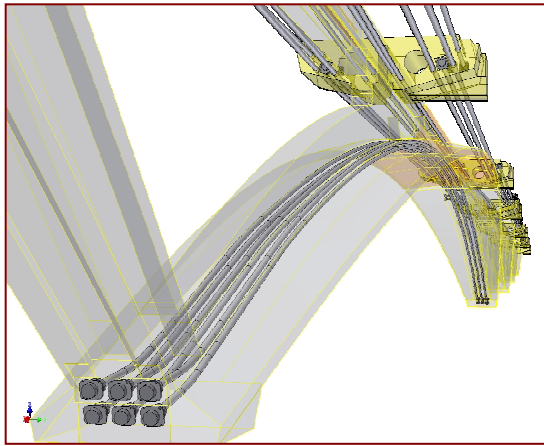


Fig. 16. Palmes principales, câbles 19T15 / Main palms, tendons 19T15

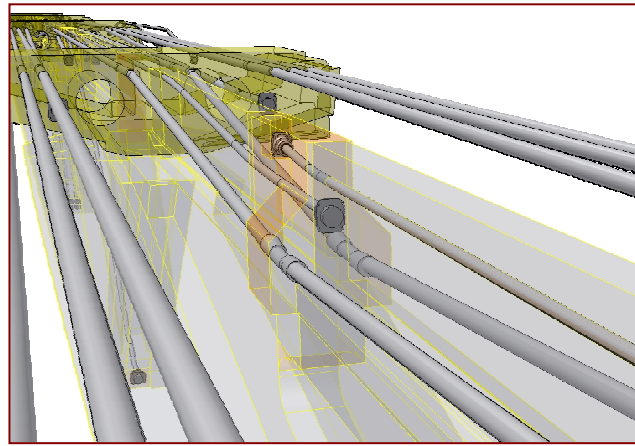


Fig. 17. Câbles intérieurs et extérieurs du tablier / Internal and external deck tendons

Seul le tablier A, avec ses longs encorbellements, a nécessité la mise en œuvre de précontrainte transversale : un 4T15 tous les 60 cm (figure 18).

Ponctuellement, au niveau de chacun des nœuds 4 et 5 des tabliers B et C, 16 câbles 4T15 ont été tendus entre les rives de la dalle supérieure pour améliorer l'état de contrainte dû à la diffusion des efforts dans l'ouvrage.

Only the deck A, with its long cantilevers, has required the implementation of transverse prestressing: 1 cable 4T15 every 60 cm (figure 18).

In limited way, at each node 4 and 5 of decks B and C, 16 cables type 4T15 were stressed transversely between the two sides of the upper slab to improve the state of stress due to the diffusion of efforts.

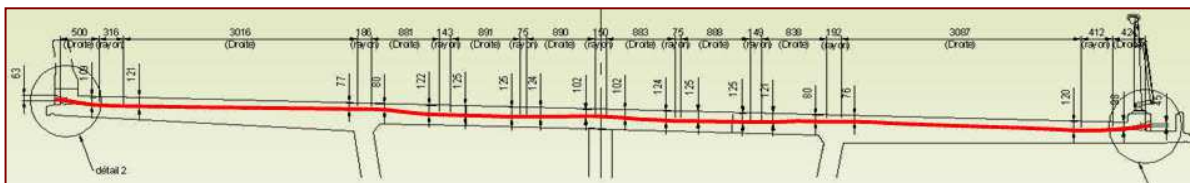


Fig. 18. Câbles transversaux 4T15 du tablier A / Transverse 4T15 tendon of deck A

11. LES COURANTS VAGABONDS

11.1. Position du problème

Le tablier C du pont porte deux voies ferrées de tramway. Les rames sont alimentées en courant continu par les caténaires qui constitue le pôle + du circuit. Le courant retourne à la sous-station d'alimentation par les rails qui constituent le pôle - du circuit. Mais le courant peut utiliser tout conducteur métallique pour retourner à la sous-station. C'est cette part de courant que l'on appelle les courants vagabonds (figure 19).

Des mesures de protection passive ont été mises en œuvre dans la conception des voies pour limiter ces courants de retour par le sol. Mais l'expérience sur d'autres tramways a montré qu'il subsiste, en dépit des mesures prises, une fuite qui peut être comprise entre 1 et 10% des courants nominaux.

Les courants vagabonds peuvent circuler dans la structure par l'intermédiaire des conducteurs qui y sont présents : aciers passifs et câbles de précontrainte. Dans le cas où ces circuits secondaires présentent des interruptions de conductivité, il se crée, là où les pertes se produisent dans le circuit, des zones de corrosion. Dans une structure comme le pont Hassan II, ces zones sont multiples. Les pertes d'acier par corrosion électrique se compteraient en tonnes.

