

## **Le pont à haubans de Bouregreg sur l'autoroute de contournement de Rabat**

Par : A. ELOUALIDI – Autoroutes du Maroc.

### **RESUME :**

Le présent article est un aperçu sur la conception particulière du pont à haubans de Bouregreg et relate les démarches suivies lors des phases des études d'APS et d'APD.

### **1. INTRODUCTION :**

Le réseau autoroutier se verra doter d'une nouvelle liaison qui reliera l'axe Nord (l'autoroute Rabat - Tanger et l'autoroute Rabat - Oujda) à l'axe Sud (l'autoroute Rabat - Agadir) : il s'agit de l'autoroute de Contournement de Rabat.

Le contournement de Rabat s'inscrit ainsi dans cette volonté de développement à la fois régionale et nationale, et également internationale, en tant que maillon d'un réseau à l'échelle du Maghreb.

L'Oued Bourgreg qui prend sa source dans le moyen atlas est important à différents niveaux :

- historiquement et symboliquement : son embouchure est le lieu de la création de Rabat et de Salé et elle fut longtemps une zone d'activité portuaire importante pour la ville et le pays.
- Economiquement : le barrage de Sidi Mohamed Ben Abdallah joue un rôle primordial dans la gestion de l'eau potable de grandes villes comme Rabat et Casablanca.
- dans le développement futur de la ville de Rabat, une fois que la décharge d'Akreuch sera transférée, le site en aval du barrage pourra exprimer pleinement son potentiel paysager et devenir une zone de développement urbain.

Le passage de l'autoroute de Contournement de Rabat ne peut qu'accentuer ce développement, et l'ouvrage de franchissement doit alors porter le signe et le symbole de ce dynamisme.

Le site de l'ouvrage se situant ainsi dans ce contexte particulier, qui est l'intersection d'une autoroute d'importance avec un Oued particulier, donna l'idée de le marquer par un ouvrage exceptionnel : un pont à haubans. Ce choix n'est pas anodin et pour porter cette identité, cette structure, a besoin d'une brèche large, compatible avec les grandes portées, suffisamment ouverte pour laisser l'ouvrage dans sa pleine expression. Le site répond parfaitement à ces exigences.

Ce nouveau pont, situé aux environs du Pk 30 de l'autoroute à quelques pas à l'aval du Barrage Sidi

Mohamed Ben Abdallah, sera alors un nouveau défi technique à plusieurs titres. En effet,

- il détiendra le record de la plus grande travée du pays avec une travée centrale de 376 m,
- il détiendra le record de plus haut pont du pays avec une hauteur du tablier par rapport au sol de 100 m,
- il a fait l'objet d'études particulières comme les études de sensibilité au vent,
- et sera caractérisé par des techniques d'exécution particulières liées au contexte géotechnique traversé, à sa proximité du Barrage et à aux procédés d'exécution qui seront mis en œuvre.

Ce pont sera également un bijou architectural. En effet, il sera fortement inspiré de l'héritage architectural arabo - musulman de la ville de Rabat à travers des pylônes, de hauteurs dépassant 185m, marqués par des formes typiquement locales.

Le pont à haubans de Bouregreg sera tout simplement un monument qui marquera la ville de Rabat.

La présente communication fera un aperçu sur la conception particulière de ce pont et relatera les démarches suivies lors des phases des études, notamment :

- présentation du parti architectural choisi,
- description des phases d'études et des problématiques de chaque phase :
  - APS : les variantes étudiées.
  - APD : développement de la variante choisie et aperçu sur les études géotechniques, les études de vent, le contexte sismique, les fondations, les spécificités techniques (haubanage, équipages mobiles, coffrages grimpants, ...)
  - PE : les problématiques à résoudre et particularités de cette phase.

### **2. RAPPEL DES ETUDES ANTERIEURES :**

L'étude d'avant projet prévoyait deux variantes pour le franchissement de l'oued Bouregreg.

La solution de franchissement par un pont à poutres précontraintes de type VIPP était composée de 4 modules comportant chacun 3 travées de 40 m. La longueur du pont est de l'ordre de 480 m. La hauteur des piles variait entre 11 m et 66 m.

La solution Pont caissons construits par encorbellements successifs était composée de 5 travées continues : 65m+105m+105m+105m+65m d'une longueur de l'ordre de 445 m. La hauteur des piles variait entre 25.50 m et 59 m.

### 3. DEROULEMENT DES ETUDES APS & APD :

Les études, APS et APD du pont à haubans de l'oued Bouregreg, ont été confiées au groupement des sociétés suivantes :

- Setec TPI : société d'études française
- Maroc Setec : société d'études marocaine
- et Strates : Cabinet d'architecture français.

La consistance des missions assignées au groupement dans le cadre de ce marché est récapitulée ci-dessous :

- Phase 1 : Etude de l'avant projet sommaire (APS) des variantes possibles de ponts à haubans.
- Phase 2 : Etude de l'avant projet détaillé de la solution pont à haubans retenue au terme de la phase précédente.
- Phase 3 : Dossier de consultation des entreprises (DCE).

Le contrôle extérieur des études a été assuré par le groupement des sociétés suivantes :

- Team Maroc : société d'études marocaine
- Sépia : société d'études française
- COTEBA : société d'études française.

Les études de vents ont été confiée au Centre Expérimental du Bâtiment (CSTB) en France.

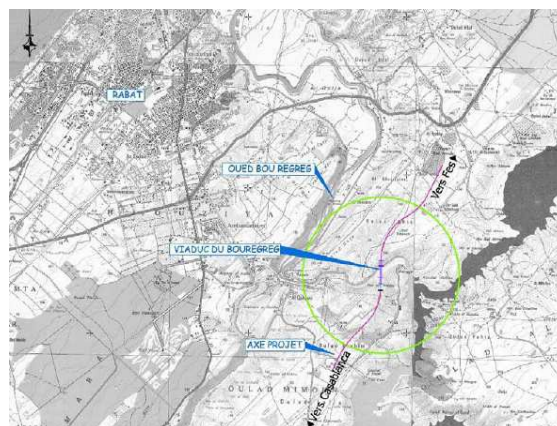
L'engagement de ces différents prestataires a été fait dans le cadre de procédures d'appels d'offres ouverts.

### 4. CONTEXTE GENERAL DU SITE :

#### **Situation**

L'ouvrage se situe à proximité du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah à une quinzaine de kilomètres en amont de la ville de Rabat. Son tracé se développe entre les Pk 29+140 et le Pk 30+085 de l'autoroute de contournement de Rabat. Ce lieu assez reculé de la ville est bordé par des reliefs culminants autour de 150 m qui isolent l'ouvrage des vues lointaines. La configuration de la vallée méandreuse limite les perceptions depuis l'extérieur sur l'ouvrage.

