

Conception, comportement en service et en construction du troisième pont suspendu sur le Bosphore

V. de Ville de Goyet¹, J.Y. Del Forno², A. Propson³, Ch Peigneux⁴, M. Laethem⁵

¹Bureau Greisch, Liege Science Park, Allée des Noisetiers, 25, 4031 Angleur, vdeville@greisch.com

²Bureau Greisch, jydel forno@greisch.com

³Bureau Greisch, apropson@greisch.com

⁴Bureau Greisch, cpeigneux@greisch.com

⁵Bureau Greisch, m laethem@greisch.com

RÉSUMÉ .En avril 2012, le consortium turco-italien İçtas-Astaldi a remporté un marché de concession englobant la construction d'un complexe autoroutier de 165 km de longueur et d'un nouveau pont suspendu sur le Bosphore dans le cadre d'un contournement de la mégalopole, Istanbul. D'une longueur totale de 2240 m, ce nouveau pont hybride, suspendu-haubané, aura une portée centrale de 1408 m. A l'instar du pont de Brooklyn (New York), la travée principale est soutenue directement aux pylônes par des haubans, d'une part, et à des câbles de suspension principaux au moyens de suspentes verticales, d'autre part. L'enjeu était de concevoir un ouvrage aussi élancé que les ponts suspendus existants déjà à Istanbul alors que cette fois-ci, il est destiné à supporter à la fois 8 voies de circulation routière et 2 voies ferroviaires. La suspension hybride haubans/suspentes verticales a nécessité une étude approfondie du réglage pour maîtriser la répartition des efforts. Bien que globalement plus rigide, le haubanage induit des déplacements longitudinaux importants sous le passage des trains. La méthodologie de montage a fait l'objet de plus de 20 scénarios différents, scénarios qui avaient pour but d'optimiser le temps de construction.

ABSTRACT. . In April 2012 the Turkish-Italian consortium İçtas-Astaldi won the contract for the construction of a motorway complex of 165 km including a new suspension bridge over the Bosphorus as a by-pass around the Megalopolis of Istanbul. With a total length of 2240m this hybrid suspension/cable-stayed bridge has a central span of 1408m. Like the Brooklyn bridge (New York), the central span will be on the one hand directly supported by the pylons by means of stay cables and on the other hand supported by the main cables by means of vertical suspension cables. The challenge was to design a bridge that was as slender as the two existing suspension bridges in Istanbul while here 8 road lines and 2 rail tracks had to be carried. The hybrid support system of stay cables and vertical suspension cables required a profound study of the cable adjustments in order to control the distribution of the internal forces. Even though the stay cables create globally a more rigid support system, the passage of trains over the bridge induces important longitudinal displacements. In the attempt to optimize the construction time, more than 20 different erection methodologies have been analysed.

MOTS-CLÉS : pont suspendu, hauban, suspente, statique, méthode de construction,

KEY WORDS: suspension bridge, cable stay, hanger, statics, construction method

1. Introduction

Mégalopole située à la croisée de deux continents, Istanbul compte aujourd'hui plus de 17 millions d'habitants répartis sur les deux rives du Bosphore. Afin de désengorger le centre-ville et de permettre la poursuite de son expansion, les autorités turques ont lancé la réalisation d'un contournement de la ville par le Nord (fig.1.). Ce vaste chantier comprend 165 km d'autoroute, plusieurs tunnels et ouvrages d'art, dont un ouvrage majeur de traversée du détroit du Bosphore à proximité de la Mer Noire.



Figure 1. *Projet de contournement d'Istanbul*

En avril 2012, le consortium turco-italien İctas-Astaldi a remporté un marché de concession englobant la construction de ce pont hors norme dont on doit le design à Michel Virlogeux et à Jean-François Klein, directeur du bureau d'études suisse T-Ingénierie. Le bureau Greisch a rejoint l'équipe dès juin 2012 pour mettre au point le projet et prendre part aux études d'exécution.

2. Description générale de l'ouvrage.

Les critères les plus contraignants du concours étaient

- de permettre le franchissement pour 8 voies routières, 2 voies ferroviaires et 2 voies piétonnes,
- d'avoir la typologie d'un pont suspendu à l'image des deux ponts existants à Istanbul (Fig.2.).