Il convient donc d'offrir à ces pertes de courant un circuit homogène et continu qui permette de les reconduire vers la sous-station. De plus on traitera tous les points potentiels d'ouverture du circuit pour éviter toute corrosion ponctuelle.

11.2. Dispositions prises

Aciers passifs

Les zones courantes du tablier C, seul concerné, sont équipées d'un circuit préférentiel de circulation des courants vagabonds, d'une extrémité du tablier à l'autre. A partir du pied de chaque palme et béquille, le même type de circuit est établi jusqu'au tablier. Enfin le même type de dispositif est mis en place dans les appuis depuis les pieux jusqu'aux têtes de piles.

Une rupture de continuité a lieu au sommet de chaque pile et culée ; elle est traitée par un shunt qui les relie aux palmes et béquilles, ou au tablier.

Le circuit préférentiel pour les courants vagabonds est constitué de plats en acier de 25 mm de large sur 3 mm d'épaisseur. Chaque pièce en béton est équipée d'éléments filants longitudinaux dont la position est choisie en fonction de la forme de la section transversale, et des cadres transversaux reliant les précédents selon un pas longitudinal d'environ 4 m (figure 20).

11. STRAY CURRENTS

11.1. State of the problem

The deck C of the bridge carries two tram tracks. The trains are powered by DC catenary, the + pole of the circuit. Current returns to the power sub-station by the rails which constitute the pole - of the circuit. But current can use any metal conductor to return to the substation. This is the part of current commonly called stray currents (figure 19).

Passive protection measures have been implemented in the design of tracks to limit the return currents by the ground. But the experience of other trams showed it remains, despite the measures taken, a leak that can be estimated between 1 and 10% of nominal current.

Stray currents can flow into the structure through the conductors which are present: reinforcing steel and prestressing tendons. In the case where these secondary circuits have conductivity interruptions, it created, where losses occur in the circuit, areas of corrosion. In a structure like Hassan II bridge these areas are numerous. Losses of steel due to electric corrosion would be counted in several tons.

It is therefore necessary to provide these current losses with homogeneous and continuous circuit that allows them to go back to the substation. Moreover, all potential points of opening the circuit will be treated to avoid localized corrosion.

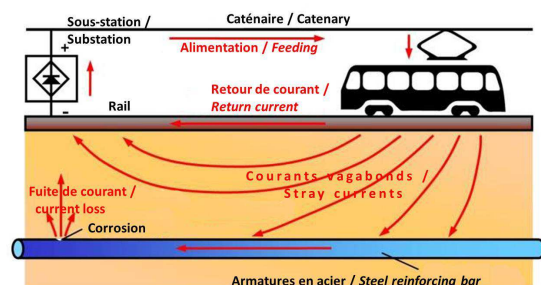


Fig. 19. Courants vagabonds / Stray currents

11.2. Implemented provisions

Passive steel components

The standard parts of the deck C, only concerned, are equipped with a preferential flow path for stray currents from one end of the deck to the other. From the foot of each palm and slant-leg, the same type of circuit is established to the deck. Finally, the same type of device is placed in the support from the piles to the heads of piers.

The discontinuity that occurs at the top of each pier and abutment is treated by a shunt that connects the piers and abutments to palms and slant-legs, or to the deck.

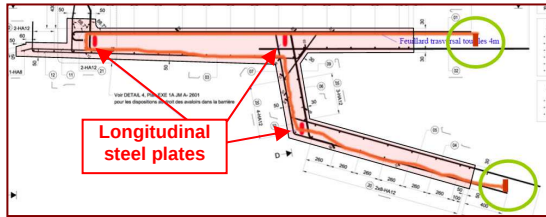


Fig. 20. Circuit préférentiel / Preferential circuit

Les fondations des piles P3, P4 et P5 sont des pieux chemisés en contact avec un milieu agressif, qui présentent une grande surface métallique dans un milieu peu résistant électriquement. L'effet de pile géologique en résultant est traité grâce à des anodes sacrificielles en zinc qui passivent localement l'acier.

Câbles de précontrainte

La protection des câbles de précontrainte du tablier C consiste à isoler chaque câble et ses deux ancrages du reste de la structure.

En partie courante, la gaine en feuillard est remplacée par une gaine en PEHD de taille similaire, pour toutes les parties du câble où le tracé est rectiligne ou présente de faibles déviations. Quand le rayon de courbure du câble est faible, on préfère utiliser un tube en PEHD classique, plus épais, pour éviter les blessures du gainage. Des manchons thermo-rétractables permettent l'assemblage de ces deux composants.

