
Chargements exceptionnels et comportements dynamiques du troisième pont suspendu sur le Bosphore

V. de Ville de Goyet¹, Y. Duchêne², L. Comélieu³, M. Hérode⁴.

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

² Bureau Greisch, Liege Science Park, Allée des Noisetiers, 25, 4031 Angleur, yduchene@greisch.com

³ Bureau Greisch, Liege Science Park, Allée des Noisetiers, 25, 4031 Angleur, lcomelieu@greisch.com

⁴ Bureau Greisch, Liege Science Park, Allée des Noisetiers, 25, 4031 Angleur, mherode@greisch.com

RÉSUMÉ. 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 sera soutenue directement aux pylônes par des haubans d'une part et par des câbles de suspensions principaux avec suspentes verticales d'autre part. Les pylônes en béton atteignent la hauteur de 320 m, tandis que le tablier de 58 mètres de large et de 5,50 m de hauteur supportera deux fois quatre bandes pour le trafic routier international, deux voies de chemin de fer et deux trottoirs latéraux destinés aux piétons. A pont exceptionnel, chargement exceptionnel : 1) situé dans une zone de forte sismicité et au vu de sa longueur, le pont doit être vérifié sous accélérogrammes différentiels en chaque appui 2) un tel ouvrage fait automatiquement l'objet d'études poussées sous les effets du vent déterminés sur base d'analyse de données de stations météo et de nombreux essais en soufflerie afin de vérifier son comportement dynamique sous les rafales de vent et de vérifier toutes les instabilités aérodynamiques qui pourraient se produire tant en service que durant les phases de construction.

ABSTRACT. With a length of 2240 m, this new hybrid cable cable-stayed bridge will have a main span of 1408m. Like the Brooklyn bridge (New York), the main span will be supported on one side by main cables with hangers and on the other part by stay cables. The concrete pylons reach the height of 320 m, while the deck 58 m wide and 5.50 m high bears twice four bands for international road traffic, two lanes of railway and two lateral sidewalks for pedestrians. Exceptionally bridge, exceptional loadings: 1) in an area of high seismicity and in view of its length, the bridge must be checked under differential accelerations time histories in each support 2) such a work is automatically extensively studied under the wind effects on basic data analysis of weather stations and numerous wind tunnel tests to verify its behaviour under dynamic wind gusts and verify the aerodynamic instabilities that could occur both in service and during the construction phases.

MOTS-CLÉS : pont suspendu, pont haubané, comportement dynamique, vent turbulent, séisme.

KEY WORDS: cable bridge, cable stayed bridge, dynamic behaviour, turbulent wind, seism.

1. Introduction

Le troisième pont sur le Bosphore, appelé Yavuz Sultan Selim bridge est un pont suspendu avec une portée principale de 1408 m et une longueur totale de 2240 m. Il est situé au nord d'Istanbul à l'embouchure du Bosphore, près de la mer noire. Comme le pont de Brooklyn, la travée centrale est à la fois suspendue à deux câbles principaux par l'intermédiaire de suspentes et par des haubans. La suspension verticale classique est située au centre de la travée principale, sur une longueur de 792 m, incluant une zone de transition de deux fois 250m comprenant les deux systèmes de suspensions : haubans et suspentes.

Les pylônes, d'une hauteur de 320 m, sont composés de deux fûts inclinés pour un total de 77 000 tonnes de béton. Le tablier, situé 75 m au-dessus du niveau de la mer, a une hauteur de 5.5 m et une largeur de 58 m comportant deux fois 4 bandes de circulations routières, deux voies de chemin de fer et deux trottoirs situés aux deux extrémités. Dans la partie centrale, le tablier est en acier avec une dalle orthotrope, pour une masse totale de 45 000 tonnes. Pour les travées latérales, le tablier est en béton et est supportés par 4 pilettes en béton.

La conception initiale est le résultat d'un concours remporté par Michel Virlogeux (France) et Jean-François Klein (Suisse). La conception finale est effectuée par T-Ingénierie (Suisse) et le bureau d'études Greisch (Belgique) pour le compte de l'association İçtas et Astaldi S.P.a. La construction du pont est effectuée par HDSK, un consortium composé de Hyundai Engineering & Construction et de SK Engineering & Construction J.V.

