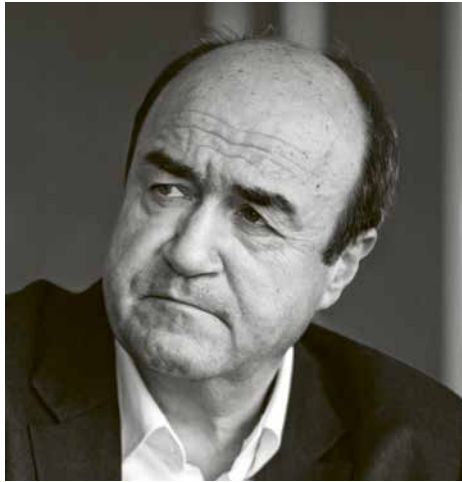


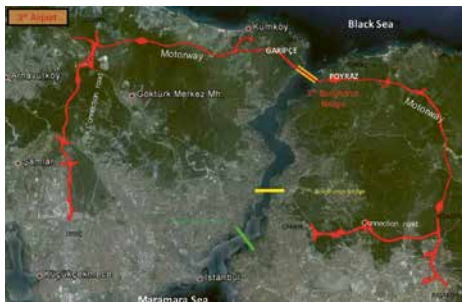
# Ingénierie et construction : Le défi des grands ouvrages avec le 3<sup>ème</sup> pont sur le Bosphore.

Au travers de l'exemple de la construction du troisième pont sur le Bosphore, nous apportons notre vision de modeste acteur Suisse dans ce monde de l'ingénierie des grands ouvrages d'art.



Jean-François Klein  
Dr es sc. Tech, Ing. civil EPFL,  
administrateur de T-engineering intl SA

De par le monde, de nombreux grands ouvrages sont en projets ou en construction. Des ouvrages ou des ensembles d'ouvrages de plus en plus importants, ambitieux dépassant souvent toutes les limites atteintes à ce jour. Quel avenir pour ces ouvrages, quels défis techniques et organisationnels vont de-voir être relevés pour en assurer la construction ?



## Le concours pour le troisième pont sur le Bosphore

Fin février 2012, le KGM (Ministère des transports de Turquie) publiait les documents d'appel d'offres pour la concession de l'autoroute Nord Marmara, comprenant la conception et la construction du troisième pont sur le Bosphore (Yavuz Sultan Selim Bridge).

Reliant l'Europe à l'Asie, le pont principal est appelé à devenir une structure emblématique et exceptionnelle, une nouvelle icône de la région d'Istanbul. Pour un tel symbole, les autorités ont clairement exprimé leur souhait de construire un ouvrage à haute valeur architecturale en dépit des contraintes fonctionnelles exceptionnelles que devra satisfaire le nouveau franchissement.



Figure 1: Situation du projet autoroutier et du troisième pont sur le Bosphore

Les exigences principales du concours peuvent se résumer en 5 points :

- Compte tenu de la largeur de sécurité nécessaire pour le chenal de navigation, la portée minimale requise est fixée à 1275 m.
- Le pont doit permettre le passage de 2 fois 4 voies de circulation en plus de 2 voies ferrées et 2 trottoirs principalement utilisés pour l'accessibilité et la maintenance.
- Le pont doit être un pont suspendu.
- L'esthétique est un facteur essentiel. Le pont doit s'inscrire dans la ligne architecturale des deux ponts existants traversant le Bosphore au centre-ville d'Istanbul.
- Le pont doit être achevé en 36 mois, après 6 mois de projet et de préparation.

### Conception générale

Arriver à combiner ces contraintes dans une structure élégante et efficiente a été un incroyable challenge. Un concours de 6 semaines durant lesquelles de con-

ou encore sur les sollicitations de vent n'étaient à disposition.

Le deux ponts existants (construits à 10 années d'intervalle) ont été clairement choisis pour leur élégance et leur finesse. Ils ont été directement inspirés du pont suspendu du Severn qui venait d'être construit avant le premier et qui a révolutionné la conception de ponts suspendus en présentant un tablier profilé aérodynamique sous forme d'un caisson unique orthotrope de l'ordre de 3,50 m de hauteur statique. Un véritable fil traversant le Bosphore, une structure extrêmement simple et sobre dont l'élégance et la légèreté s'exprime au travers de sa finesse.