Sur chaque appui de la gaine une protection plastique est mise en œuvre pour éviter toute blessure. Toutes les ligatures sont faites en matériau synthétique (figure 21).



Fig. 21. Protection des gaines PEHD / HDPE sheath protection

En outre, la gaine PEHD qui arrive au voisinage de l'ancrage est reliée à la trompette en polyuréthane par manchon thermo-rétractable, lui-même isolant.

L'extrémité de la trompette vient reposer sur une plaque circulaire placée sur la surface spécialement usinée de la tromplate. Cette plaque, est faite en matériau de haute résistance mécanique et de haute isolation électrique ; elle reçoit le bloc d'ancrage (figure 22).

Après mise en tension du câble et recépage, un capot en polyuréthane vient protéger l'ancrage. Il n'y a donc aucun contact conducteur entre le câble

The preferred circuit for stray currents consists of steel plates 25 mm wide and 3 mm thick. Each concrete component is provided with longitudinal elements whose position is chosen according to the shape of the cross section, and with transverse frames, linking the previous, along a longitudinal spacing of about 4 m (figure 20).

Foundations of the P3, P4 and P5 piers are lined piles in contact with an aggressive environment; they have a large metal surface in a low electrical resistance environment. The resulting effect of this geological battery will be treated specifically with sacrificial zinc anodes to obtain a steel electrochemical passivation.

Prestressing tendons

Protection of the deck C prestressing tendons consists in isolating each tendon and its two anchorages from the rest of the structure.

For standard parts, steel strip sheath is replaced by a geometrically similar sheath made of HDPE, for all parts of the cable where the line is straight or has small deviations. When the radius of curvature of the cable is low, it is preferred to use a conventional HDPE tube, thicker, to prevent injury of the sheathing. Heat shrink sleeves allow the assembly of these two components.

On each support of the sheathing, a plastic protection is implemented to avoid injury. All ligatures are made of synthetic material (figure 21).

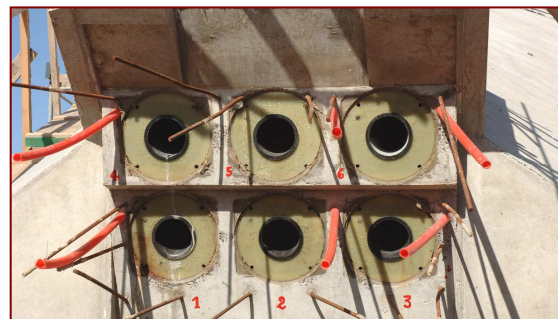


Fig. 22. Plaques d'isolation (grande palme) / Insulation circular plate (main palm).

Moreover, the HDPE sheath which reaches the vicinity of the anchorage, is connected to the polyurethane trumpet through heat shrink sleeve, made of insulating material.

The end of the trumpet rests on a circular plate placed on the specially machined surface of the trumplate. The plate is made of material of high mechanical strength and high electrical insulation; it receives the anchor block (figure 22).

After cable tensioning and cut-off, a polyurethane cap is put to protect the anchorage. There is therefore no conductive contact between the cable and the anchor block, and the rest of the structure.

et son bloc d'ancrage, et le reste de la structure.

Des précautions similaires sont également prises pour les câbles de précontrainte extérieure, dans toutes les zones où les câbles sont dans le béton.

De plus, des dispositions sont prises pour pouvoir, périodiquement pendant la vie de l'ouvrage, contrôler la protection anticorrosion en effectuant des mesures de résistance électrique sur chacun des câbles de précontrainte. Ces dispositions permettent également la mise à la terre de chaque câble en cas de défaillance de la protection.

Similar precautions are taken to protect the external prestressing tendons in all areas where cables are inside concrete.

In addition, provisions are made for being able, periodically during the life of the structure, to control corrosion protection by realization of electrical resistance measurements on each of the tendons. These provisions also allow the grounding of each cable in case of protection failure.

12. CONSTRUCTION DE L'OUVRAGE

12. BRIDGE CONSTRUCTION

12.1. Equipements principaux

12.1. Main equipments

Pont provisoire

Temporary bridge

Le choix a été fait de construire un pont provisoire. Ce pont est fondé sur pieux métalliques vibrofoncés munis de chevêtres (figure 23). Une fois les fermes maîtresses et secondaires mises en œuvre, des dalles préfabriquées viennent constituer deux traversées du fleuve circulables par les engins de chantier (figure 24).

