

VÉRIFICATION DE LA STABILITÉ DU SYSTÈME DE CONTREVENTEMENT D'UN PONT MIXTE À POUTRE CAISSON EN PHASE DE CONSTRUCTION

STABILITY OF BRACING SYSTEM OF A COMPOSITE BOX GIRDER BRIDGE DURING CONSTRUCTION

HUSSEIN M. H. ABBAS¹, AHMED E. A. RAGEH²

¹ Président Ehaf Consulting Engineers, Egypte
E-mail : habbas@ehaf.com

² Assistant Université Al Azhar – Faculté des Ingénieurs, Le Caire, Egypte

INTRODUCTION

Cet article aborde le problème du rôle stabilisateur du contreventement vis-à-vis des effets horizontaux issus des actions du vent, choc, freinage et séisme. Il s'adresse tout particulièrement aux concepteurs d'ouvrage d'art et aux acteurs responsables du contrôle technique et des études d'exécution des ouvrages métalliques. Le contreventement des ponts a toujours été à l'origine de beaucoup de catastrophes et d'effondrements dus à sa mauvaise conception. Le renforcement d'un système de contreventement n'a en définitive que très peu d'implication sur le coût total de

l'ouvrage. Il est toujours préférable pour un ingénieur d'étude de passer quelques heures voire quelques jours de plus à la recherche d'un arrangement efficace de son système de contreventement ce qui éviterait des perturbations et empêcherait l'apparition des désordres lors de la construction de l'ouvrage. Il faudrait aussi examiner avec une grande attention l'effet des charges occasionnées par le montage car les ruines peuvent se produire pendant les différentes phases de chantier.

Le projet d'El Mariottia fait partie d'une autoroute vitale reliant 2 boucles de circulation de l'agglomération du grand Caire. Le viaduc permet de franchir successivement

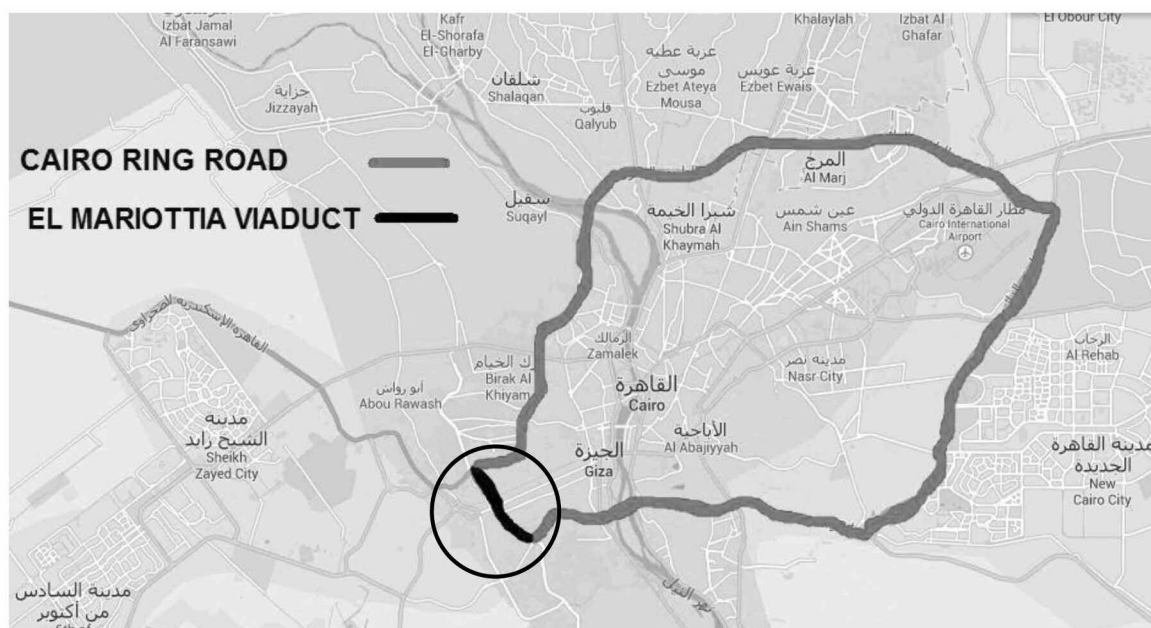


Figure 1 : Plan de situation et tracé de l'autoroute circulaire du Grand Caire.