Ce fut notre principale inspiration qui nous a immédiatement conduit vers un concept de caisson orthotrope profilé de faible hauteur. Mais le troisième pont doit assurer le passage de deux lignes ferroviaires, ce qui est une différence fondamentale avec les deux premiers. L'impact des charges de trafic lourd sur



Figure 2: Premier pont sur le Bosphore – un ouvrage à la pointe de la technologie à sa construction.

cert avec Michel Virlogeux nous avons redoublé de créativité et d'esprit innovant pour mettre sur plans un projet et un design à la hauteur technologique et architecturale du symbole qu'il est destiné à devenir. Un exercice d'autant plus périlleux qu'aucune donnée de base sur les conditions géotechniques

une structure aussi souple est déterminant. Si dans un pont routier traditionnel (suspendu) le ratio entre le poids propre du tablier et les surcharges de trafic est de l'ordre de 25 %, il est de plus de 60 % dans le cas du Bosphore, compte tenu du nombre de voies de circulation et de la présence du train.

En fait, il y a très peu de ponts suspendus ferroviaires à longue portée dans le monde entier (environ 8). Le plus long étant le Tsing Ma Bridge à Hong Kong avec une portée de 1345 m.

Les conditions d'exploitation d'une ligne ferroviaire imposent une limitation stricte des pentes longitudinales et transversales, ainsi que des rotations localisées à l'extrémité de l'ouvrage au droit des joints, ceci pour assurer l'intégrité des rails. Pour ce faire, une rigidité d'ensemble est requise pour la structure, afin de répartir au mieux les lourdes charges des convois sur une grande longueur et limiter les déplacements relatifs.

Dans tous les ponts existants, l'exigence forte de rigidité a été systématiquement réalisée en ayant recours à des treillis à deux niveaux de grande hauteur (12–15 m) supportant le trafic routier au niveau supérieur et le trafic ferroviaire au niveau inférieur. Si cela permet également de limiter la largeur de l'ouvrage, il en résulte malgré tout une structure extrêmement lourde et inélégante qui à nos yeux était loin de pouvoir répondre aux exigences architecturales exprimées par les autorités.

Pour résoudre ce problème tout en maintenant un caisson profilé de faible hauteur avec l'ensemble du trafic sur un seul niveau, nous avons recherché la rigidité dans l'ensemble de la structure plutôt que dans le tablier et notamment dans le système de câblage. L'adjonction de câbles de rigidification dans les deux premiers tiers de la portée principale et la limitation de la partie suspendue pure à environ un tiers de la portée a été la réponse adéquate à ce problème. L'efficacité structurelle est redoutable avec des déplacements ré-

duits d'un facteur 3 par rapport à un pont suspendu traditionnel à deux niveaux de portée équivalente et une stabilité naturelle au séisme et aux effets du vent nettement accrue.

Un travail architectural soigné sur la géométrie des pylônes avec des branches inclinées, sans entretoise sur la hauteur a également permis de positionner les câbles principaux dans un plan vertical séparant les chaussées routières des voies de chemin de fer centrales et de jouer avec la position relative des câbles de rigidification entre l'extérieur du tablier sur la travée centrale, et le centre sur les travées de rive. Cet effet souligne le passage du détroit et ouvre la visibilité sur le Bosphore et la ville d'Istanbul pour les utilisateurs, tout en prodiguant des effets visuels de moirés à l'approche et à la traversée de la structure.

Nous avons proposé d'augmenter la portée de l'ouvrage à 1408 m afin de rester sur les rives avec les pylônes, soupçonnant la présence de roches de très bonnes qualités dans ces zones. Malgré le surcoût d'une telle modification cela évitait la construction de fondation offshore et donc limitait les risques d'aléas, les impacts écologiques dans le Bosphore, l'interaction avec le trafic maritime et surtout assurait une maîtrise des coûts et du planning.

L'ensemble de ces mesures proposées durant le concours ont abouti à un concept inédit de pont suspendu à haute rigidité présentant une dynamique et une esthétique aboutie qui s'intègre parfaitement dans le site. Rares sont les ouvrages de génie civil de grande envergure qui rassemblent à la fois une efficacité structurelle optimisée de la sorte.



Figure 3 : Yavuz Sultan Selim Bridge, après inauguration en août 2016

### Dimensions principales

Les sondages géotechniques effectués à l'automne 2012 ont confirmé nos suspicions et ont démontré l'excellente qualité de la roche en bordure du détroit et ont ainsi confirmé la pertinence de l'allongement de la portée à 1408 m. Les fondations des deux pylônes ont pu ainsi être construites à sec, sans enceinte provisoire, et ce à moins de 15 m du bord de mer. Un gain de temps et d'argent considérable.