The choice was made to build a temporary bridge. This bridge is founded on steel piles put in place by vibrating driving and equipped with transverse head beams (figure 23). Once the main and secondary girders implemented, prefabricated slabs come up to constitute two river crossings usable by construction vehicles (figure 24).

Les rives du pont provisoire sont constituées de poutres renforcées qui portent les rails du portique desservant l'ensemble du chantier. Les tours Megashore, palées provisoires des palmes formant l'arc central, sont implantées sur l'ossature du pont.

The banks of the temporary bridge are made of reinforced beams that carry the gantry rails serving the entire building site. Megashore towers, temporary supports of palms forming the central arch, are located on the bridge frame.



Fig. 23. Pont provisoire en construction / Temporary bridge under construction



Fig. 24. Pont provisoire : construction avancée / Temporary bridge: well on construction

Portique de manutention

Gantry

Ce portique de 50 m d'ouverture, dégage une hauteur de 20 m sous crochet. Sa capacité de levage est de 3 000 kN. Sa membrure supérieure est constituée par deux poutres treillis de 2 m de large et de 5 m de haut, espacées entre axes de 6 m et de 75 t de masse chacune. Ses montants verticaux ont une base, entre axes, de 20 m de large.

This 50 m wide gantry, has a height of 20 m under hook with a lifting capacity of 3,000 kN. The upper beam consists of two trusses 2 m wide and 5 m high, with axis 6 m apart, and weighing 75 t each. Its frame legs have a base 20 m wide between axis.

La taille de ce matériel lui permet d'enjamber les trois tabliers de l'ouvrage et donc de desservir, à partir de l'aire de préfabrication (figure 25) et grâce au pont provisoire (figure 26), la construction de toute la partie rectiligne du pont.

The size of this equipment allows it to span over the three decks of the bridge and therefore serve, from the precasting yard (figure 25) and with the temporary bridge (figure 26), the construction of the whole straight part of the bridge.

Les 237 éléments préfabriqués constituant

237 precast elements constituting the bridge, weighing up to 260 t, were brought from their place

l'ouvrage, pesant jusqu'à 260 t, ont été portés de leur lieu de bétonnage à leur position de stockage, puis de leur position de stockage à leur position définitive, à l'aide de cet outil spécialement construit pour le pont Hassan II.



Fig. 25. Portique sur l'aire de préfabrication / Gantry on precasting yard



Fig. 25. Portique sur le pont provisoire / Gantry on temporary bridge

Tirants des grandes palmes

Après clavage des 3 palmes constituant une arche centrale (figure 7), la mise en œuvre d'un tirant liant les pieds des palmes de chaque tablier permet d'activer le fonctionnement provisoire en arc de la structure. Chaque tirant se compose de 2 câbles 37T15, soit un câble de part et d'autre des pieds de palme ancré dans un bâti en acier venant s'appuyer sur les 4 plaques d'ancrage du pied de palme non encore utilisées (figures 26 et 27).

La tension du tirant est réglée de façon à obtenir un état admissible de contraintes dans la structure.

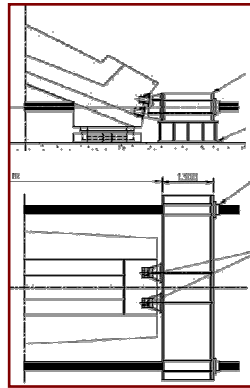


Fig. 26. Bâti d'ancrage des tirants d'une palme / Frame for anchoring palm tie

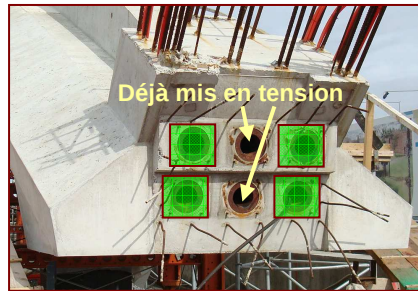


Fig. 27. Plaques d'ancrage d'appui / Support anchorage plate

12.2. Phasage de construction

La construction commence par la constitution des squelettes des trois travées centrales, la mise en tension des tirants de pied de palmes, puis la réalisation des entretoises qui les relient. A partir de cet ensemble auto-stable tout le reste de la structure est développé.

Symétriquement, vers Salé et Rabat, les palmes préfabriquées sont posées ; les béquilles, les âmes centrales des tabliers, les nœuds et les entretoises sont coulées en place.

12.2. Construction stages

The construction begins with the formation of skeletons of three central spans, the tensioning of ties anchored on palm feet, and then the realization of the cross beams between them. From this self-stable structure the rest of the structure is developed.