deux axes routiers majeurs considérés parmi les plus importants et les plus saturés du gouvernorat de Guizèh. Son franchissement avec ces deux axes dont celui des Pyramides (El Haram) et le Roi Faisal a nécessité la construction de 2 ouvrages spéciaux compte tenu de la valeur historique du site et de son importance pour le trafic urbain, figure (1).

Le pont métallique en caisson d'El Mariottia n'est qu'un maillon dans un grand projet routier situé dans une zone historique et fortement urbanisée. Ce viaduc surélevé accueille un transport massif de marchandises ainsi que des passagers et du transport en commun comprenant les autobus et les autocars.

Le projet est composé de deux viaducs distincts, un dans chaque direction. Chacun de ses 2 longs ouvrages est

constitué d'un pont élevé continu en béton armé avec des travées allant de 25 à 40 m. A l'intersection des deux artères des Pyramides et du Roi Faisal, des travées plus importantes sont prévues et atteignent 72 m de portée, figure (2). Ces portées ont été réduites à 54 m grâce à deux porte-à-faux en béton de 9,00 m chacun, sur lesquels reposent les 2 extrémités du caisson de forme trapézoïdale du pont en métal.

Le hourdis est une dalle en béton armé, d'une épaisseur variable transversalement, en section courante elle est de 25 cm, renforcée aux endroits des semelles métalliques à 35 cm. L'encorbellement de 2,80 m a nécessité une surépaisseur de 35 cm à l'appui et 25 cm vers les bords. Le ferrailage en deux nappes de la dalle est réalisé en place.

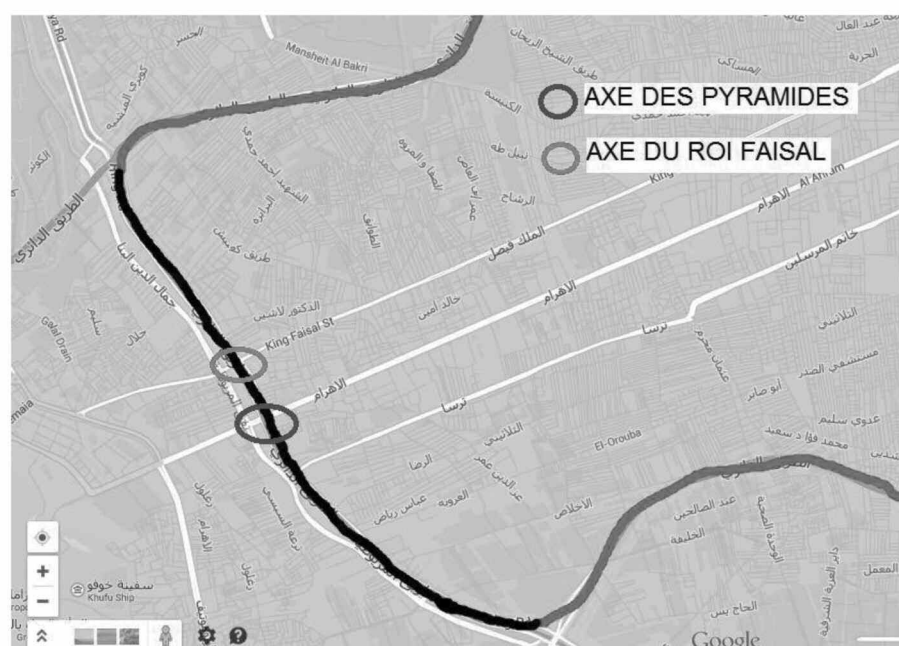


Figure 2 : Localisation géographique de l'ouvrage et ses deux franchissements.