Les pylônes ont une hauteur de 329,9 m au-dessus du niveau moyen de la mer. Cela en fait les pylônes en béton les plus haut du monde. Par rapport à un pont suspendu traditionnel de même portée, la hauteur des pylônes est nettement plus importante, ceci pour apporter de l'efficacité aux haubans et augmenter la rigidité d'ensemble.

La portée principale de 1408 m est divisée en cinq zones. Une partie centrale purement suspendue, deux zones de transition avec un câblage mixte permettant une transition progressive de la rigidité et deux zones latérales supportées par les haubans de rigidification directement depuis les pylônes. Cette disposition permet d'accompagner et de répartir les déformations relatives de l'ouvrage sous les charges lourdes par une rigidification progressive de la structure.

La conséquence directe d'un tablier profilé de faible hauteur est évidemment sa largeur. Pour assurer le passage de deux fois 4 voies d'autoroute, de 2 voies de chemin de fer et de 2 trottoirs sur un seul niveau, la largeur du tablier est poussée à 58,50 m, ce qui en fait également un record pour un caisson monolithique. La hauteur du profil au centre est de 5,35 m. Sur une portée de 1408 m, il se présente ainsi comme un véritable fil traversant le détroit à plus de 80 m de hauteur.

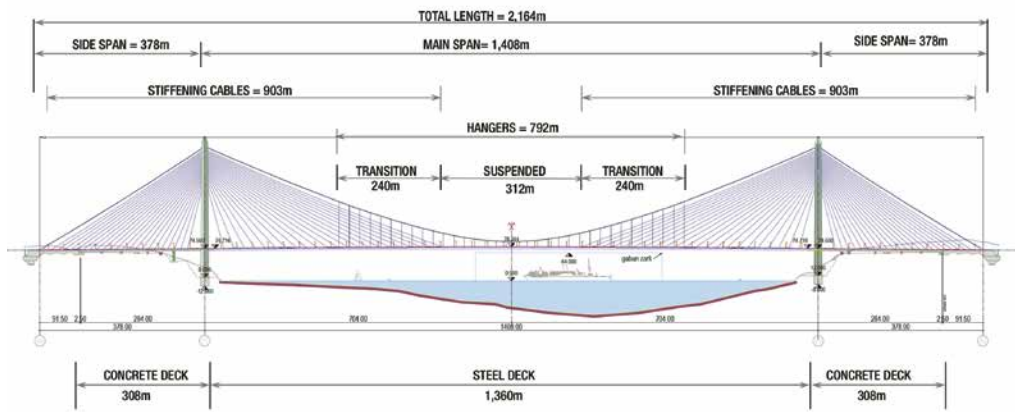


Figure 4 : Elévation géométrique globale de l'ouvrage - définition des zones structurales

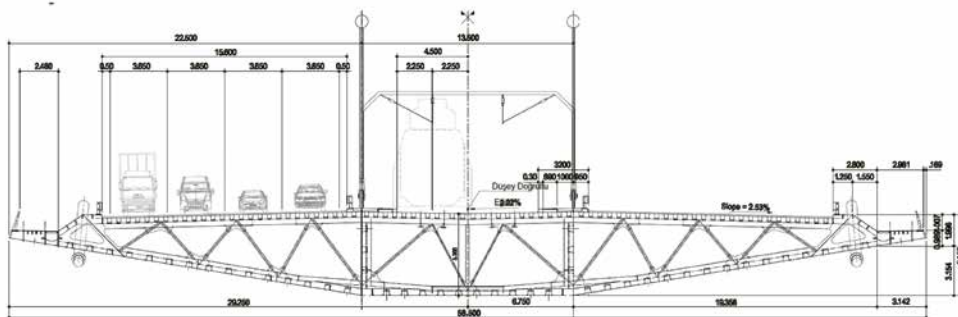


Figure 5 : Coupe fonctionnelle de l'ouvrage

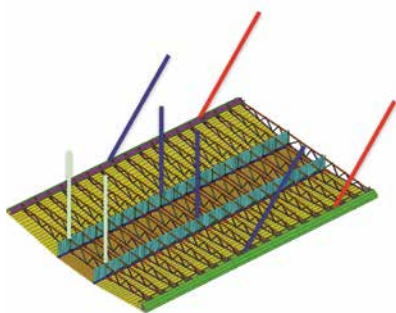


Figure 6 : Illustration des trois modes de suspension du tablier – construction simultanée de la partie en encorbellement haubanée et de la pose des câbles principaux