L'analyse architecturale du site a tenu compte du contexte actuel et du contexte futur, car si aujourd'hui les perceptions sur l'ouvrage semblent être limitées à celle de l'utilisateur, il est important de dire que les perceptions depuis le site ne sont pas à négliger (depuis la zone du barrage, depuis les rives de l'oued...).



**Figure 1: extrait de la carte topographique illustrant l'emplacement du futur ouvrage**

D'ailleurs, l'histoire est pleine de grands ouvrages édifiés dans des sites éloignés des villes ou dans des lieux confidentiels.

Avec le temps, ces ouvrages sont devenus des points de repère et les gens vont désormais à eux.



**Figure 2: emplacement du futur ouvrage par rapport au barrage SMBA**

#### **Topographie**

Le site du franchissement de l'oued Bouregreg par l'autoroute est situé à l'intérieur des terres.

Le fond de la vallée, de direction Sud-Ouest/Nord-Est, est aux environs de la cote +1 NGM. Les plateaux bordant la vallée culminent à la cote +150 NGM environ.

Les versants ont une pente parfois raide (de l'ordre de 35 à 40°), parfois plus douce au voisinage de vallons secondaires. Le tracé est parallèle à l'un de ces vallons, le profil en long étant calé vers la cote +100 NGM.

#### **Contexte géologique**

Le cadre géologique général est celui de la région de Rabat :

- dans le bas de la pente, on trouve les schistes tachetés et phyllades du Bouregreg(XS), d'origine métamorphique, présentant en tête à l'affleurement une épaisseur d'altération métrique à décamétrique ; ces niveaux sont recoupés à environ 35 m au sud de P2 par une faille supposée, F2, plus localisée et de moindre importance, qui semble joindre le front de différents lambeaux de granite présents dans la région ; le dernier jeu de cette faille est d'âge hercynien.

## Contexte hydraulique

La section de franchissement est à 1,20 km environ à l'aval du barrage SMBA.

L'ouvrage a été mis en service en 1974 et est dédié à l'alimentation en eau potable de la zone côtière entre Kénitra et Casablanca. Il contrôle un bassin versant de 9 590 km<sup>2</sup> et peut stocker un volume d'eau de 1 025 Mm<sup>3</sup> après surélévation et pour la cote de retenue normale de 65 m NGM.

Le barrage joue également le rôle d'écrêtement des crues et de protection des enjeux situés en aval du barrage.

L'étude hydraulique conclue sur la base d'un débit centennal de 2 000 m<sup>3</sup>/s, à un niveau des Plus Hautes Eaux (PHE) de 8,40 m NGM pour une vitesse d'écoulement de 3,65 m/s.

## Caractéristiques des vents

L'effet du vent, dans la conception et le dimensionnement de l'ouvrage constitue un paramètre important.

Les données de vent utilisées sont issues des mesures effectuées à la station de Rabat - Salé et correspondent à la vitesse instantanée maximale mensuelle et sa direction associée.

Ces données disponibles correspondent à une période allant de janvier 1971 à décembre 2008, soit une période de 38 années.

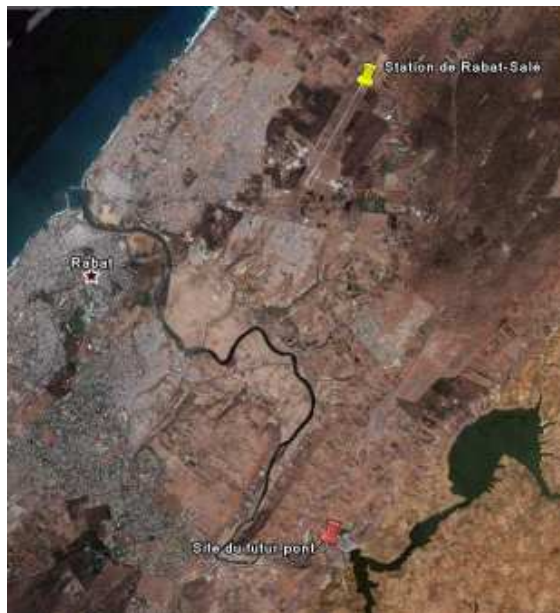


Figure 4: emplacement de la station météorologique par rapport au futur ouvrage

La figure ci-dessous représente la rose des vents forts obtenue à partir des vitesses instantanées maximales mensuelles mesurées.

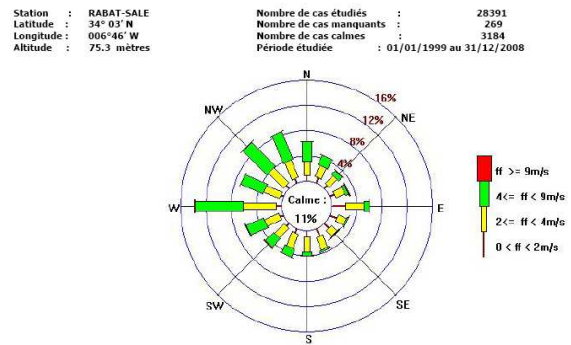


Figure 5 : rose des vents forts à la station de Rabat-Salé

On observe alors que les vents forts possèdent un secteur de direction très privilégié, à savoir le secteur [240°-280°].

## Sismicité

Le risque sismique de l'ouvrage pris en compte a été déterminé par les chercheurs de l'institut scientifique de la Faculté des Sciences de Rabat.

L'accélération est estimée à 0,176g, soit une accélération nominale de 1,76 m/s<sup>2</sup>.

## 5. PHASE DE L'AVANT PROJET SOMMAIRE:

Parmi les objectifs assignés à cette phase, la revue du tracé au niveau du franchissement de l'oued Bouregreg afin :

- d'assurer une bonne insertion du pont dans le site,
- tout en limitant les quantités de déblais et de remblais généraux,
- et en corrigeant le profil en long sur ouvrage pour éviter d'avoir un point bas sur celui-ci.

Ainsi, cette phase a été l'occasion d'étudier plusieurs variantes qui sont décrites ci après.

## VARIANTES DE CHANGEMENT DE TRACE

Le premier objectif de cette partie de l'étude étant de proposer une meilleure insertion du pont haubané dans le site de l'oued Bouregreg, une étude de variantes larges de tracé, permettant à plus grande échelle, de balayer les options envisageables pour le franchissement de l'oued a été entreprise.

Trois variantes, V1 à V3, ont été définies à cette étape. Ces grandes variantes ont été faites, au départ, dans l'hypothèse d'une possibilité de sortir du «couloir» de l'Avant Projet et demandent donc de plus amples reprises du tracé du contournement de Rabat.