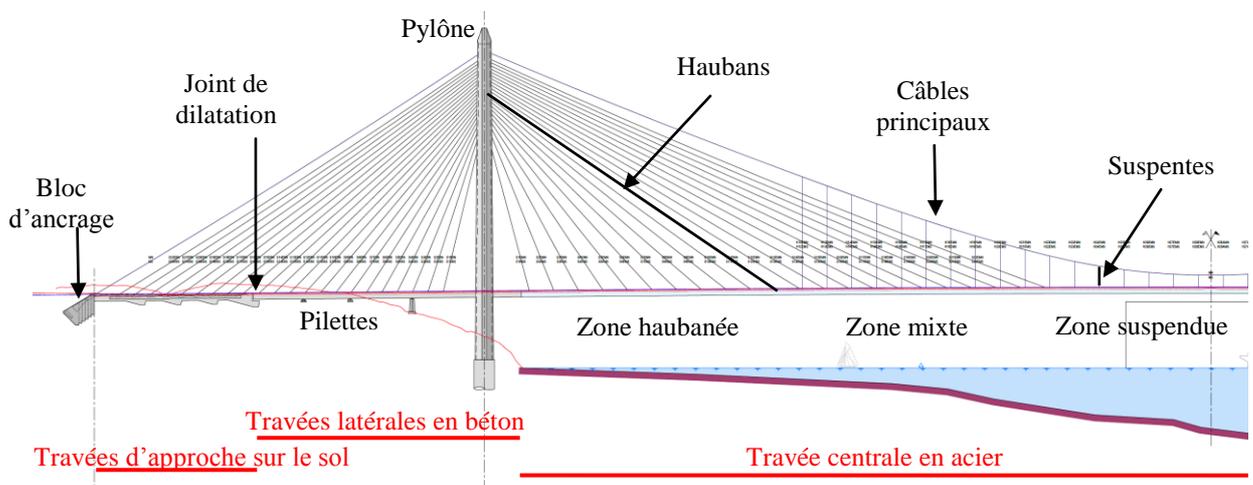


Figure 1. Vue en élévation du pont.

2. Comportement du pont sous vent turbulent

2.1. Conditions de vent sur le site du pont

Les conditions de vent ont été évaluées par le CSTB, le laboratoire d'ingénierie du vent situé à Nantes en France. L'analyse climatique [FLO 13] est basée sur :

- des données enregistrées à des stations météorologiques situées aux alentours du pont ;
- un mât installé par le CSTB au port de Poiraz, légèrement à l'aval du pont ;
- des simulations CFD de l'écoulement des fluides pour définir les propriétés du vent sur le site de construction du pont.

Les mesures à échelle réelle sur le mat, construit à proximité du pont, corrélées avec les stations météo proches, ont permis de définir les données du vent. La vitesse de référence du vent, pour une période de retour de 10 ans, est de 30 m/s (valeur moyenne sur 10 minutes pour un terrain de classe II selon la définition de l'Eurocode). Cette valeur est la donnée principale pour les calculs au vent turbulent.

Il en résulte que, au niveau du tablier (75 m), la vitesse de vent moyenne est de :

- $V_{mer,75} = 46,8$ m/s, pour un vent de type « mer » perpendiculaire au pont (vitesse de pointe = 61,3 m/s);
- $V_{terre,75} = 40,1$ m/s, pour un vent de type « terre » à 45° par rapport au pont (vitesse de pointe = 57,2 m/s);

2.2. Mesures sur modèles sectionnels

Deux types de modèles ont été utilisés [REV 13-1] [REV 13-2] [KNA 14] :

- Un modèle rigide des pylônes durant leur construction, sans haubans ni câbles et tablier ; l'échelle est de 1/150 (Figure 2) ;
- Un modèle du tablier. Deux échelles ont été choisies : 1/100 pour déterminer les coefficients aérodynamiques (Figure 3) et 1/25 pour obtenir la distribution de vitesses sur le tablier et ainsi définir l'efficacité des écrans anti-vent (Figures 4 and 5).



Figure 2. *Modèle du pylône.*



Figure 3. *Modèle sectionnel du tablier (1/100).*

La similitude choisie pour les deux modèles est la conservation du nombre de Strouhal.

Pour les pylônes, les mesures ont été effectuées avec une balance de force connectée rigidement en pied de pylône. Des informations plus précises sur la distribution de pression ont été obtenues à l'aide de 226 capteurs de pression couvrant toute la section des jambes à 9 niveaux différents. Le but était de déterminer les coefficients de forces sur les deux jambes, à ces 9 niveaux différents, en fonction de l'angle incident de vent. L'échelle du modèle a été choisie sur base d'un optimum entre l'échelle physique, le ratio de blocage dans la soufflerie et la raideur du modèle.