Figure 2. Les deux premiers ponts suspendus sur le Bosphore

Lorsqu'il faut combiner deux modes de circulation, route et chemin de fer, la solution la plus courante est de les localiser à deux niveaux différents : la route, en partie supérieure du tablier et le chemin de fer, en partie inférieure. Dans ce cas, le tablier a la structure d'un treillis dont la hauteur est de l'ordre de 15 m. Un tel tablier a une raideur flexionnelle qui permet de limiter quelque peu la déformée.

Or, les deux ouvrages existants à Istanbul sont caractérisés par la finesse de leur tablier. L'objectif des concepteurs a été de trouver une solution de franchissement avec la même élégance. Les deux modes de circulation devaient donc être localisés au même niveau. La hauteur du tablier pouvait alors se limiter à 5-6 m. Mais, dans ces conditions, son inertie est faible et son comportement lors du passage du trafic risquait d'être problématique.

Si un pont suspendu permet de reprendre efficacement un chargement uniformément réparti, ce n'est plus le cas pour des charges variables. Un tablier souple n'arrangeait rien. C'est pourquoi, il a été décidé d'utiliser une

suspension hybride comme pour le pont de Brooklyn (Fig.3.) : le tablier est suspendu (Fig.4.), en travée centrale, par une double nappe

- de 2 x 22 haubans, appelés câbles de rigidification, ancrés dans les pylônes,
- de 2 x 17 suspentes verticales, attachées à deux câbles de suspension.



Figure 3. Pont de Brooklyn

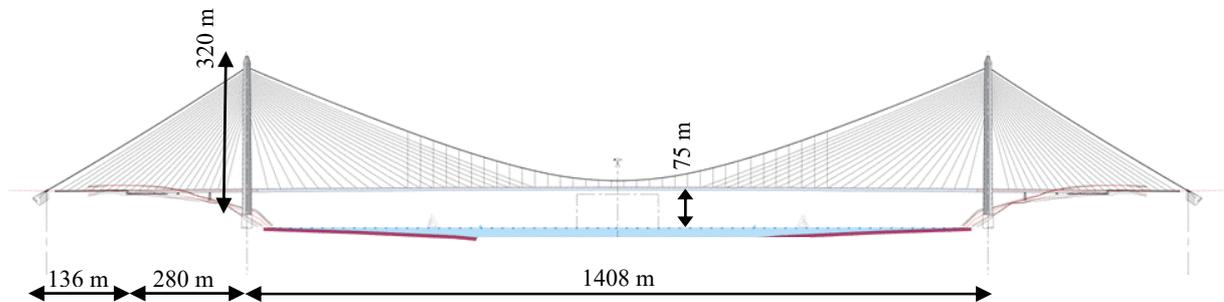


Figure 4. Vue en élévation du 3^{ème} pont sur le Bosphore et image de synthèse.

Avec une travée centrale de 1408 m, les haubans les plus longs sont ancrés à 548 m, L' , des pylônes et les suspentes verticales achèvent la suspension en partie centrale. Cette disposition conditionne la hauteur des pylônes au-dessus du tablier ; pour un pont suspendu, elle est de l'ordre de 1/12 à 1/10 de la portée et pour un pont haubané, de l'ordre de 1/5. Ce sont donc les plus grands haubans qui conditionnent sa hauteur :

$$H_{\text{pylônes}} : 75 \text{ m} + (2 \times L') / 5 \approx 300 \text{ m} \quad [1]$$

Les figures 5 et 6 montrent la disposition de différentes voies de circulation et la localisation de la suspension dans la section transversale.

Le tablier de la travée centrale est métallique ; son poids linéaire est de 450 kN/m (340 kN/m pour la structure et 110 kN/m pour les équipements).

Les travées d'approche, longues de 416 m, sont haubanées. Elles sont composées de deux parties distinctes : un tablier en béton, long de 280 m et appuyé sur quatre piles, et d'une dalle, de 136 m, ancrée dans le rocher. (Fig.7.)



Figure 5. Disposition des voies de circulation

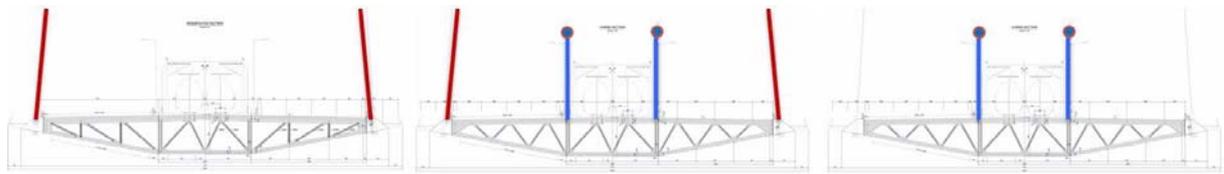


Figure 6. Disposition transversale des haubans et des suspentes en travée centrale (zone haubanée seule, zone mixte, zone de suspentes seules).

