

PONT YAVUZ SULTAN SELIM SUR LE BOSPHORE 9 SEMAINES POUR UN RECORD DU MONDE

L'ASIE MINEURE ET L'EUROPE N'EN FINISSENT PLUS DE SE RAPPROCHER. ALORS QUE, PENDANT DES MILLÉNAIRES, SEULS DES BATEAUX ONT PERMIS DE TRAVERSER LE BOSPHORE, L'ANCIENNE BYZANCE A JETÉ DEUX PONTS SUR LE DÉTROIT CES 40 DERNIÈRES ANNÉES ET EN CONSTRUIT ACTUELLEMENT UN TROISIÈME : LE PONT YAVUZ SULTAN SELIM, D'UNE LONGUEUR TOTALE DE 2 164 M, AVEC UNE PORTÉE CENTRALE DE 1 408 M. **ENTRETIEN AVEC MICHEL VIRLOGEUX (MICHEL VIRLOGEUX CONSULTANT) ET JEAN-FRANÇOIS KLEIN (T-INGÉNIERIE).** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

À BIEN DES ÉGARDS, LE TROISIÈME PONT SUR LE BOSPHORE CONSTITUE UN OUVRAGE « D'EXCEPTIONS » QUE RECENSENT DANS LE DÉTAIL SES DEUX CONCEPTEURS : MICHEL VIRLOGEUX, DIRECTEUR DE MICHEL VIRLOGEUX CONSULTANT ET JEAN-FRANÇOIS KLEIN, DIRECTEUR ASSOCIÉ DE T-INGÉNIERIE.

Comment avez-vous été amenés à participer à ce projet d'exceptions ?

Tout a commencé fin février 2012 lorsque Luigi Realini, un confrère de l'entreprise Astaldi, avec qui j'avais déjà travaillé sur d'autres projets, m'a contacté pour m'indiquer qu'Astaldi avait décidé de concourir en collaboration avec İçtas à la construction d'une autoroute de 150 km en Turquie incluant un pont sur le Bosphore et qu'il souhaitait faire appel à mes services ainsi qu'à ceux de Jean-François Klein et de T-ingénierie pour la conception de l'ouvrage. Le 25 février, pour être précis, il nous a indiqué qu'il fal-

lait donner une réponse pour le 6 avril suivant. Nous avons réfléchi un petit moment. Et nous avons accepté, malgré les risques. Car tout devait se décider très rapidement, même si nous avons bénéficié d'un délai supplémentaire de 3 semaines. Nous ne disposions que de 9 semaines pour rendre notre copie. Nous avons réussi à présenter un projet qui, dans l'ensemble, est très peu différent de celui dont on vient de claver la travée centrale au dessus du Bosphore à la mi-mars 2016. Ce qui fait qu'en l'espace d'à peine plus de quatre ans, nous sommes passés de la feuille blanche au cla-

vage du dernier voussoir du tablier, ce qui est tout à fait exceptionnel pour un projet de cette ampleur, sachant que les études proprement dites n'ont réellement commencé qu'en juillet 2012. Le chantier s'est ouvert en janvier 2013 avec une cérémonie de pose de la première pierre le 29 mai 2013. Le clavage de la travée centrale sera ainsi intervenu moins de trois ans après le lancement officiel du chantier. C'est le concessionnaire ICA - Joint Venture composée de Astaldi et İçtas - qui a démarré les travaux par les terrassements et les fondations du pont principal était sous-traitée au

groupement coréen Hyundai/SK qui a pris possession des lieux en mars 2013.

Quelles sont les grandes particularités de l'ouvrage ?

Ce pont supporte 2 x 4 voies autoroutières et deux voies ferrées capables de supporter des trains miniers, c'est-à-dire d'une charge de 8 t/m, multipliée allègrement dans les calculs par 1,33 afin de préserver l'avenir, à la demande de l'Union Internationale des Chemins de Fer⁽¹⁾.

Les charges d'exploitation variables que supporte l'ouvrage sont supérieures de plus de 50% à celles de



© ICA



© THIERRY DELÉMONT - T-INGÉNIERIE

son poids propre, sur une portée de 1 408 m - soit presque 2 fois le pont de Normandie -, ce qui en fait le record mondial des ponts ferroviaires.

Le concours demandait un pont suspendu qui, en même temps, soit élégant sur le plan architectural et respecte le style architectural des deux ponts déjà existants dans le détroit. C'est ainsi qu'un unique niveau de circulation a été privilégié plutôt qu'un tablier en treillis à deux étages superposés. La conséquence est un tablier d'une largeur totale de 58,50 m : pour donner une comparaison imagée, l'avenue des Champs-Élysées a une largeur totale de 70 m dont 30 m pour les 8 voies routières.