Figure 4. *Modèle sectionnel du tablier (1/25).*



Figure 5. *Modèle sectionnel du tablier avec 4 écrans.*

Pour le tablier, en raison de sa largeur exceptionnelle, l'échelle de 1/100 a été retenue pour les mesures dans la soufflerie du CSTB. Pour minimiser les erreurs de mesure dues aux extrémités du modèle, deux plaques profilées aérodynamiquement ont été placées à 5 mm de chacune de ces extrémités afin de laisser le modèle libre de vibrer en flexion et torsion. Le modèle a une longueur de 2515 mm, toujours pour minimiser les effets de bords sur les résultats globaux.

Le tablier est testé pour différentes configurations données au Tableau 1. Les coefficients aérodynamiques sont donnés pour une incidence de 0°.

Les concepteurs ont proposés de placer des écrans brise-vent pour limiter et/ou supprimer les fermetures du pont au trafic lors de mauvaises conditions climatiques. En contrepartie, il en résulte généralement une

augmentation des coefficients aérodynamiques. Mais, pour ce pont, cette augmentation est équivalente à l'effet de masque produit par le passage d'un train. Il en résulte que les écrans brise-vent n'apportent que des avantages pour la protection des véhicules légers tels que les voitures et les camions sans pénaliser le profil aérodynamique du pont.

Configuration	Barrière de sécurité	2 écrans brise-vent	4 écrans brise-vent	Avec train	C _D (trainée)	C _L (portance)	C _M (moment)
Construction	-	-	-	-	0,030	0,240	0,000
Service	Oui	-	-	-	0,050	0,300	0,010
Service	Oui	Oui	-	-	0,080	0,361	0,011
Service	Oui	-	Oui	-	0,085	0,369	0,029
Service	Oui	-	-	Oui	0,096	0,419	0,098
Service	Oui	Oui	-	Oui	0,101	0,357	0,072
Service	Oui	-	Oui	Oui	0,099	0,375	0,076

Tableau 1. Coefficients aérodynamiques du tablier pour diverses configurations des écrans brise-vent.

Les conclusions principales de cette étude sont :

- Le tablier n'est pas susceptible de subir des vibrations importantes en flexion ou en torsion dues aux détachements tourbillonnaires de Von Karman ;
- La vitesse critique du vent en flottement est de 92,5 m/s, vitesse significativement plus élevée que la vitesse de calcul pour ce site ;
- Les écrans- brise-vents apportent une amélioration significative pour la stabilité des convois routiers et des trains ;
- La section du tablier est bien conçue du point de vue aérodynamique, dans la mesure où le moment de torsion est proche de zéro pour un vent d'incidence nulle et qu'il n'y a pas de modification rapide de ce coefficient lors de la variation de l'angle d'incidence du vent ;
- Les coefficients aérodynamiques instationnaires sont aussi mesurés et ils confirment bien les résultats des calculs d'instabilité ;
- La très grande largeur du tablier apporte une masse effective additionnelle de 5 à 10 %, en raison du volume d'air supplémentaire déplacé, pour le mode en flexion vertical. Cet effet est pris en compte dans les coefficients de Scanlan.

2.3. Simulation numériques sous vent turbulent

Avec les propriétés du vent et du tablier fournies par les mesures du CSTB, le comportement dynamique du pont sous vent a été modélisé par le programme d'éléments finis Finelg, développé conjointement à l'université de Liège et au bureau Greisch.

2.3.1. Modes propres

Le Tableau 2 donne les premiers modes propres principaux de la structure en configuration de service. Les 250 premiers modes propres (les modes de haubans ne sont pas compris) ont une fréquence inférieure à 2,5 Hz. Seuls, les premiers modes du tablier sont repris car ce sont eux qui guident la stabilité aéroélastique du pont. Les autres modes sont soit des modes de câbles, de pylônes ou d'ordre supérieur pour le tablier.

N°	Description	Forme	Fréquence (Hz)
1	Transversal	1/2 onde sinusoïdale	0,098
2	Vertical	1/2 onde sinusoïdale	0,169
3	Vertical + longitudinal	2/2 ondes sinusoïdales	0,172

10	Transversal	2/2 ondes sinusoïdales	0,268

13	Torsion	1/2 onde sinusoïdale	0,289

Tableau 2. Principaux modes propre du pont.