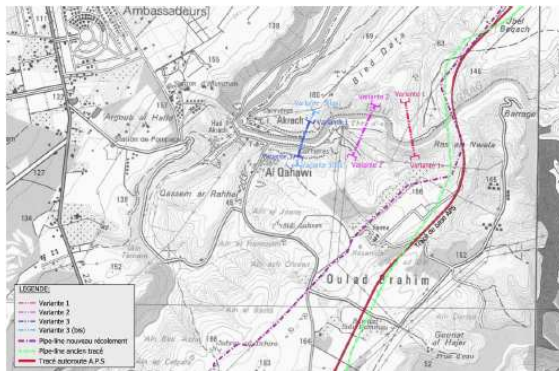


Figure 6 : illustration des variantes de tracé

Les trois variantes larges de tracé V1, V2 et V3 proposées sont situées à l'ouest (plus en aval donc) du tracé de l'avant projet. L'étude de ces variantes a été entreprise sur la base de cartes topographiques en l'absence de données topographiques plus précises.

#### Variante V1

Le franchissement de l'oued se fait perpendiculairement par rapport à l'oued se qui donne une lecture franche de l'ouvrage. La configuration de la brèche milite pour une structure dissymétrique, le mât de rive droite étant haut, suffisamment pour être aperçu depuis les hauteurs de Al Qahawi ou du quartier des ambassadeurs.

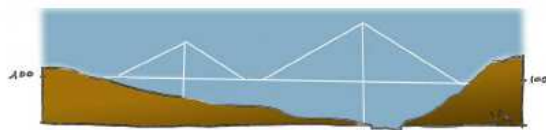


Figure 7 : coupe longitudinale de la variante V1

#### Variante V2

Le franchissement se fait après un méandre de l'oued et la dissymétrie des reliefs de la vallée s'est inversée.

L'ouvrage assez long et haut sera vu, les mâts émergeront des reliefs suffisamment pour être vus depuis les habitations qui ont colonisé les hauteurs.

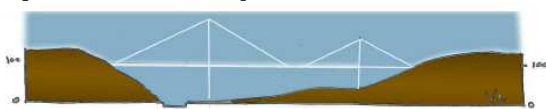


Figure 8 : coupe longitudinale de la variante V2

#### Variante V3

La situation du tracé dans l'axe de l'oued à un endroit resserré de la vallée donne incontestablement une valeur signalétique à l'ouvrage. En restant dans des portées raisonnables c'est un ouvrage qui pourra être aperçu au-delà de la vallée, depuis les hauteurs qui bordent la ville de Rabat et même peut être du sommet de certains bâtiments du centre ville. Mais cette dernière évocation demande des vérifications objectives.

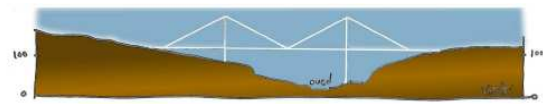


Figure 9 : coupe longitudinale de la variante V3

Les trois variantes décrites ci-dessus ont été abandonnées pour le de changement de couloir qu'elles nécessitent. De plus, l'autoroute de contournement de Rabat s'en trouverait plus proche de la zone urbanisée ce qui risque d'alourdir son impact environnemental.

### VARIANTES LOCALES D'AMELIORATION DU TRACE

L'objectif de cette partie est l'étude de variantes de tracés permettant de rester dans le couloir défini initialement dans la phase AP. Elle permet également de mieux répondre aux exigences de tracé d'un pont à haubans.

En effet, il faut que le tracé valorise l'ouvrage et le mette en scène. Il faut donc éviter de trop "plonger" dans la vallée.

Les ponts haubanés permettent de grandes traversées, alors que les ponts classiques ont besoin de piles. Pour les premiers on privilégiera une pente douce, une hauteur suffisante pour ne pas "écraser" la structure entre les flancs de reliefs, alors que pour le second on enfoncera le tracé pour réduire la longueur de la structure.

On est dans une comparaison de structures non objective, et il n'est pas choquant que le tracé qui sied à l'un ne paraisse pas le meilleur à l'autre.

L'analyse de tracés autour de l'axe de l'AP optimisés pour une solution exceptionnelle de type haubanée a fait ressortir deux solutions principales : une solution de base avec une longueur d'ouvrage autour de 550 mètres et une solution plus tranchée, plus plate et plus haute d'une longueur d'ouvrage plus importante de l'ordre de 800m (solution basse) et 950 m (solution haute).

Cette dernière solution permet une expression de la structure haubanée plus volontaire, elle pousse le raisonnement plus loin, elle a le mérite de montrer jusqu'où on peut raisonnablement aller sur ce tracé amélioré.

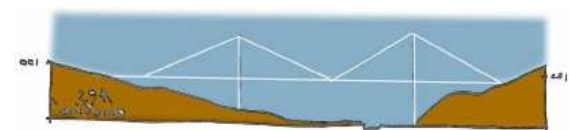


Figure 10 : profil en long d'une solution plus tranchée, plus plate, plus haute.

Le montage suivant illustre la vision que l'on aura de l'ouvrage dans le cas de la solution haute.



Figure 11 : vision de la solution haute.

#### Solution de base :

Dans cette solution, on reprend le tracé en plan et le profil en long de l'AP avec quelques modifications visant à s'affranchir des contraintes du site :

- élimination des points bas sur ouvrage,
- et éviter le pipeline de la Samir.

Cette première solution permet de mieux appréhender les contraintes de profil en long liées à la topographie du site.

L'ouvrage est remonté de 10 m environ, pour une longueur de 550 m et une hauteur des remblais sur culées de 10 m environ.

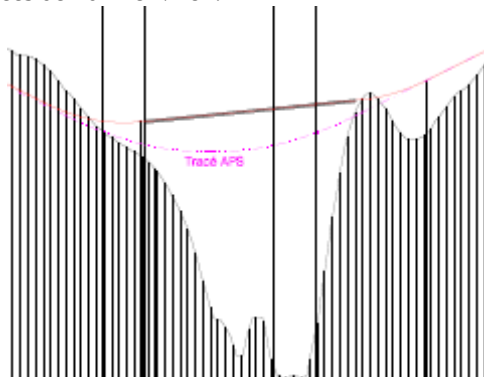


Figure 12 : profil en long de la solution de base.

Ce profil s'adapterait plutôt à une solution classique de type VIPP ou autre et ne permet pas de mettre en valeur une solution de pont à haubans.