Compte tenu des charges engendrées par le passage des trains, l'une des difficultés était de réaliser un pont suspendu en caisson, plat et profilé pour réduire l'impact du vent.

Nous avons repris à notre compte une idée du 19^e siècle, que l'on peut qualifier d'hybride, en concevant un pont à la fois haubané à proximité des pylônes et suspendu dans la partie centrale avec une grande zone de transition. Ce schéma d'association suspension/haubanage a déjà été utilisé, par exemple, pour la réalisation du pont de Brooklyn à New York dans les années 1880, à la différence que l'ensemble de la portée du pont est supportée par les deux systèmes combinés. Ensuite la technique n'a plus jamais été utilisée peut-être parce que le besoin ne s'en est pas fait sentir.

Avec les charges induites par les voies ferrées, il fallait retrouver avec un tablier en caisson profilé la rigidité que nous aurait naturellement conférée un tablier en treillis à deux niveaux. Nous avons retrouvé, grâce au haubanage, la rigidité nécessaire de la structure et limité les déformations au passage des trains à des valeurs admissibles.

Avec un pont suspendu classique et un tablier identique, la flèche sous charge atteindrait entre 8 et 9 m alors qu'avec

T-INGÉNIERIE EN BREF

Fondée à Genève en 1920 par l'illustre ingénieur Robert Maillart, T-Ingénierie assure la continuité de plusieurs bureaux d'ingénieurs en nom propre qui ont successivement exercé leur activité à Genève et à l'étranger.

La société est spécialisée en études de structures complexes, et en particulier en ouvrages d'art, assurant les études de conception, de projet et d'exécution, ainsi que la direction et le contrôle de l'exécution des travaux. Bien que d'une taille modeste avec 60 collaborateurs, son rayon d'action est mondial.

La direction de la société est assurée par un conseil d'administration formé d'ingénieurs diplômés de hautes écoles (École Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL) dont fait partie Jean-François Klein, Dr es sc. tech., ingénieur civil EPFL.

De nombreux ouvrages remarquables sont issus de leurs travaux. Plusieurs membres du conseil ont participé activement aux recherches et aux développements des ponts à haubans dans le cadre de l'EPFL et tout au long de leur activité.

la technique que nous avons retenue elle est limitée à 3,65 m.

Le mouvement vertical est très faible en regard de la portée. La charge maximale - train plus voitures - que supporte le tablier est évaluée à 54 % des

charges permanentes, poids propre et superstructures, soit 25 t/m à comparer à 47 t/m.

Tout est différent de ce qui a été réalisé jusqu'à présent dans le dimensionnement, dans les matériaux mis en œuvre, dans les efforts et les déplacements.

En raison de l'importance des charges variables, nous avons choisi des haubans dont la résistance à la rupture est supérieure à celle requise habituellement : elle se situe à 1 960 MPa, contre 1 770 MPa, par exemple, pour le pont de Normandie et 1 860 MPa pour le viaduc de Millau.

Le tablier lui-même est en acier d'une résistance de 460 MPa, avec quelques pièces particulières dans un acier d'une résistance de 690 MPa.

Les 56 voussoirs courants et le voussoir central sont fabriqués dans une installation lourde au bord de la mer de Marmara, conçue pour produire ces pièces d'un poids unitaire de l'ordre de 950 t dont les dimensions sont impressionnantes : 58,50 m de largeur et 24 m de longueur.

1- De gauche à droite : Jean-François Klein et Michel Virlogeux.

2- L'ouvrage tel qu'il se présentait en février 2016.

3- En novembre 2014, achèvement de l'un des pylônes au niveau de la dalle de selle, c'est-à-dire à 304 m de hauteur.

4 et 5- Installation du catwalk en juillet 2015 et préparation de l'assemblage du câble principal.

Comment avez-vous résolu le problème de la rapidité de construction ?

Un autre point du cahier des charges à respecter était évidemment la rapidité de construction : il était mentionné que l'ensemble de l'opération devait se dérouler en 36 mois.

Le fait de ne suspendre que la partie centrale de la grande travée à partir des câbles principaux de suspension nous permettait d'optimiser le délai de construction. La partie haubanée peut être réalisée pendant l'achèvement de la construction des pylônes et pendant le tissage des deux câbles principaux, de telle sorte qu'il ne reste plus, au final, qu'à lever et assembler la partie centrale.

Autre avantage : cela diminue la taille des câbles porteurs et donc le temps de leur réalisation. La partie centrale étant la seule à être suspendue, il n'est pas nécessaire que les câbles porteurs soient en place pour commencer le montage du tablier, d'où un gain de temps très important.