Nous pouvons observer que le rapport de fréquence entre le premier mode de torsion et de flexion ($0,289/0,169 = 1,71$) est suffisamment élevé et explique l'absence d'instabilité aérodynamique par couplage flexion torsion.

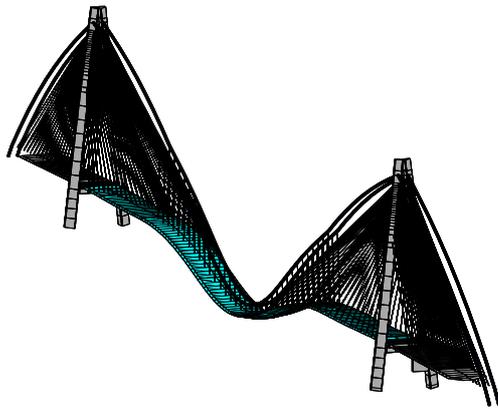


Figure 6. Premier mode propre de flexion verticale – ½ onde ($f = 0,169$ Hz).

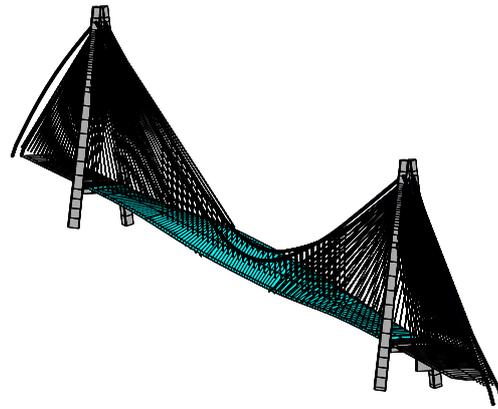


Figure 7. Premier mode propre de torsion – ½ onde ($f = 0,268$ Hz).

2.3.2. Réponse sous vent turbulent

Deux directions incidentes de vent sont importantes : le vent transversal venant de la mer et le vent oblique, à 45° , venant de la terre. Le Tableau 3 donne les principales caractéristiques de ces deux vents au niveau du tablier (75 m), pour une période retour de 100 ans.

Avec ces caractéristiques, bien qu'il ait une vitesse moyenne et une vitesse de pointe inférieure, le vent oblique est plus agressif que le vent perpendiculaire. Ce constat est dû à l'intensité de turbulence induite par la topographie du site. Le Tableau 4 donne la valeur minimale et maximale des déplacements, composés d'une partie stationnaire et d'une partie turbulente. Le vent oblique génère bien des déplacements supérieurs à ceux créés par le vent perpendiculaire. Cette observation est identique pour toutes les configurations, en service et durant les phases de construction du pont.

Vent	Vitesse moyenne (m/s)	Intensité de turbulence		
		I _u	I _v	I _w
Mer (90°)	46,8	8,0 %	6,5 %	3,5 %
Terre (45°)	40,1	14,0 %	11,0 %	8,0 %

Tableau 3. Caractéristiques principales du vent (u, v et w = direction du vent, longitudinale, transversale et verticale).

Vent	Tablier à mi-travée		Sommet du pylône
	Transversal (m)	Vertical (m)	Transversal (m)
Mer (90°)	[1,77 ; -0,80]	[1,82 ; -0,56]	[0,11 ; -0,01]
Terre (45°)	[1,66 ; -1,02]	[1,74 ; -1,28]	[0,11 ; -0,02]

Tableau 4. Déplacements maximum et minimum sous vent.

2.4. Essais aéroélastiques

Après les mesures sur des modèles sectionnels rigides par le CSTB, le comportement au vent a été vérifié à l'aide de modèles aéroélastiques du pont complet au POLIMI, la soufflerie de l'université de Milan. Les essais ont pour but de valider le comportement du pont sous le vent, de confirmer sa stabilité et d'évaluer sa déformation sous vent turbulent [ARG 14-1] [ARG 14-2]. La similitude de Froude a été choisie pour ces essais.

Quatre configurations ont été étudiées : 1) le pylône seul durant sa construction 2) le pont complet en service 3) 2 phases de construction. L'échelle du modèle est le 1/180. Le relief aux environs des culées est aussi représenté pour modéliser la distribution spatiale du vent le long du tablier.