Figure 7: Le dessin des pylons, un pur exemple d'ingénierie sculpturale



Figure 8: Levage d'un segment type: 24 m de longueur, 58,50 m de largeur, poids 900 to

### Un concentré de technologie et d'innovations

Il est évident que le succès de cette construction réside dans le soin qui a été apporté à son développement et à l'énergie qui a été mise en œuvre pour trouver les bonnes solutions permettant d'atteindre son niveau d'efficacité structurelle. Notons quelques points clés et quelques développements qui ont été nécessaires pour assurer la construction de cet ouvrage :

- Record du monde de portée des ouvrages à trafic mixtes et à trafic ferroviaires;
- Première application moderne d'un concept de câblage hybride (suspendu et haubané) exploitant les limites des possibilités de calculs électroniques et utilisant des systèmes de câblage modernes ;
- Record du monde de largeur pour des tabliers métalliques et bétons ;
- Première application d'un système hybride pour les ponts ferroviaires ;
- Première utilisation de haubans en acier 1960 N/mm<sup>2</sup> ;
- Premier ouvrage stabilisé et équilibré par une traction du tablier au centre de l'ouvrage ;
- Première application moderne d'un concept de câblage hybride (suspendu et haubané) exploitant les limites des possibilités de calculs électroniques et utilisant des systèmes de câblage modernes ;
- Premier ouvrage de cette dimension avec une rigidité intrinsèque aussi

élevée grâce au câblage combiné et à la grande largeur ;

- Premier ouvrage de cette importance à déplacements contrôlés par des appuis pendulaires à double calotte sphériques (développés pour l'occasion) ;
- Beaucoup de composants ont des dimensions hors normes et ont dû être développés par extrapolation d'éléments courants ;
- Dimensions et poids des segments de tablier record, ayant nécessité la conception d'un système de levage spécifique et de maîtrise des déformations durant le levage ;
- Une conception dans laquelle le planning extrêmement serré (3 ans de construction) a été un paramètre et une contrainte influents et pris en compte dès le début. La simultanéité des tâches rendue possible par le système hybride de câblage a été un élément clé du succès ;
- Une grande avancée dans l'élégance et l'architecture des ouvrages

de longue portée à trafic combiné (rail-route). Jusqu'ici tous les ouvrages réalisés l'ont été à deux niveaux avec une apparence extrêmement lourde.

Cet exemple marquant démontre à quel point l'esprit créatif et d'innovation permet de résoudre des problèmes complexes et d'aboutir à des résultats remarquables. Cette approche est particulièrement vérifiée dans le domaine des grands ouvrages où les aspects techniques et économiques ont une importance primordiale et nécessitent des concepts efficaces.

### **Le concept « hybride » est-il l'avenir des grands ouvrages ?**

On ne peut être catégorique, l'exemple du troisième pont sur le Bosphore ouvre des portes et apporte des solutions intéressantes en termes de coûts et de délais de construction. Il est particulièrement efficace en cas de chargements lourds, mais est clairement un peu plus compliqué à construire qu'un ouvrage



Figure 9 : Le pont Yavuz Sultan Selim en service – un lien entre l'Europe et l'Asie, porte d'entrée d'Istanbul



suspendu traditionnel. Nous avons récemment fait une étude pour le franchissement du détroit des Dardanelles qui va bientôt représenter le record du monde de portée des ponts routiers avec ses 2023 m. Même si les conclusions étaient particulièrement favorables, avec une rigidité globale nettement supérieure et un délai de construction d'environ 4 mois plus court le concessionnaire a préféré opter pour une suspension traditionnelle afin d'éviter les complications potentielles des ancrages dans le tablier et l'augmentation de hauteur des pylônes nécessaire pour un système hybride, justifiant son choix par le fait que l'ouvrage n'est que routier.

L'ouvrage hybride apporte une élégance et une dynamique complémentaire par rapport au calme et à l'image traditionnelle d'un pont suspendu. C'est un atout dans le développement architectural des grands ouvrages dont l'esthétique est aujourd'hui considérée, évaluée et valorisée, au-delà de la vision purement fonctionnelle qui conférerait jusqu'alors souvent une élégance naturelle à la structure en raison de sa taille, mais sans raffinement.