#### Solutions basse et haute :

Le tracé en plan et le profil en long de l'AP ont été repris avec des modifications visant à les adapter à la solution pont à haubans et s'affranchir des contraintes du site :

- remontée du profil en long et augmentation de la longueur de l'ouvrage,
- élimination des points bas sur ouvrage,
- éviter le pipeline de la Samir.
- Introduction de courbes et contre courbes en tracé pour mettre l'ouvrage en valeur.

A travers ces solutions, une recherche de mise en valeur de l'ouvrage a été exprimée par une remontée nette du profil en long avec une dénivellée

de l'ordre de 85 m ou 100 m par rapport au fond de l'oued correspondant à des longueurs d'ouvrage de 800 m et 950 m respectivement.

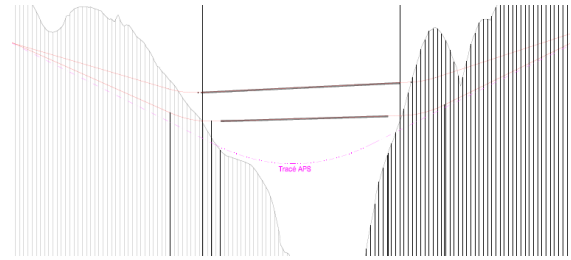


Figure 13 : profil en long des solutions basse et haute.

### VARIANTES DE COUPE TRANSVERSALE

Le profil en travers type prévu en stade de l'AP correspondait à une voie portée en 2 x 2 voies. Ce profil a été modifié en prenant en compte une voie portée de 2x3 voies afin de répondre à toute demande ultérieure d'augmentation de la capacité de l'ouvrage.

Les variantes proposées à ce stade sont : la solution de haubannage latéral et la solution de haubannage axial.

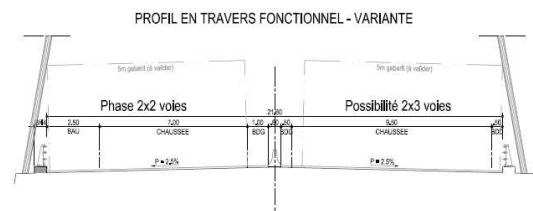


Figure 14 : haubannage latéral

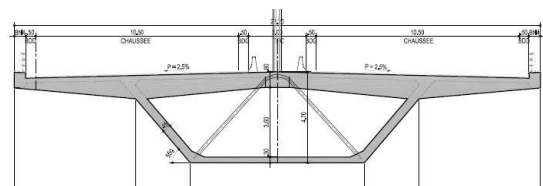


Figure 15 : haubannage axial

Nous avons donc envisagé deux types de structures de tablier selon le principe de haubannage :

- Caisson en béton : ce type de section est constitué d'un caisson à deux âmes inclinées, avec des poutres transversales tous les 4 m reprenant les encorbellements latéraux. Les haubans sont ancrés sous le hourdis dans une nervure. Les efforts sont transmis de la nervure

dans les âmes par l'intermédiaire de tirants en métal.

- Profil ouvert avec une dalle nervurée : La section comporte deux nervures longitudinales en béton, dans lesquelles sont ancrés les haubans et qui accueillent également la précontrainte longitudinale. Des poutres transversales tous les 4 mètres permettent de reprendre la flexion transversale.

## **PARTI ARCHITECTURAL**

Une fois l'axe déterminé et validé géométriquement par l'ensemble des partenaires du projet, on engage la réflexion sur l'architecture du pont.

Nous savons que la structure, par son ampleur exceptionnelle, dépasse le seul geste fonctionnel. Les possibilités techniques et architecturales sont encore, à ce stade de l'étude, nombreuses.

Le tracé qui franchit l'Oued Bouregreg est droit, ce qui autorise plusieurs possibilités de haubannage, axial ou latéral. Le profil en long nouvellement calé est en pente constante et légèrement descendante du nord vers le sud, ce qui n'a pas d'influence sur les perceptions en élévation, ou depuis le tablier lui-même.

Le haubannage axial ou bilatéral reste un choix conceptuel fort. Il conditionne l'ensemble de l'architecture de l'ouvrage, car si les tabliers sont différents, les pylônes le sont également. Il faut toujours adapter la fonction à la forme, l'image de l'ouvrage est liée à son fonctionnement.

L'architecte a inventé une forme générale des pylônes qui s'inspire de formes issues du registre et de la culture marocaine. Même si on ne cherche pas le détail dans ces constructions autour de 140 mètres, on privilégie le jeu des ombres entre les pleins et les vides, mis en scène par la lumière.

Un travail sur des plans et des courbes a guidé la conception. Des formes simples, faciles à lire et à comprendre prennent place dans le lit majeur de l'oued et se dessinent dans la brèche pour porter l'autoroute.

La "toile" de haubans simples ou doubles accompagne l'automobiliste dans la traversée de la vallée. Le geste est identitaire et contemporain. Dans toutes les solutions que nous avons étudiées les pylônes et les tabliers sont en béton, et leur forme s'adapte aux variations du haubannage.

Cette phase d'étude préliminaire permet de proposer des pistes. Chaque proposition correspond à une idée qui suscite un débat. La bonne solution sera

celle qui sera partagée par tous les acteurs qui portent le projet.

Les solutions qui suivent développent un peu plus en détail les grands principes des possibilités. Elles répondent à l'envie de marquer le franchissement de l'oued, dans un geste assez ample et sécurisant pour l'automobiliste qui passera entre les « jambes » des pylônes comme il passerait des portes, ou à côté d'une grande aiguille comme il passerait sur le pont d'un grand voilier « échoué » dans la vallée du Bouregreg.



*Figure 16 : vision de passage entre les jambes du pylône*



*Figure 17 : vision d'un voilier échoué dans la vallée de Bouregreg.*



### Recherche de pylône avec deux nappes de haubans

L'architecture de ces pylônes peut prendre plusieurs formes, mais l'architecte a voulu rendre à ces deux objets une élégance et une identité propre au contournement de Rabat.

La fluidité des courbes, l'absence de lignes droites ou d'angles trop marqués a guidé sa conception. Il en ressort des volumes élancés et expressifs, qui accompagnent l'automobiliste dans son franchissement de la vallée.

L'effet de porte est sublimé par la hauteur des pylônes qui culminent jusqu'à plus de 70 mètres au dessus du tablier.

La surface en pied se limite au strict nécessaire généré par les efforts en pied et sur les fondations. Puis la forme s'évase lentement et systématiquement en suivant une courbe pour contourner le tablier qui porte l'autoroute avant de se refermer sur les deux lignes verticales qui accueillent les haubans.

La nappe est semi-concentrique pour un fonctionnement optimal et un dessin, dans l'espace, plus dynamique que celui d'une nappe parallèle ou trop concentrée.