Figure 8. Modèle aéroélastique du pylône (1/180).



Figure 9. Modèles du pont complet en service (haut) et en construction (bas) (1/180).

Mode	Forme	Fréquence (Hz)		Amortissement ξ
		Prototype	Modèle (échelle 1/180)	
Flexion transversale	1/2 sinus	0,094	0,089	0,8 %
Flexion verticale	1/2 sinus	0,166	0,171	1,1 %
Flexion verticale	2/2 sinus	0,170	0,164	0,7 %
Torsion	1/2 sinus	0,296	0,309	1,0 %

Tableau 5. Mesures des principaux modes propres.

Les déplacements statiques et dynamiques ont été mesurés en divers points du tablier et des pylônes au moyen d'accéléromètres et de capteurs de déplacements. Le Tableau 5 compare les fréquences du modèle réduit et du prototype (obtenues par éléments finis). Ce tableau donne aussi les pourcentages d'amortissement critique de chaque mode du modèle à comparer à la valeur de 0,3% adoptée pour les calculs par éléments finis. La correspondance entre les deux est satisfaisante.

La stabilité du pont a été vérifiée sous vent laminaire et turbulent en mesurant la réponse temporelle du pont et en évaluant l'amortissement aérodynamique des modes principaux concernés par la vitesse critique de stabilité du vent. L'amortissement en torsion croit avec la vitesse du vent jusqu'à la valeur de dimensionnement de 60 m/s et confirme donc la grande stabilité aéroélastique du pont.

3. Comportement du pont sous charges de séisme

3.1. Alea sismique

Pour la détermination de l'aléa sismique, la société Fugro [CHA 12] a effectué les études suivantes :

- Raffinement des modèles sismiques régionaux afin de développer un modèle source à utiliser dans l'analyse du risque sismique ;
- Une analyse probabiliste du risque sismique pour développer un tremblement de terre de calcul au niveau du bedrock ;
- La sélection et la calibration de sept accélérogrammes (3 directions par accélérogramme) compatibles avec le tremblement de terre au niveau du bedrock pour trois périodes de retour ;
- L'analyse de la réponse du site pour inclure les effets topographiques dans la détermination des mouvements du sol ;

- Estimation du décalage temporel et des réponses différentielles des diverses fondations du pont pour les incorporer dans les accélérogrammes.

3.1.1. Spectres de calcul

Le spectre de calcul est donné pour trois périodes de retour : 1) 2475 ans pour l'ELU 2) 475 ans pour l'ELS 3) 75 ans pour les phases de construction. Ils sont repris à la figure 10. L'accélération au niveau du sol est respectivement de 0,36g ; 0,20g et 0,09g pour les périodes de retour de 2475, 475 et 75 ans.

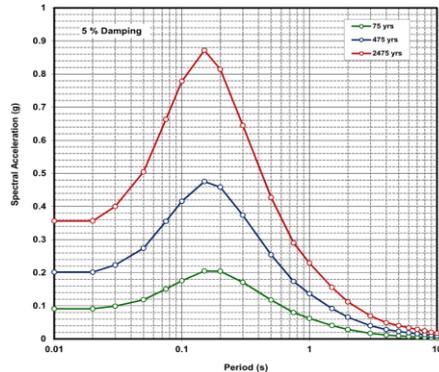


Figure 10. Spectres horizontaux de calculs.

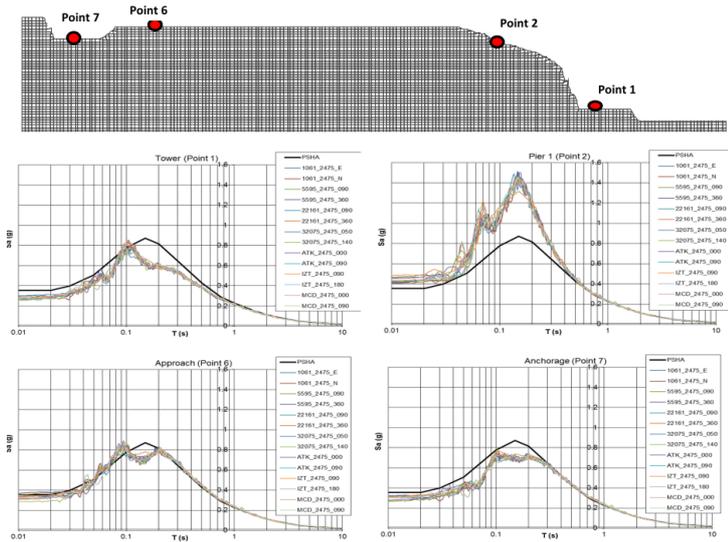


Figure 11. Spectres de réponse en chaque fondation.