## Les défis des grands ouvrages ne sont-ils que techniques ou esthétiques ?

Le pont Yavuz Sultan Selim 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 ou en planification, de nombreux projets de cette ampleur dans le monde. 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.

L'informatique a progressé énormément, mais elle ne constitue toujours qu'un outil et seulement un outil facilitant le travail. La conception et la logique structurelle restent le moteur et la clé du système.



Figure 10: Proposition d'ouvrage hybride pour le franchissement des Dardanelles – portée 2023m

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

Mais il y a quelques facteurs moins techniques et plus délicats qui ne vont pas tous forcément dans le bon sens. Tout d'abord une évolution dans le financement des ouvrages. Les collectivités publiques s'essoufflent et ne peuvent plus assurer le financement de projets de telles ampleurs. En conséquence les projets de concession sont de plus en plus nombreux, avec des partenariats public/privé. De très nombreux projets en témoignent. A partir de là, il est nécessaire d'atteindre une taille critique pour assurer la rentabilité à terme d'un projet.

Pour assurer le financement et fournir les garanties nécessaires, il faut également des entreprises avec des reins suffisamment solides pouvant démontrer des capacités financières hors normes. A force, il s'est créé une catégorie d'entreprises internationales énormes, une douzaine au total dans le monde à l'échelle de ces très grands projets et qui, en général, lorsque le projet le justifie, se regroupent encore à plusieurs. Il n'est pas rare pour ces grands projets de n'avoir que 1 à 3 offres voire aucune réponse, les conditions pour être préqualifié ne serait-ce que pour concourir atteignant des sommets. En conséquence, on a de plus en plus à faire à des organismes purement financiers, comme dans beaucoup de domaines, dans lesquels l'aspect technique n'a que peu d'intérêt et qui sacrifient tout y compris la qualité et la durabilité au profit du rendement financier. Il n'y a plus de place pour les moyennes et grosses entreprises soucieuses de

la qualité de leur travail. Ceci va à l'encontre du développement souhaité des ouvrages qui se veulent à la base d'une qualité et d'une architecture de plus en plus soignées.

Cette évolution s'accompagne d'un fait, préoccupant pour des sociétés comme la nôtre, à savoir l'apparition d'ingénieries de plus en plus grosses, constituées à la suite d'une succession de rachats de bureaux d'étude de toutes tailles, qui se vantent de pouvoir aligner des milliers d'ingénieurs, mais qui n'ont pas toujours la compétence technique que l'on peut trouver dans des bureaux d'études très spécialisés. Comme par tout, la quantité ne fait pas la qualité !

Une réalisation telle que celle présentée ci-dessus qui a été emportée grâce à ses atouts techniques, environnementaux, esthétiques et économiques et qui a été menée tambours battants dans un délai record en se concentrant sur les points techniques et la qualité est dans cette évolution de plus en plus difficile à réaliser. Preuve en est le nombre de ces réalisations qui finissent en procédures judiciaires diverses durant des années après la fin du chantier, et ce de manière aujourd'hui quasi systématique.

## Conclusion

Le domaine de la planification et de la construction des grands ouvrages est en pleine évolution structurelle. On doit malheureusement constater une dérive institutionnelle et administrative avec une emprise forte et grandissante des instituts financiers qui va très clairement au détriment de la qualité globale des projets, l'accent n'étant pas mis là où la technique nécessiterait de le faire.

Paradoxalement, les besoins sont grandissants et les exigences techniques plus strictes en raison des défis lancés qui sont toujours plus compliqués, la société cherchant à relier des zones soumises à des climats hostiles ou dans des endroits de plus en plus compliqués. L'exemple du projet de la fameuse route E39 en Norvège avec des ouvrages atteignant les 3000m de portée est un bon exemple de cette évolution. A cela s'ajoute la volonté d'un travail architectural plus soigné sur ces ouvrages, qui devra être contrôlé pour ne pas sombrer rapidement dans l'extravagance.

Si l'évolution des besoins est positive, il est à craindre que l'évolution structurale des entreprises et des bureaux d'étude et leur mode de fonctionnement limite fortement les capacités ou plutôt les possibilités de laisser libre cours à la créativité et au développement qui sont indispensables à l'évolution de tels projets. Un danger réel existe de voir disparaître l'efficacité de structures spécialisées petites à moyennes dans ce genre d'opération.