Symmetrically towards Salé and Rabat, precast palms are raised; slant-legs, central webs of decks, nodes and cross beams are cast in place.

Une fois les dernières palmes posées, on commence à poser sur cintre et à claver les demi caissons préfabriqués des tabliers. Cette pose n'est pas linéaire.

En effet, le phasage est très complexe. Pour gérer au plus près l'état des contraintes dans les différentes parties des trois tabliers, il faut intervenir :

- la pose de demi-voussoirs dans des zones bien définies et limitées, souvent non connexes,
- un phasage précis pour retirer les tours d'étalement ou pour les maintenir en place malgré la mise en précontrainte des zones correspondantes,
- la mise en tension ciblée des câbles de précontrainte, dont les longueurs et la géométrie ont été précisément travaillées,
- la retension ou la détension des tirants des arcs centraux : au cours de la construction de l'ouvrage la tension dans les tirants des trois arcs centraux aura été modifiée à sept reprises,
- la dénivellation d'appui de certains pieds de palme en cours de construction de la structure,
- le vérinage sur étalements provisoires en cours de construction.

La réalisation des dernières travées P8 à P10 et P1 à P0, qui encadrent la zone des palmes préfabriquées, a été anticipée. Ces parties reposent sur des appuis provisoires adjacents aux nœuds P1 et P8. Elles sont en béton armé coulé sur cintre.

Après la réalisation du clavage des dernières travées coulées in situ, avec la partie centrale largement préfabriquée, les dernières tâches de la construction concernent la pose des équipements de l'ouvrage.

13. CONCLUSION

La réalisation des études de cet ouvrage exceptionnel, tant par les formes que par le comportement, a nécessité de très importants investissements en moyens informatiques et humains dans le domaine des calculs de structure comme dans celui de la conception des plans d'exécution.

Ces études ont permis la production de 120 notes de calculs et de 1500 plans d'exécution, ce qui est hors du commun pour un ouvrage de cette dimension.

L'ouvrage terminé présente un aspect en harmonie avec sa qualité architecturale. L'Entreprise a réalisé un excellent travail dans des conditions qui parfois ne laissaient place à aucune marge de manœuvre. Elle a su fabriquer une structure dont la qualité est à la hauteur des exigences élevées de l'Architecte.

Once the last palms raised, half segments of the deck box girder are put in place on scaffolding. This operation is not linear.

Actually the construction stages are very complex. To manage more closely the state of stresses in different parts of the three decks, they involve:

- *The installation of half-segments within defined and limited areas, often unrelated,*
- *Precise phasing to remove shoring towers or for holding them in place in spite of the prestressing tendon tensioning of the corresponding areas,*
- *Chosen tensioning of prestressing tendons, the lengths and geometry of which were specifically worked,*
- *The re-tensioning or partial slackening of central arch ties: during the construction of the bridge tension in the ties of the three central arches has been amended seven times,*
- *Modification made in level of some palm feet during construction of the structure,*
- *Jacking on temporary shoring towers during construction.*

The completion of the last spans P8 to P10 and P1 to P0, on each side of the area of prefabricated palms, has been anticipated. These parts are leant on temporary supports near nodes P1 and P8. They are made of cast in situ reinforced concrete.

After completion of the closure of the last spans cast in situ, with the central part mainly precast, the last construction tasks are related to the installation of bridge equipment.

13. CONCLUSION

The studies of this exceptional bridge by forms as much as behavior, required important investments in computer means and human resources in the field of structural calculations as in the design of final drawings.

These studies have led to the production of 120 calculation notes and 1500 final drawings, which is quite unusual for a bridge of this size.

The bridge presents a finished appearance in harmony with its architectural quality. The construction company has done an excellent job in conditions that left sometimes no room for flexibility. She was able to produce a structure whose quality is up to the Architect high demands.

14. INTERVENANTS

Maître d'ouvrage

Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg (AAVB)

Maître d'œuvre et Architecte

Cabinet Marc Mimram

Entreprise

Société Générale des Travaux du Maroc (SGTM)

Bureau d'Etudes

EGIS JMI

Sous-traitant principal (Précontrainte, appareils d'appui, joints de chaussée, méthodes partielles)

Freyssinet

14. MAIN PARTNERS

Owner

Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg (AAVB)

Project Manager and Architect

Cabinet Marc Mimram

Construction Company

Société Générale des Travaux du Maroc (SGTM)

Bureau d'Etudes

EGIS JMI

Main Sub-contractor (Prestressing, pot bearings, expansion joints, partial construction methods)

Freyssinet