3.1.2. Accélérogrammes de calculs

Fugro a mis à l'échelle et calibré 7 accélérogrammes mesurés lors de séismes existants pour obtenir 7 nouveaux accélérogrammes compatibles avec le spectre de calcul. Ces accélérogrammes ont ensuite été appliqués sur le modèle du sol de la région du pont, au niveau du bedrock. Ils en ont calculé des accélérogrammes différents en chaque fondation du pont. Ces accélérogrammes prennent donc en compte le décalage temporel de l'onde sismique en chaque point et les effets de la topologie du sol. Il en résulte donc des accélérations et déplacements différents en chaque fondation. La figure 11 représente le spectre de réponse de chacun des accélérogrammes pour chaque fondation côté Europe, comparé au spectre de base. Le spectre est peu modifié aux points 1, 6 et 7 mais le point 2, au sommet de la falaise, est plus impacté par le relief du sol.

3.2. Simulations numériques sous séismes

La réponse du pont sous le spectre de calcul et sous les accélérogrammes différentiels en chaque fondation a été effectuée à l'aide du programme par élément finis *Finelg*. Le calcul spectral est un calcul classique tandis que le calcul sous accélérogrammes, prenant en compte les déplacements différentiels des différents appuis, est un calcul dynamique temporel pas-à-pas. Le calcul est effectué pour les 7 accélérogrammes et ensuite, la moyenne des maximums de la réponse sous les 7 accélérogrammes est retenue.

Le déplacement relatif entre les pylônes Asie et Europe, distants de 1408m, atteint un maximum de 3 mm ; 0,5 mm et 3,5 mm respectivement en longitudinal, transversal et vertical. Ces déplacements sont infimes à l'échelle du projet et n'impactent donc pas le dimensionnement de la structure au vu de sa souplesse sur 1408 m. Ces déplacements ne sont bien évidemment pas pris en compte lors du calcul spectral.

Les figures 12 et 13 comparent les diagrammes de moment de flexion dans le tablier pour le calcul spectral et le calcul pas-à-pas avec accélérogrammes. Pour la travée centrale, les deux approches fournissent des résultats semblables, légèrement supérieurs pour l'approche avec accélérogrammes. Pour les travées d'approche, la méthode spectrale donne plus d'efforts pour le moment de flexion dans le plan alors que pour le moment de flexion hors plan, c'est l'inverse. En final, pour le dimensionnement et par sécurité, l'enveloppe des deux approches a été retenue. Le cas de charge séisme n'est pas dimensionnant pour l'ensemble des éléments du pont, à l'exception des réactions horizontales transversales des travées latérales en béton.

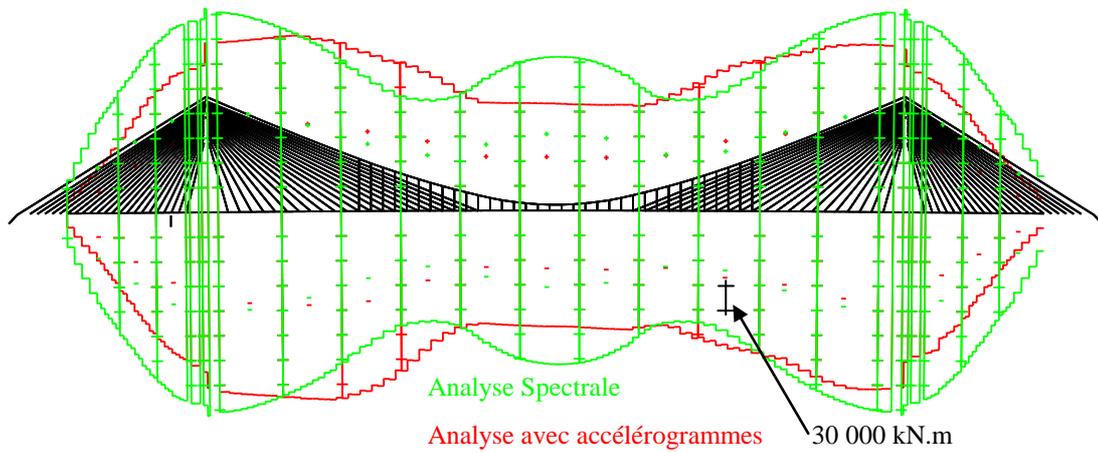


Figure 12. Diagramme des moments de flexion en plan du tablier.