**Figure 18 : pylône à nappes latérales**

### Recherche de pylônes avec une seule nappe de haubans

Le registre des pylônes axiaux est très différent du précédent. Les premiers se glissent au milieu de la chaussée alors que les seconds enveloppent le pont.

Avec les pylônes axiaux on est dans le registre de l'aiguille. Le résultat est sobre mais contemporain. La matière est optimisée.



**Figure 19 : pylône à nappe axiale**

Les deux concepts structurels s'adaptent facilement à des solutions hautes ou basses, sans changement fondamental de leur architecture.

### Une solution haute ou basse pour le franchissement de l'oued

A ce stade, l'architecte avait une préférence pour une solution haute avec haubanage bilatéral. En effet, la vision architecturale voulait marquer ce passage avec un ouvrage imposant. Le haubanage latéral retiendra l'attention des automobilistes beaucoup plus que le haubanage axial qui reste plus sobre et discret.



## 6. ETUDE DE L'AVANT PROJET DETAILLE:

Au terme, de la phase précédente la solution haute à haubanage latéral a été retenue et a fait l'objet d'études plus détaillées au stade de l'APD.

### ARCHITECTURE

A l'issue de la phase APS le choix d'ADM est sans ambiguïté, il confirme l'option forte de construire un ouvrage exceptionnel aux portes de Rabat.

Un signal puissant et contemporain suivant un tracé haut et aérien avec une structure haubanée bilatérale pour l'ouvrage principal.

Au cours de la mise au point de l'avant projet le travail architectural sur la solution retenue a été de conforter ce choix en recherchant des réponses pour les pylônes, le tablier haubané et l'ouvrage d'accès cohérentes avec les premières propositions développées à l'avant projet sommaire.

Cette recherche s'appuie sur l'expression d'une architecture marocaine, sans chercher à imiter mais bien à recomposer à partir de formes géométriques simples une volumétrie révélatrice de la technicité. Depuis le démarrage de cette étude on imagine une architecture qui suscite une émotion, qui privilégie le jeu des ombres entre les pleins et les vides mis en scène par la lumière.

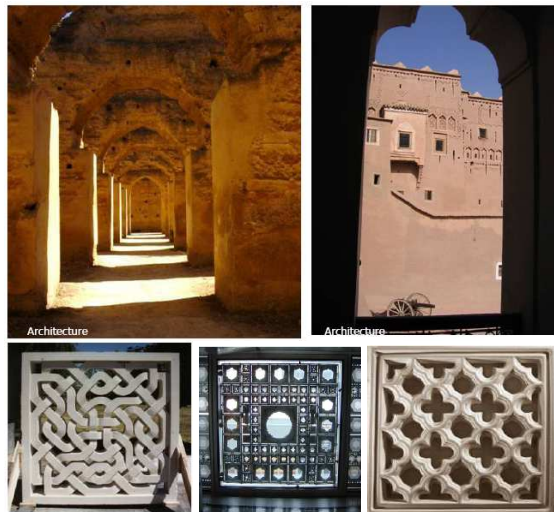


Figure 20 : l'architecture locale a été mise en jeu pour concevoir les formes de l'ouvrage

### Pylônes

L'évolution technique entre la phase d'avant projet sommaire et celle de l'avant projet est inévitable. La conservation du projet originel reste une priorité. Le cheminement plus précis des efforts dans ce grand volume élancé a redimensionné des sections à la hausse ou à la baisse.

Afin de conserver une harmonie dans l'enveloppe du pylône on « compense » certaines augmentations

ou diminutions géométriques par un travail de sculpture.

La décomposition de la taille des facettes joue avec la lumière et redéfinit l'image de l'ouvrage.

### Le tablier

Le tablier de l'ouvrage principal reste une ligne très pure et mince dans le paysage. Comme pour le pylône l'arrivée des haubans dans le béton est simple. Chacun d'eux pénètre dans les poutres de rives sans avoir besoin de pièces complémentaires compliquées.

Le coffrage des joues qui ferment le parallélépipède doit être parfait.

Leur inclusion tournée vers la lumière demande une qualité de matériaux irréprochable avec des tolérances géométriques faible.

Le petit garde corps de service qui chapeaute les poutres évite les chutes ; il doit être discret et transparent, voire « invisible » à l'échelle de l'ouvrage.

Son calepinage se fera en cohérence avec les barrières de sécurité et le rythme des haubans sur les poutres.

## CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE FINAL

Le viaduc de franchissement de l'Oued Bouregreg, d'une longueur totale de 954,30 m (dont 951,66 m entre axes des culées), se décompose en 2 parties :

- un viaduc haubané de 745 m de long (dont 742 m entre axes de culée à pile culée) à deux pylônes, de la culée C0 à la pile culée P3,
- un viaduc en poutres VIPP de 208,80 m de long (206,86 m entre axes de culée à pile culée), composé de 5 travées, de la pile P3 à la culée C8.

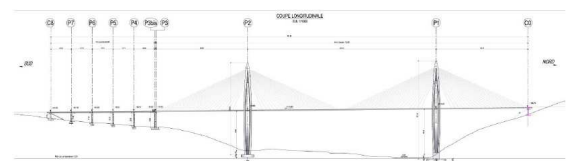


Figure 21 : vue longitudinale de l'ouvrage

### PONT HAUBANE

#### Conception générale

L'ouvrage haubané proposé comprend un tablier, à trois travées de 183,0 m, 376,0 m et 183,0 m de long. Au droit d'un pylône, le tablier est supporté par l'intermédiaire de 2 fois 20 paires de haubans, organisés en deux nappes latérales. Ces haubans sont espacés tous les 8,00 m au niveau de leur ancrage dans le tablier. Les pylônes ont une hauteur de 94,97 m au dessus du tablier. Le haubanage est disposé en semi éventail. Le tablier et les pylônes seront réalisés en béton C40/45. Le tablier est encastré dans les pylônes et simplement appuyé sur culées.

## Le tablier

Le tablier est prévu en béton C40/45.

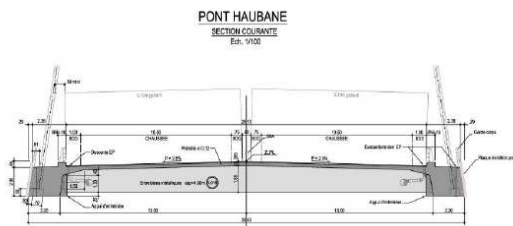


Figure 22 : coupe transversale de l'ouvrage

Le tablier est porté par deux nappes latérales de 2 x 20 haubans par pylône. La section transversale, d'une largeur totale de 30,40 m, est constituée de deux nervures latérales en béton de 2,20 m de largeur, distantes de 26 m et reliées entre elles par des entretoises métalliques en acier S355 espacées tous les 4,00 m. Des boucles en acier et des connecteurs assurent la continuité avec le ferrailage des pièces en béton. L'ancrage des haubans est prévu dans les nervures latérales. La hauteur de chaque nervure est de 2,00 m.