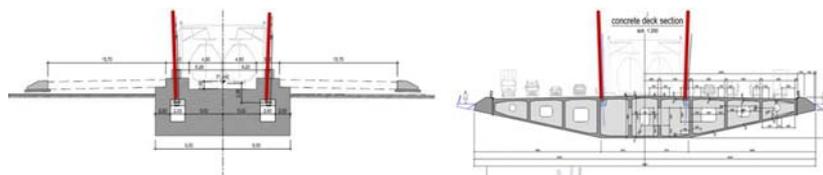


Figure 7. Travées d’approche haubanée (zone ancrée dans le rocher – tablier en béton).

Le tablier métallique (Fig.8.) est un caisson profilé d’une largeur de 58,80 m et d’une hauteur de 5,50 m :

- La tôle supérieure est une dalle orthotrope constituée d’une tôle de 14 mm d’épaisseur, raidie par des augets de 7 ou 8 mm d’épaisseur, entre distants de 300 mm.
- Les âmes verticales, entre distantes de 13,50m, ont une épaisseur de 15 mm raidie par 3 augets d’une épaisseur de 8 mm
- La tôle de fond du caisson central a une épaisseur qui varie de 35 à 18 mm et les âmes inclinées de 18 à 14 mm, raidies avec des augets d’une épaisseur de 10 mm.

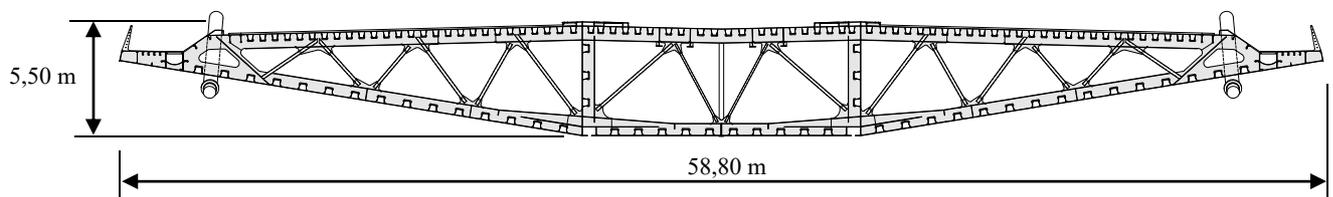


Figure 8. Coupe transversale du caisson métallique

2.1. Les haubans, les suspentes et les câbles de suspension

Les haubans sont disposés dans 2 nappes ; Ils sont au nombre de 22 par nappe et par 1/2 travée. Leurs ancrages sont entre distants sur le tablier de 24 m et ils sont constitués de 85T15, pour les plus courts et de 142T15, pour les plus longs.

Les suspentes sont dans 2 plans verticaux, entre distants de 13,50 m ; leur nombre, par nappe et par ½ travée, est

- de 11 câbles, dans la zone mixte haubans/suspentes,
- de 7 câbles, dans la zone strictement suspendue,
- Leur section est constituée de fils de 7 mm de diamètre au nombre de 109, en zone mixte, jusqu'à 367 pour la zone centrale.

Les travées d'approche sont haubanées mais non suspendues. Les câbles de suspension

- sont ancrés dans les blocs d'ancrage, situés aux extrémités et en dehors du tablier,
- prennent appui, au sommet des pylônes, sur une selle,
- et suspendent la partie centrale du tablier.

Ils sont constitués d'un assemblage de fils de 5,4 mm de diamètre, disposés dans des unités de 127 fils. Ces unités sont au nombre de 122 et le diamètre final de chaque câble est de 751 mm.