Le premier voussoir en encorbellement a été posé le 25 décembre 2014 et le premier voussoir suspendu à partir des câbles porteurs le 15 janvier 2015. Tout ce qui a été fait avant, c'est autant de temps gagné, sachant que le montage des voussoirs d'un pont suspendu est plus rapide que celui, en encorbellement et à l'avancement, d'un pont haubané.

Si le pont avait été purement suspendu, il aurait fallu attendre la fin de la construction des pylônes et de la fabrication des câbles porteurs pour commencer le montage du tablier.

Il est plus compliqué de réaliser un pont en encorbellement, car cela engendre des efforts de flexion importants lorsqu'un nouveau voussoir est levé depuis le fléau à l'aide d'un lourd derrick, avant que la charge puisse être reprise par une nouvelle paire de haubans ; il faut assurer la soudure complète du nouveau voussoir ▷



sur le précédent avant de passer à l'étape suivante, ce qui prend plus de temps qu'avec un pont suspendu où les connections sont réduites, ce qui permet de placer des équipes sur plusieurs voussoirs à la fois.

Les pylônes, qui sont plus hauts que la tour Eiffel, présentent-ils des particularités ?

La portée de l'ouvrage requise par les conditions du concours positionnait un pylône dans le Bosphore. Nous avons réussi à convaincre le concessionnaire qu'il était préférable d'implanter les pylônes sur les rives pour sécuriser au maximum le planning, c'est-à-dire d'éviter les travaux off-shore, de façon à s'affranchir de l'ensemble des problèmes administratifs et réglementaires liés au trafic maritime.

Nous lui avons proposé de passer des 1 275 m de portée requis dans l'appel d'offre à 1 408 m, ce qui n'est pas un petit pas, pour sécuriser les fondations en posant les pylônes sur les rives. Il nous a heureusement suivi dans ce choix ce qui a permis de réaliser les fondations dans un délai record, d'autant que le sous-sol est de bonne qualité. Cela n'aurait sans doute pas été le cas si les pylônes avaient été construits dans le détroit : chaque jambe de pylône - il y en a deux par pylône - s'appuie sur un puits de fondation cylindrique de 20 m de diamètre et 20 m de hauteur.

Les pylônes eux-mêmes sont des ouvrages en béton d'une hauteur de 325 m, qui comportent en partie haute, à partir de 208 m et jusqu'à 304 m, les 88 pièces en acier (22 par jambe de pylône) qui assurent l'ancrage des haubans, un à l'avant et un à l'arrière. Entre 304 m et 325 m d'altitude sont installées les selles de déviation des câbles principaux.

Les travées de rive sont extrêmement courtes ce qui a entraîné des dispositions particulières au niveau des haubans : les cinq plus grands

MICHEL VIRLOGEUX : L'HOMME DES 100 OUVRAGES D'ART

Polytechnicien et ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Michel Virlogeux a contribué au développement de nombreuses techniques de construction modernes, notamment dans les domaines de la précontrainte extérieure au béton et des ponts à haubans.

Ingénieur conseil indépendant depuis 1995, après 20 ans passés au SETRA, dont 15 comme chef de la division des grands ouvrages en béton, puis en béton et en métal. Il compte à son actif plus de 100 ouvrages d'art dont plusieurs font référence dans le monde et ont d'ailleurs été primés. Parmi les plus récents : pont de Normandie, viaduc de Millau, pont Gustave Flaubert à Rouen, pont de Térénez en Bretagne, pont Jacques Chaban-Delmas à Bordeaux...

haubans arrière sont ancrés, non dans le tablier, mais directement dans le sol. Il en résulte une situation particulière. L'effet horizontal de ces haubans ancrés dans le sol est compensé par une traction de 8 000 t dans la partie centrale de la grande travée.

Et le système de suspension, en quelques mots ?

Le tablier de l'ouvrage est porté par un système de suspension hybride comprenant 176 haubans multi-torons, représentant 8 400 t d'acier et dont le plus long mesure 588 m, et deux câbles de suspension de 2 420 m de long auxquels sont suspendues 34 paires de suspentes verticales soutenant la partie centrale du pont. La portée de 1 408 m constitue un nouveau record dans la catégorie des ouvrages à haubans, qui est actuellement détenu par le pont de l'île Russky à Vladivostok, avec 1 104 m.