La chaussée est portée par une dalle béton de 25 cm d'épaisseur constituée de prédalles de 12,5 cm et d'une dalle coulée en place de 12,5 cm. L'étanchéité est continue sur toute la largeur du tablier.

A l'encastrement dans chaque pylône, le tablier est confondu avec les entretoises béton des pylônes reliant les jambes entre elles, et sur culée le tablier est équipé de bielles métalliques pour reprendre d'éventuels soulèvements.

Le tablier est précontraint longitudinalement par l'intermédiaire de câbles de précontrainte de type 19T15S. Le tablier est également précontraint transversalement au niveau de chaque jonction nervures / tablier plein à l'approche des culées par des câbles 12T15S.

## Les pylônes

Les pylônes seront réalisés en béton C40/50. Ils sont constitués de 4 jambes en béton (caisson) se rejoignant en tête et en pied.

Dans la partie haute, la zone d'ancrage des haubans, le pylône est constitué de deux boîtes épaisses en béton, précontraintes horizontalement en partie haute, reprenant la totalité des efforts, et de voiles minces pour assurer la continuité architecturale et l'aspect d'ensemble. La jonction entre les 4 jambes et les boîtes d'ancrage se fait par l'intermédiaire d'un plancher.

La jonction pylône tablier est assurée par la mise en place d'entretoises en béton précontraint reliant les 4 jambes et reprenant ainsi les poussées liées à la courbure du pylône.

Dans la partie basse, les 4 jambes du pylône sont reliées par l'intermédiaire de voiles béton fonctionnels et architecturaux.



Figure 23 : vue du pylône

## Les haubans

Au droit d'un pylône, le tablier est supporté par l'intermédiaire de 2 fois 20 paires de haubans de type Multi Torons Parallèles (MTP) ancrés de part et d'autre du pylône et dans chaque poutre latérale du tablier. Les haubans sont constitués de torons T15S, classe 1860 TBR, galvanisés, gainés, cirés. L'ensemble des torons constituant le hauban est protégé par une gaine générale aérodynamique en PEHD dont l'enveloppe extérieure est à relief.

La puissance de ces haubans s'échelonne entre 29T15S et 68T15S (soit des types d'ancrage s'échelonnant de 31T15S à 73T15S). Les ancrages sont de type réglable (famille C) au niveau du pylône et de type fixe (famille C) dans le tablier. Les retentions ultérieures s'effectuent donc depuis la tête de pylône.

## Les appuis et fondations

### La culée C0

La culée située en rive gauche est constituée d'un chevêtre et de 4 fûts circulaires fondés sur une semelle superficielle. Le tablier est simplement appuyé sur la culée longitudinalement et bloqué transversalement par des butées sismiques.

La culée, à environ 15 m au dessus du terrain naturel, est remblayée. La culée est réalisée en béton armé. Compte tenu du faible taux de travail sous la semelle à l'état permanent, il est possible de la fonder superficiellement. Les appareils d'appui sont de type appuis à pot d'élastomère. Compte tenu de l'ancrage du tablier sur les pylônes, ces appuis sont glissants (un appui monodirectionnel et

un appui multi directionnel) pour permettre la libre dilatation longitudinale du tablier.

### La fondation du pylône P1

La fondation du pylône P1 est constituée d'une semelle de fondation de 25,00 m x 30,00 m en béton C30/37 dont le niveau inférieur est situé à - 6,00 m NGM, soit de l'ordre de 6 m sous le fond de l'oued.

- Côté oued

Cette fondation sera réalisée à l'abri d'une digue de protection associée à une protection étanche, assurant la sécurité de la fouille jusqu'à la cote 4,0 m. Cette phase transitoire permet de réaliser la semelle de fondation (coffrage, ferrailage, bétonnage).

Il est ainsi nécessaire de :

- dévier provisoirement l'oued au voisinage de la zone à terrasser ; et réaliser la digue de protection de fouille ;
- réaliser un traitement permettant d'étanchéifier les terrains constituant le lit de l'oued ; les circulations d'eau se feront préférentiellement dans les niveaux alluvionnaires gravo-sableux à gravo-argileux, et dans les niveaux superficiels fracturés du schiste ; la coupure étanche dans les alluvions sera réalisé à l'aplomb du noyau de la digue de protection, par un dispositif de colonnes d'injections classiques au coulis avec tube à manchette ; les colonnes seront disposées en quinconces sur deux lignes espacées d'environ 0,5 m, les colonnes d'une même ligne étant disposées selon un entraxe d'ordre métrique.
- mettre en place un dispositif de pompage en fond de terrassement à l'ouverture des fouilles, afin de traiter les circulations d'eau a priori limitées dans les schistes sains sous-jacents.

Le dispositif digue et coupure étanche devra être réalisé à distance suffisante des emprises prévues pour la semelle, de manière à pouvoir réaliser les terrassements des fouilles avec un talutage simple de pente adaptée (par exemple 3h/2v dans les niveaux d'alluvions, et 1h/1v dans les schistes altérés et fracturés), ceci permettant de se passer de la réalisation d'un soutènement.

- Côté falaise

Les talus côté falaise auront plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Ils seront réalisés principalement dans le schiste sain, et recouperont potentiellement en tête les niveaux de schiste fracturé et altéré ainsi que les conglomérats calcaires silicifiés.

Les formations étant de nature rocheuse, on retient, à ce stade, le principe de confortement moyen forfaitaire suivant :

- talus taillés à 1h/5v avec des risbermes de 3 m de large tous les 10 m de haut,

- talus confortés par un clouage systématique, constitué de clous de 4 m de long mis en place selon une maille de 2 m x 2 m, et associés à un parement en béton projeté de 15 cm d'épaisseur renforcé par une nappe de treillis soudé,
- mise en place d'un dispositif de drains courts en base (sur les 3 à 5 premiers mètres de hauteur),
- mises en place de barbacanes sur toute la hauteur des parois clouées, avec une maille de 2 m x 2 m.

En l'absence de nappe de versant, les venues d'eau associées aux schistes côté amont du talus en place seront a priori limitées. Il conviendra de prévoir la mise en place de barbacanes et drains courts en base de talus, de manière à ne pas charger les soutènements, ainsi que la mise en place d'un dispositif d'épuisement en fond de fouille.

Le choix de la cote de la digue provisoire est lié à la mise en place d'un protocole avec le gestionnaire du barrage, calage dans le temps des travaux en période sèche et procédures adaptées.