3. Comportement en service

3.1. Normes

Pour le dimensionnement, les normes ou règles utilisées sont les suivantes :

- les Eurocodes, pour la plupart des critères utilisés pour vérifier la résistance ou la stabilité de la structure,
- pour les caractéristiques du vent, les données enregistrées par trois stations météorologiques de la région et par des anémomètres placés sur un mat de 60 m installé à quelques kilomètres du site,
- pour les caractéristiques aérodynamiques de l'ouvrage, des essais en soufflerie sur des modèles sectionnels et aéroélastiques,
- pour les charges de trafic routier, une étude bibliographique reprenant les chargements adoptés pour plusieurs ouvrages de très grande portée [DEV 12] et les normes nationales suédoises qui ont pour base les Eurocodes et qui ont été adaptées pour les ouvrages de grande longueur [KAR 09],
- pour la température, l'étude réalisée sur le pont de Normandie [LUC 05] afin de remplacer la multitude de cas demandés par les Eurocodes par un nombre physiquement plus réaliste,
- pour le séisme, une étude approfondie de l'aléa sismique du site de l'ouvrage [CHA 12].

Pour le dimensionnement, les charges prépondérantes sont la température ($\Delta T = +46^{\circ}\text{C}$, -30°C), le vent (Période de retour = 100 ans, vitesse de référence à 10 m = 30 m/sec), les charges routières et ferroviaires, le séisme (période de retour = 475 ans, peak ground acceleration $\approx 0,40 \text{ g m/sec}^2$).

3.2. Charges de trafic

Pour cet ouvrage, les charges de trafic sont particulièrement importantes :

- Route : 90 kN/m
- Chemin de fer : convoi UIC multiplié par le coefficient α
 - o UIC : 80 kN/m sur une longueur de 400 m
 - o Coefficient α : 1,33 pour tenir compte de l'évolution dans le futur des convois de fret.

Le rapport des charges de trafic sur les charges permanentes est de l'ordre de $30/45 = 0,67$ (ordre de grandeur plus courant : 0,30), ce qui est très élevé pour un tel ouvrage. Il en résulte, pour les haubans sous charges permanentes, un taux de travail de l'ordre de 0,25, un effet de chaînette non négligeable et, donc, un risque plus élevé de fatigue.

3.3. Appuis pendulaires

A l'effet chaînette, vient s'ajouter le mouvement longitudinal d'ensemble du tablier lors du passage d'un convoi routier et/ou ferroviaire. Chaque moitié du tablier peut être considéré comme le plateau d'une balançoire suspendu par les haubans à un pylône. Lorsque le convoi est localisé au quart de portée côté Europe, par exemple, le tablier tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, se déplace longitudinalement vers l'Europe, entraîne avec lui le reste du tablier, détend de façon très significative les haubans de la travée d'approche, côté Asie et induit des variations de contraintes qu'il est nécessaire de prendre en compte pour estimer l'endommagement en fatigue (Fig.9).

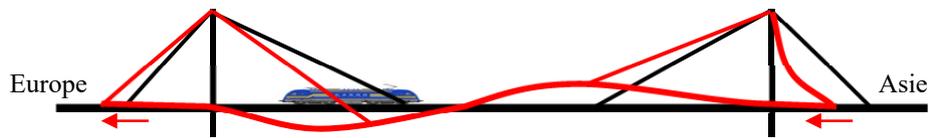


Figure 9. – Déformée du tablier sous les convois

Pour réduire ces déplacements, des appuis pendulaires ont été installés. Deux effets positifs (Equ.2.) se combinent (Fig.10):

- Le coefficient de frottement des surfaces de glissement : $\phi = 5 \%$, valeur adoptée pour le dimensionnement ;
- La raideur horizontale, proportionnelle au rapport de la réaction verticale, Q , avec le rayon de courbure, r , des surfaces de glissement.