Les dimensions des câbles de haubannage sont à la mesure de l'ouvrage : les plus petits sont constitués de 91 torons, les plus gros de 155 torons. Par comparaison, les plus gros câbles du pont de Normandie comportent 55 torons, ceux du viaduc de Millau, 91 torons. Le câble principal, d'un diamètre de 790 mm, est constitué d'un

assemblage de fils de 5,40 mm de diamètre en acier 1 860 MPa formant des torons hexagonaux de 127 fils assemblés en 122 paquets pour les travées de rive et 113 paquets pour la travée centrale. Les paquets sont comprimés pour former un ensemble circulaire autour duquel sont mises en place la protection contre la corrosion et l'étanchéité, ce qui aboutit au diamètre final.

Le pont Yavuz Sultan Selim marque-t-il une étape dans la conception et la réalisation des futurs grands ouvrages ?

Il s'inscrit dans l'évolution actuelle des projets d'ouvrages d'art qui prennent des dimensions de plus en plus impressionnantes et, surtout, font partie intégrante de lots de travaux tout aussi démesurés.

Il y a actuellement en construction de nombreux projets de cette ampleur dans le monde aux États-Unis, au Canada, en Turquie. On constate une augmentation de la taille des projets qui est peut-être due au fait que les techniques actuelles permettent de réaliser des ouvrages qu'il n'aurait pas été possible de construire il y a 30 ans et que l'on peut entreprendre aujourd'hui pour plusieurs raisons.

Nous avons désormais une maîtrise plus grande qu'autrefois des forces physiques telles que celles engendrées par le vent et les séismes.

L'informatique a progressé également mais elle ne constitue toujours qu'un outil et seulement un outil facilitant le travail.

À cela s'ajoute une évolution au niveau du financement. Les projets de concession sont de plus en plus nombreux, avec des partenariats public/privé. D'une façon générale, les États sont exsangues. Pour réaliser des projets de grande envergure, ils font donc appel à des partenaires privés. C'est le cas du pont sur le Bosphore dont nous venons de parler. C'est le cas pour le viaduc de Millau, comme pour bien d'autres. On pourrait multiplier les exemples. À partir de là, il est nécessaire d'atteindre une taille critique pour assurer la rentabilité à terme d'un projet. Il faut que les revenus du péage soient suffisants pour financer un grand projet ou que soit mis en place un système de loyer versé au concessionnaire par l'État concerné, lorsque l'opération n'est pas financable uniquement par le péage. Une autre raison est que l'on a vu se développer, au fil des dernières années, des entreprises de plus en plus puissantes dont la taille, et donc les moyens, sont de plus en plus importants.

En France, il y a une quarantaine d'années, dans les appels d'offre, quinze à vingt entreprises étaient capables de concourir pour construire de grands ouvrages. Aujourd'hui, le paysage s'est réduit à trois, voire quatre groupes, d'une taille suffisante tant financière qu'en hommes et en moyens techniques pour s'engager dans une concession.

Il en est de même au niveau mondial. Il s'est créé une catégorie d'entreprises internationales - Vinci et Bouygues, en France, Skanska, en Suède, Dragados, en Espagne, par exemple, sans parler des asiatiques, qu'elles soient

© THIERRY DELÉMONT - T-INGÉNIERIE



Chinoises, Coréennes ou encore Japonaises - une douzaine au total à l'échelle de ces très grands projets et qui, en général, lorsque le projet le justifie, se regroupent à plusieurs.

La préqualification pour concourir à de tels projets atteint également des sommets : actuellement, pour pouvoir participer à la préqualification pour la construction du quatrième pont sur le canal de Panama, il est demandé au leader du groupement candidat un chiffre d'affaires annuel de 6 milliards de dollars. De tels projets ne peuvent donc s'adresser qu'à des entreprises d'une taille énorme.

Cette évolution s'accompagne du fait, préoccupant pour des sociétés comme la nôtre, que l'on a tendance à voir apparaître des ingénieries de plus en plus grosses, constituées à la suite d'une succession de rachats de bureaux d'étude de toutes tailles, mais qui n'ont pas toujours la compétence technique que l'on peut trouver dans des bureaux d'études très spécialisés comme T-Ingénierie en Suisse ou Leonhardt en Allemagne.

Ces grandes ingénieries ont en portefeuille de nombreuses références parce qu'elles sont réparties dans le monde entier, ce qui leur permet de satisfaire un cahier de références en « piquant » des exemples de travaux auxquels elles auront participé de près ou de loin. Cette mondialisation présente un grand danger dans l'évolution du panel des bureaux d'études moyens ou petits.

Sur un projet comme celui du pont sur le Bosphore, combien de personnes sont-elles intervenues au niveau des études ?