### La fondation du pylône P2

La fondation du pylône P2 est constituée d'une semelle de fondation de 25,00 m x 30,00 m en béton C30/37 dont le niveau inférieur est situé à +2,59 m NGM.

La réalisation de cette fondation nécessitera :

- la déviation du petit oued à proximité,
- du confortement de talus en partie basse dans le rocher selon le même principe que pour le pylône P1,
- des déblais à 3h/2v dans les parties meubles supérieures,
- la mise en place d'un dispositif de pompage en fond de terrassement à l'ouverture des fouilles, afin de traiter les circulations d'eau a priori limitées.

### La pile-culée C3

La pile-culée est une pile-voile en béton C30/37. Le joint de chaussée de 500 mm de soufflé minimum et les appuis glissants permettront la dilatation du tablier du pont haubané, les déplacements sous charges d'exploitation et sous charges sismiques, du tablier du pont haubané et du tablier du viaduc d'accès. Compte tenu de la nature du sol de fondation, cette culée est fondée superficiellement.

### VIADUC ACCES VIPP

Le viaduc d'accès est un viaduc en béton VIPP (pour Viaducs Indépendants à Poutres Précontraintes).

Il comporte 5 travées de P3 à C8, respectivement de 40,85 m, 41,70 m, 41,73 m, 41,73 m et 40,85 m de portée.

Chaque travée est constituée de dix poutres en béton précontraint de 2,30 m de hauteur et 3,03 m

(côté aval) et 2,92 m (côté amont) de largeur de table, et de 0.80 m de largeur de talon, solidarisées par un hourdis et des entretoises aux extrémités. Les poutres et entretoises sont réalisées en béton C40/50, tandis que le hourdis, y compris prédalles, est réalisé en C35/45.

Les piles, réalisées en béton C30/37, reproduisent la forme des jambes des pylônes, de dimensions globales 3,72 m par 2,60 m, en caisson creux avec une épaisseur de 0,40 m. Les piles sont fondées sur fondations superficielles. Les semelles sont réalisées en béton C30/37. La culée C8, réalisée en béton C30/37, est conçue de la même manière que la culée C0, structurellement et architecturalement parlant.

Toutes les fondations sont superficielles et fondées sur le schiste fracturé.

## **CINEMATIQUE DE CONSTRUCTION**

### **Pont haubané**

Le choix d'un ouvrage béton et le nombre réduit de pièces métalliques permet de séparer clairement le chantier de génie civil de celui de charpente métallique qui se déroule essentiellement en atelier.

### **Fondation du pylône P1**

La fondation du pylône P1 demande la réalisation d'une paroi de soutènement (paroi clouée) pour les terrassements de la fouille, la déviation de l'oued, la construction d'une digue et d'un écran étanche dont la finalité est l'étanchéité et la protection de la fouille, le pompage des eaux d'infiltration.

### **Fondation du pylône P2**

La fondation du Pylône P2 demande la déviation du petit oued, la réalisation de parois clouées de faible hauteur en partie basse et de talus pentés à 3h/2v en partie supérieure dans les terrains meubles pour les terrassements de la fouille, le pompage des eaux d'infiltration. L'utilisation de parois clouées en partie basse dans les terrains rocheux permet de limiter l'emprise totale des terrassements.

### **Semelles et pylônes**

Le volume des semelles de fondation étant important, l'entrepreneur prendra toutes précautions pour maîtriser les effets thermiques consécutifs à la prise du béton (stockage des granulats, formulation du béton, hauteur des levées, circulation d'eau, armatures de couture). La température dans le béton sera limitée à 65°C. La construction des fûts des pylônes sera faite à l'aide de coffrages grimpants dont les levées seront de l'ordre de 4 m.

### **Construction du tablier**

Le tablier est construit par encorbellements successifs par voussoirs de 8 m de longueur.

L'entreprise réalisera au sol un prototype en vraie grandeur d'une fraction du tablier égale à 1 voussoir et demi en longitudinal, comprenant les nervures béton, les entretoises métalliques, l'ancrage des haubans, un bossage de précontrainte, les prédalles et la dalle coulée en place.

Afin de limiter le poids des voussoirs et de l'équipage mobile (tablier large), le cycle de réalisation d'un voussoir proposé comprend les phases suivantes :

- réalisation des nervures latérales (coffrage, ferrailage, bétonnage) du voussoir n et mise en place éventuelle de barres de brêlage,
- mise en place des haubans définitifs du voussoir n,
- avancée des équipages mobiles et des portiques permettant le haubanage provisoire de ceux-ci (il est prévu l'utilisation d'équipages mobiles pour la réalisation des nervures seules),
- mise en place des entretoises métalliques du voussoir n-1 (espacées tous les 4 m),
- mise en place de prédalles mi-hauteur du voussoir n-1,
- bétonnage du reste de la dalle et clavage du voussoir n-1.

Les entretoises métalliques sont exécutées en usine. Le transport de celles-ci est assuré par convois exceptionnels maritimes, fluviaux ou routiers.

### **Mise en place des haubans**

La mise en place des haubans est effectuée au fur et à mesure de la construction du tablier.

Les ancrages des haubans dans le tablier et les pylônes sont préalablement installés. Les gaines de protection et les tubes anti-vandalismes sont ensuite mis en place et chaque toron est hissé, puis tendu un à un. Les ancrages sont prévus réglables côté pylône, et fixes côté tablier. Les torons sont tendus à l'aide d'un vérin monotoron, l'ensemble pouvant, en fin de phase, faire l'objet d'une reprise de tension, soit au vérin monotoron, soit au vérin multitorons.

Après les mises en tension des haubans, on procédera à l'injection à la cire des ancrages, à l'achèvement des gainages, et à la mise en place des amortisseurs. Le réglage final des haubans aura lieu après la pose des superstructures. Une retension à 3 ans est également prévue de manière à gommer les effets du fluage dans le tablier, ceci afin de limiter la précontrainte à mettre en œuvre dans le tablier.

### **Viaduc accès VIPP**

Les modes de réalisation des semelles et des culées est le même que pour le pont haubané.

Les piles, dont le coffrage est identique à celui des jambes des pylônes, seront réalisées à l'aide d'un coffrage grimpant, avec des levées de l'ordre de 4 m de haut. Le chemin critique de la construction



étant la réalisation du pont haubané, il pourra être envisagé une réutilisation des coffrages des jambes des pylônes.

Les poutres du tablier sont préfabriquées sur un site de préfabrication et mise en oeuvre à la grue. Le hourdis est coulé à l'aide de prédalles.