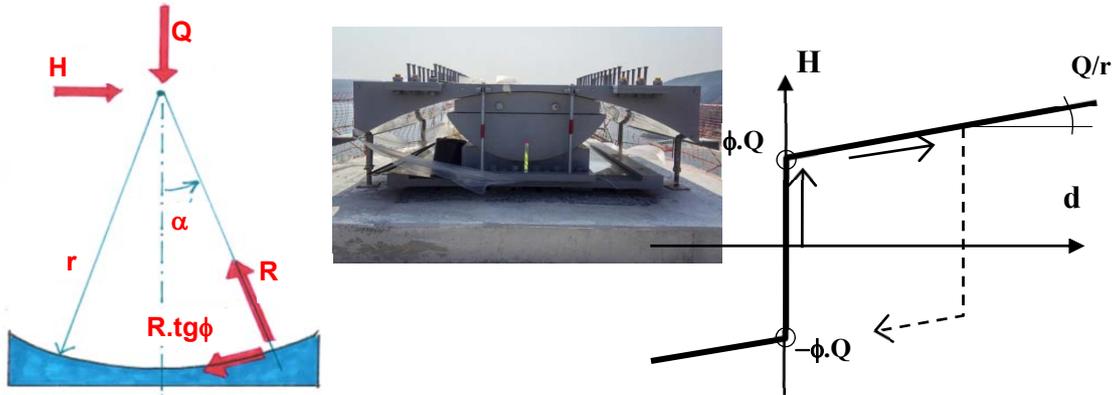


Figure 10. Schéma simplifié (©M. Virlogeux-[4]) –Appui pendulaire du pylône- Loi de comportement

La réaction horizontale induite, H , est égale à

$$H = (Q / r).d + \phi.Q \quad [2]$$

Quatre piles et la traverse du pylône, de chaque côté du pont, sont équipées de ce type d'appareils d'appui.

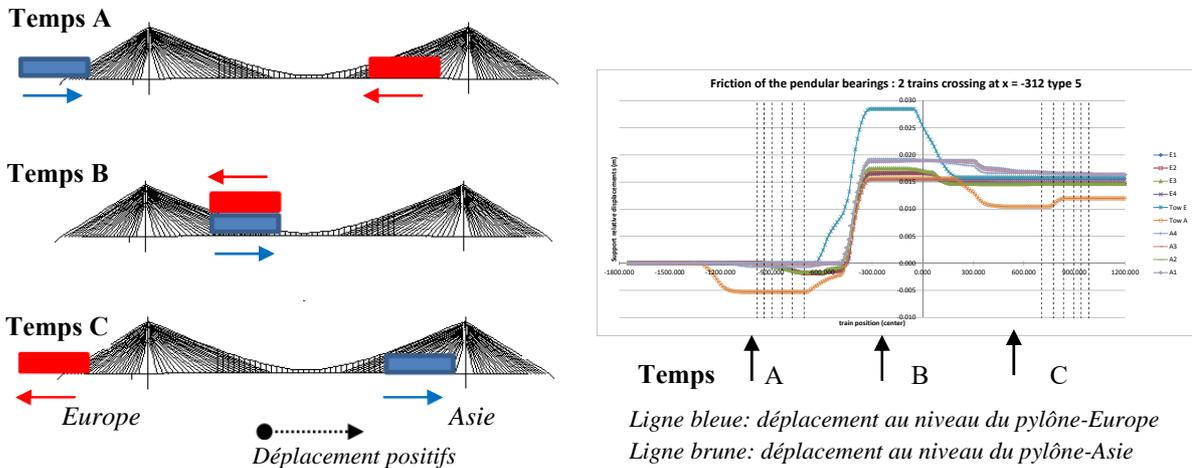


Figure 11 . Déplacement horizontal des surfaces de glissement des appuis pendulaires lors du croisement de deux trains.

Des calculs non linéaires ont été entrepris avec le programme FINELG, développé au bureau Greisch en collaboration avec le Département ARGENCO de l'Université de Liège. La figure 11 montre l'évolution du déplacement longitudinal au droit de chaque appui pendant la traversée de deux trains (train Type 5-Eurocode = 80 kN/m sur une longueur de 270,30 m) ; ils se croisent au $\frac{1}{4}$ de portée de la travée, côté Europe. Le déplacement maximum est observé au niveau de l'appui sur la traverse du pylône, côté Europe :

- déplacement maximum lorsque les trains se croisent: 2,8 cm,
- déplacement lorsque les trains s'éloignent l'un de l'autre : 1,3 cm

- mouvement total de l'appui (croisement + éloignement) : 2,8 cm + 1,3 cm = 4,1 cm,
- Sans prise en compte du frottement et de la raideur longitudinale des appuis pendulaires, déplacement lors du croisement : 29 cm.

3.4. Déformations sous le vent maximum et le séisme.

Une étude in situ a été réalisée pour définir les caractéristiques à utiliser pour le vent et le séisme. Pour le vent, la période de retour exigée par le Maître de l'Ouvrage est de 100 ans. Pour le séisme, la période de retour est définie pour l'ELS, 475 ans, et pour l'ELU, 2475 ans. La combinaison haubans / suspentes permet de réduire de façon significative les déplacements sous les charges variables.