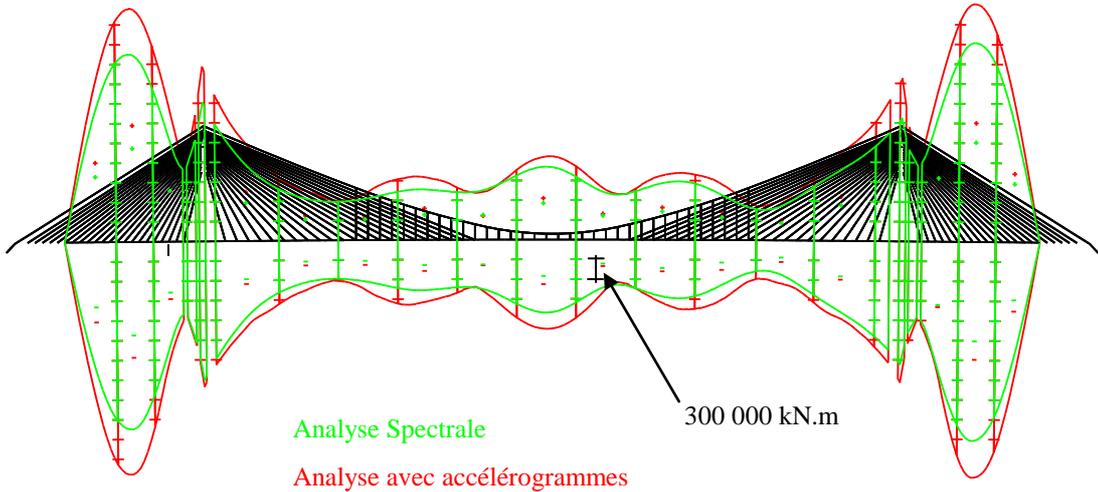


Figure 13. Diagramme des moments de flexion hors plan du tablier.

4. Conclusions

La conception du troisième pont sur le Bosphore, combinant haubans et câbles principaux avec suspentes verticales, la forme du tablier et l'emploi d'appuis pendulaires [VIL 2016] peuvent expliquer son excellent comportement et stabilité aux effets vent et aux charges de séisme.

5. Bibliographie

- [FLO 13] FLORI JP., GUILHOT G., GRILLAUD G., Third Bosphorus crossing in Turkey, Wind climate study, En-Cape 13.0311 , CSTB , Nantes, France, 2013.
- [REV 13-1] REVUZ J., GRILLAUD G., Third Bosphorus crossing in Turkey, Wind loading on the towers, En-Cape 13.017 , CSTB , Nantes, France, 2013.
- [REV 13-2] REVUZ J., KNAPP G., Third Bosphorus crossing in Turkey, Sectional wind tunnel test on the deck, En-Cape 13.020 , CSTB , Nantes, France, 2013.
- [KNA 14] KNAPP G., Third Bosphorus crossing in Turkey, 1:25 scale Reynolds number and vehicle protection studies, En-Cape 13.201 , CSTB , Nantes, France, 2014.
- [ARG 14-1] ARGENTINI T., BELLOLI M., ROSA L., SOMASCHINI C., ZASSO A., Tower wind tunnel tests, POLIMI , Milan, Italy, 2014.
- [ARG 14-2] ARGENTINI T., BELLOLI M., ROSA L., SOMASCHINI C., GIAPPINO S., ZASSO A., Wind tunnel testing for the full bridge model of the Third Bosphorus Bridges, POLIMI , Milan, Italie, 2014.
- [CHA 12] CHACKO J., Seismic hazard report, Third Bosphorus Bridge, Projet No. 2012.0016 Task E, FUGRO , Istanbul, Turquie, 2012.
- [VIL 16] DE VILLE DE GOYET V., DEL FORNO J.Y., PROPSON A., PEIGNEUX C., LAETHEM M., Conception, comportement en service et en construction du troisième pont sur le Bosphore, RUGC 2016, Construisons la ville de demain, Liège 2016.