## ETUDE DE L'EFFET DU VENT

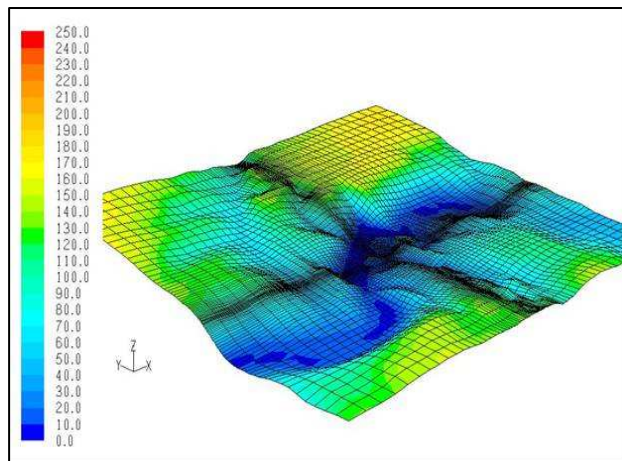
Des études de vent spécifiques ont été réalisées par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – France).

Les études effectuées sont :

- étude numérique du vent,
- étude en soufflerie sur modèle topographique
- étude aérodynamique sur section du tablier
- étude aérodynamique sur section du pylône

### Etude numérique du vent

Cette étude est effectuée à partir des données topographiques de la vallée et des données météorologiques de la station Rabat/Salé en vue de définir un modèle de vent au niveau du site de l'ouvrage : vitesse moyenne cinquantennale, l'inclinaison verticale moyenne du vent et une estimation de la turbulence.

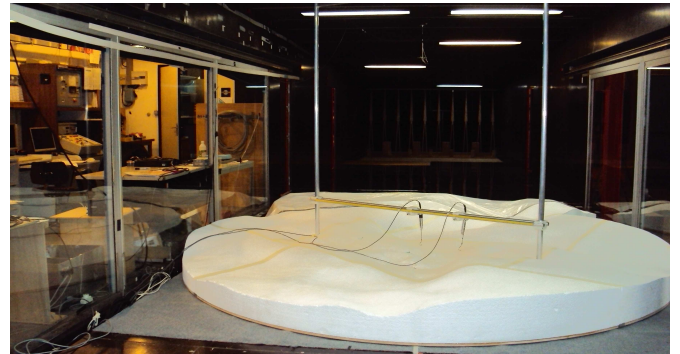


**Figure 24 : maillage3D pour la modélisation numérique du site de l'ouvrage.**

### Etude sur modèles topographiques en soufflerie

Cette phase d'études vise à préciser les caractéristiques du vent en tenant compte de la topographie du site. Cette phase d'étude expérimentale est réalisée à échelle réduite sur une maquette topographique.

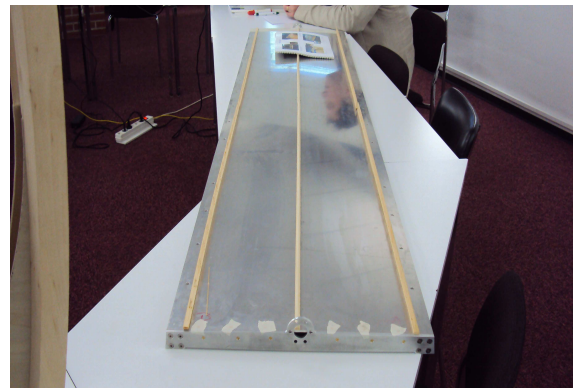
A partir de ces données expérimentales et des résultats de l'étude numérique qui seront à cet effet comparés, le CSTB bâtira un modèle de vent complet.



**Figure 25 : Maquette 3D du site de l'ouvrage.**

### Etudes aérodynamiques sur sections du tablier

L'objectif de cette phase est de déterminer les coefficients aérodynamiques (traînée, portance, torsion, détachement tourbillonnaire, admittance) à échelle réduite d'une section de tablier.



**Figure 26 La maquette d'une section du tablier ayant servie aux essais dynamiques.**

### Etude aérodynamique sur sections du pylône

L'objectif de cette phase est de déterminer les coefficients aérodynamiques (traînée, portance et torsion) à échelle réduite d'une section d'un pylône.



*Figure 27 : La maquette d'un pylône devant servir aux essais dynamiques.*

## 7. DCE & PROJET D'EXECUTION :

Le DCE pour la réalisation des études d'exécution et des travaux du pont à haubans a été lancé sur la base de la solution développée au stade APD.

Le délai prévisionnel de réalisation des travaux est de 34 mois pour un coût estimé à 640 MDH.

Les faits qui marqueront la phase de réalisation des travaux seront notamment :

- La poursuite des études détaillées de la solution retenue. Ces études demandent des compétences expertes dans les ouvrages non courants et des outils de calculs sophistiqués pour résoudre les difficultés techniques que posent ce genre d'ouvrages : les calculs des grands déplacements, les calculs non linéaires, la construction phasée, etc.,
- la réalisation des travaux de fondations du pylône P1 qui présenteront certainement des difficultés techniques importantes,
- la nécessité de réussite du coffrage des pylônes devant se conformer à la conception architecturale souhaitée dès le départ,
- la mise en place de techniques complexes de construction telles que les équipages mobiles pour la construction en encorbellement et des coffrages grimpants adaptés pour la réalisation des pylônes,

- la mise en place de dispositifs provisoires pour la tenue des fléaux au cours de construction,
- la nécessité d'assurer un suivi géométrique du tablier et l'adaptation des calculs au fur et mesure pour arriver une géométrie finale respectant la géométrie initiale.

Les points évoqués ci-dessus ne sauront être exhaustifs. Les aléas de chantier seront bien plus nombreux pour être résumés dans un paragraphe si court et leur concours compliquera davantage la tâche de l'exécution.

La construction le pont de Bouregreg sera sans doute un défi qui dotera notre pays d'un pont exceptionnel.

### Références bibliographies :

- [1] Etude de l'Avant projet sommaire, Groupement Setec TPI/Maroc Setec/Strates, Octobre 2008.
- [2] Etude de l'Avant projet détaillé, Groupement Setec TPI/Maroc Setec/Strates, Janvier 2010.
- [3] Etudes numériques de vent, CSTB, Juillet 2009.
- [4] Etudes de vent sur modèle topographique en soufflerie, CSTB, Novembre 2009.
- [5] Etude aérodynamique du tablier, CSTB, Novembre 2009.
- [6] Etude aérodynamique du tablier, CSTB, Octobre 2009.
- [7] Données météorologiques liées au vent, Direction de la Météorologie Nationale.
- [8] rapport des campagnes géotechniques, LPEE.