En service, les déplacements significatifs du tablier sont les suivants (entre parenthèses = valeurs pour un pont suspendu classique):

- Pour le vent :
 - o Déplacement transversal: [-1,77 ; 0,80] m (≈ 7 m)
 - o Déplacement vertical: [-1,74 ; 1,28] m
- Pour le séisme :
 - o Déplacement transversal : ± 0,51 m (≈ 5 m)
 - o Déplacement vertical : ± 0,41 m

On constate que les sollicitations induites par le vent sont plus importantes que celles provoquées par le séisme bien que l'ouvrage soit situé en Turquie, pays caractérisé par un aléa sismique important. Ce résultat est dû au fait, d'une part, que le pont est localisé dans une zone relativement épargnée par des séismes de grande magnitude et, d'autre part, que les fréquences propres de l'ouvrage sont très faibles (1^{er} mode transversal : 0,098 Hz, 1^{er} mode vertical : 0,169 Hz).

4. Méthode de construction

4.1. Scénarios envisagés

Le début du chantier a consisté à réaliser successivement :

- Les fondations des pylônes, les piles des travées d'approches et les ancrages d'extrémité des câbles de suspension,
- Le bétonnage des jambes de pylônes.

L'essentiel des différences entre les scénarios envisagés se situe au niveau de la mise en œuvre de la travée centrale qui devait être réalisée par assemblage de tronçons, chacun d'une longueur de 24 m et d'un poids moyen de 8250 kN:

- à quel moment commencer l'assemblage par encorbellement des caissons métalliques de la partie haubanée ? :
 - o avant la réalisation complète des pylônes mais dès la mise en place, dans le pylône, de l'ancrage du hauban de suspension ?
 - o après la réalisation complète des pylônes ?
- dans quel ordre mettre en place les caissons suspendus ?
 - o depuis le centre vers la partie haubanée ?
 - o depuis la partie haubanée vers le centre ?

Finalement, la séquence retenue a été la suivante (Fig.12.):

- fondation des pylônes, des piles, des ancrages d'extrémités des câbles de suspension,
- bétonnage des travées d'approche,
 - bétonnage des pylônes jusqu'à leur sommet,
- Mise en place des 2 câbles de suspension, et, simultanément, assemblage des 20 premiers tronçons haubanés par la méthode de l'encorbellement, chaque tronçon étant hissé au moyen de derricks situés à l'extrémité du porte-à-faux déjà réalisé, (Fig.12-a,b.)
- Les câbles de suspension étant terminés, assemblage des 8 tronçons suivants et mise en place de leurs suspentes, chaque tronçon étant hissé par des treuils qui prenaient appui sur les câbles de suspension, (Fig.12-c.)
- Mise en place des suspentes 12 à 20, situés dans la zone mixte haubans/suspentes, (Fig.12-d.)

- Levage et assemblage du tronçon de clavage, long de 9,0 m,
- Mise en place des appuis définitifs
- Réalisation des équipements (revêtement routier de 70 mm d'épaisseur, placement des écrans brise-vents, des barrières de sécurité,...)