Dans le temps extrêmement court dont nous disposons, nous avons mobilisé une équipe d'une centaine de personnes pour la production, en un peu plus d'une année, de quelques 5 000 plans d'exécution et 400 notes de calcul.

C'est une force de frappe qu'il faut mobiliser du jour au lendemain. Nous avons préparé le concours de février à fin avril 2012.

Nous avons reçu le résultat fin mai 2012 et nous avons eu le feu vert fin juillet 2012.

Des évolutions sont-elles prévisibles au niveau des matériaux ?

Ce n'est pas encore pour demain pour les très grands ouvrages, mais des matériaux commencent à être utilisés pour des réalisations de taille moyenne : des câbles en carbone, qui sont encore très coûteux, des fibres et du balsa pour avoir des structures extrêmement légères ainsi que des matériaux composites.

Jusqu'à présent, ils ont été mis en œuvre essentiellement pour des réalisations dans le nautisme ou sur des structures limitées dans leur utilisation. L'absence de normalisation et une problématique de contrôle de qualité freinent leur développement pour des ouvrages publics.

Ces matériaux sont désormais utilisés dans la construction aéronautique. Un pas a donc été franchi dans l'industrie et il est vraisemblable que l'on va également le franchir dans les constructions.

6- Installation du câble principal de 790 mm de diamètre.

7- Compactage du câble principal pour lui donner une forme circulaire.

8- Montage des segments suspendus du tablier central.

9- Un collier de suspente des câbles du tablier central en place sur le câble principal.

Et le BFUP ?

Il y a encore un grand pas à faire avant de remplacer le béton traditionnel par du BFUP et l'intérêt ne se situe pas à ce niveau, sauf pour de petits ouvrages tels que les passerelles qui ont une autre vocation.

Par contre, il y a des niches possibles pour utiliser le BFUP pour ses particularités et ses caractéristiques propres dans des applications bien spécifiques, par exemple, pour renforcer des dalles orthotropes en acier. Ce sont des applications qui ont déjà été réalisées aux Pays-Bas et qui sont envisagées aux Etats-Unis.

La difficulté réside dans la liaison entre la tôle et ce BFUP. Plusieurs viaducs ont déjà été renforcés en Suisse avec une réfection de la surface en BFUP, mise en œuvre avec une machine spéciale de pose identique à celle utilisée pour la pose d'enrobés.

Nous ne sommes pas encore convaincus pour les ouvrages eux-mêmes car il y a des effets d'échelle qui ne sont pas bien maîtrisés, notamment des phénomènes de retrait considérables pour les BFUP coulés en place.

En revanche, on pourrait très bien combiner l'étanchéité et le revêtement avec du BFUP en repensant les ouvrages différemment.

Il faut faire évoluer les structures pour utiliser les nouveaux matériaux à bon escient, en ne se contentant pas de les mettre en œuvre en simple remplacement des matériaux existants.

Ce sont des défis que l'on va avoir à relever dans les années à venir. □

1- L'U.I.C. est une organisation internationale qui compte notamment 81 membres actifs dont les Chemins de fer d'Europe, de Russie, du Proche-Orient, du Maghreb, de l'Afrique du Sud, de l'Inde, du Pakistan, de la Chine, du Japon, de la Corée, du Kazakhstan, et de compagnies à rayonnement mondial. Son rôle est de promouvoir le transport ferroviaire à l'échelle mondiale et relever les défis de la mobilité et du développement durable.

QUELQUES CHIFFRES

COÛT DU PROJET :
800 millions d'euros

LONGUEUR TOTALE :
2 164 m

PORTÉE CENTRALE :
1 408 m

LARGEUR DU TABLIER :
58, 50 m

HAUTEUR DES PYLÔNES :
321,90 m

LES INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : KGM (ministère des transports de Turquie)

CONCESSIONNAIRE : ICA - (Joint Venture italo-turque composée de İctas Insaat et Astaldi S.P.a)

CONCEPTION : Jean-François Klein T-Ingénierie (Genève), Michel Virlogeux Consultant (Paris)

CONSTRUCTION : Hyundai Engineering & Construction / SK Engineering & Construction (Corée)

ÉTUDES D'EXÉCUTION : T-Ingénierie, Michel Virlogeux Consultant, Greisch (Belgique), Grid (Portugal), Lombardi (Italie)

ESSAIS EN SOUFFLERIE ET ÉTUDES CLIMATIQUES : Cstb - Nantes (France), Polytecnico di Milano (Italie)

MISSION DE CONTRÔLE POUR LE CONCESSIONNAIRE : Setec Tpi (France)

© ICA

8



© THIERRY DELÉMONT - T-INGÉNIERIE

9