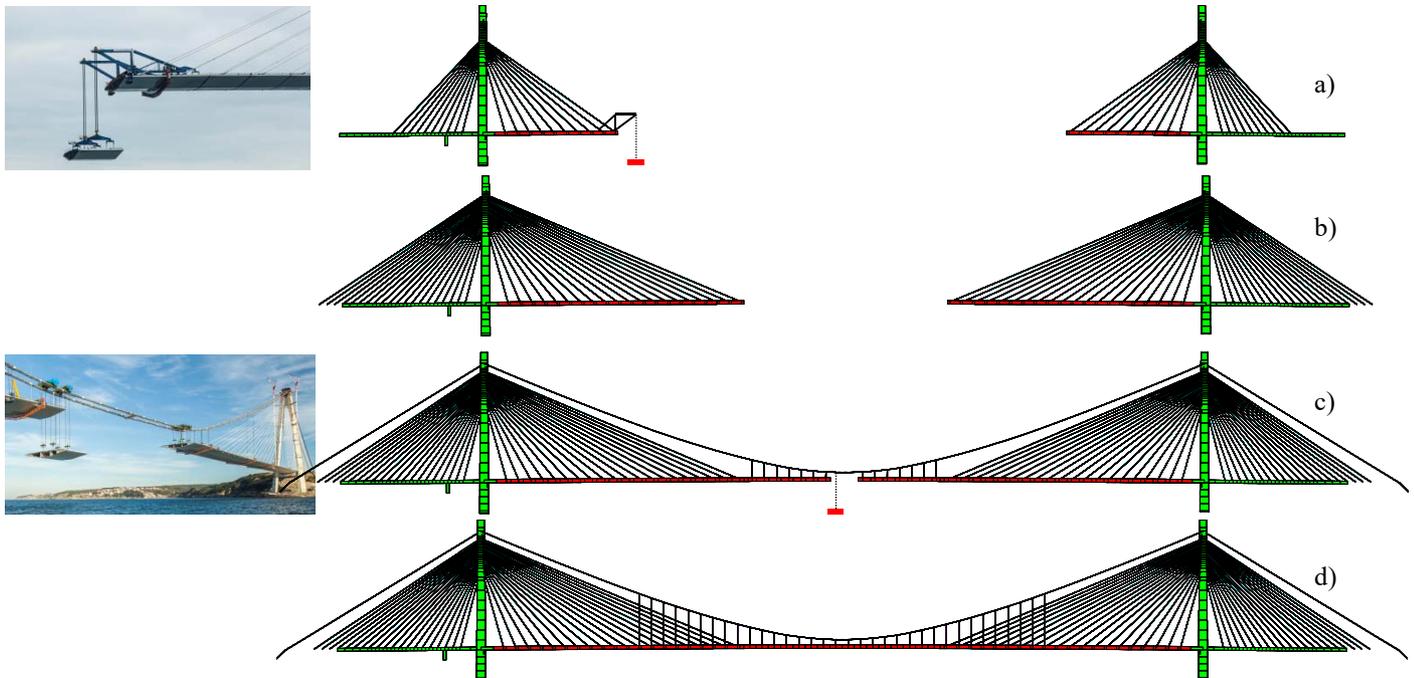


Figure 12. Séquence de montage de la travée centrale

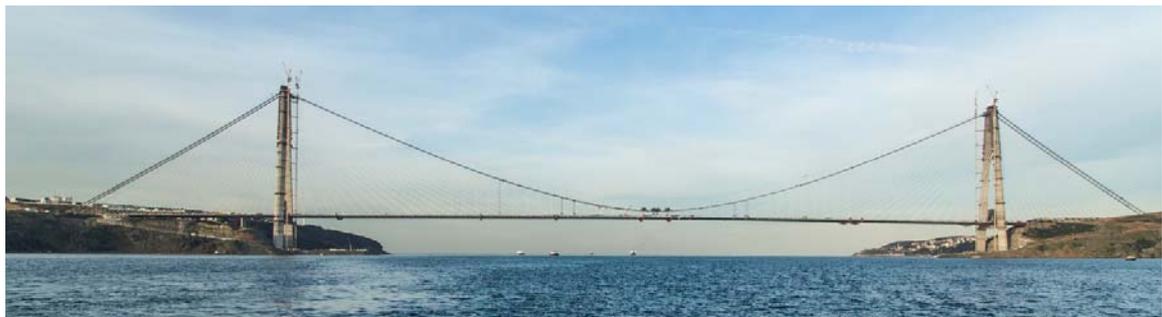


Figure 13. Vue générale du troisième pont sur le Bosphore – mars 2016 - Travée centrale terminée.

5. Conclusion

Le troisième pont sur le Bosphore est un pont exceptionnel, d'une part, pour sa situation, entre l'Asie et l'Europe, et d'autre part, pour sa suspension hybride qui a permis de dessiner un tablier d'une largeur de 58,8 m avec une hauteur de 5,50 m seulement tout en maintenant les déformations sous chargement variable faibles par comparaison à des ouvrages ayant le même type de contraintes : pont suspendu, trafic routier plus ferroviaire.

6. Bibliographie

- [DEV 12] DE VILLE DE GOYET V, Traffic Loading for Long Span Bridges, Rapport interne, Greisch, Liège, 2012.
- [KAR 09] KARLSON, Vagverket. TKBRO, Allman teknisk beskrivning for broar. Borlange, Sweden, 2009.
- [LUC 05] LUCAS JM., VIRLOGEUX M., LOUIS Cl., Température in the box girder of the Normandy Bridge, Structural Engineering International, Vol 3, 2005.
- [CHA 12] CHACKO J., Seismic hazard report, Third Bosphorus Bridge, Projet No. 2012.0016 Task E, FUGRO, Istanbul, Turquie, 2012.