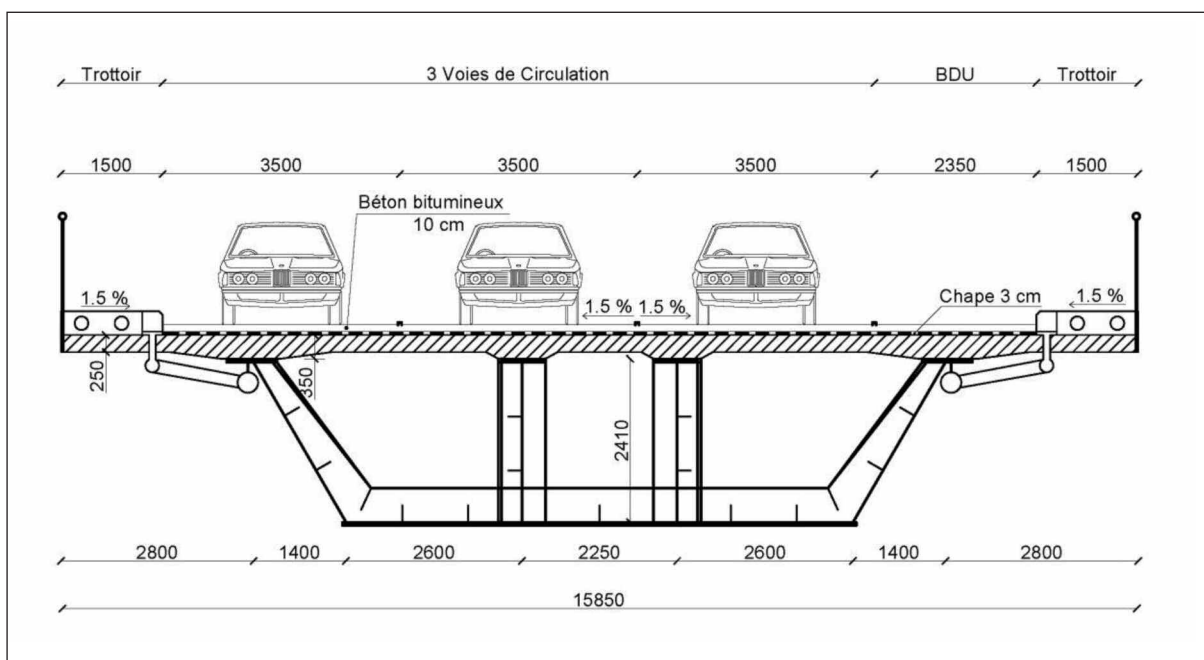


Figure 3 : Coupe transversale du tablier alvéolaire.

DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE

L'ouvrage se situe au dessus de deux chaussées, la hauteur des piles atteint 12 m, ce qui donne un gabarit vertical d'une hauteur libre minimale au dessus des chaussées du même ordre de grandeur. La chaussée de l'ouvrage présente une largeur hors tout de 15,85 m décomposée en trois voies rapides de circulation dans une direction de 3,50 m chacune bordée d'une bande d'arrêt d'urgence de 2,35 m, soit une largeur utile de 12,85 m et 2 trottoirs de 1,50 m chacun protégés par deux garde-corps métalliques, figure (3).

Chaque travée est une structure à ossature mixte de type caisson d'une portée de 54 m. Le tablier métallique est d'une largeur 7,85 m à la base et d'une hauteur constante de 2,480 m, soit un élanement de $1/22^\circ$. Le caisson est muni de diaphragmes raidisseurs disposés tous les 9,50 m comportant des trous d'homme circulaires de 90 cm de diamètre et entre deux diaphragmes des cadres de renfort en forme de U sont disposés espacés d'environ 3,00 m. Compte tenu de la flexibilité du caisson ouvert en phase de construction, un système adéquat de contreventement en treillis de type Warren est prévu avec des cornières.

Les épaisseurs des tôles de la semelle inférieure varient entre 40 mm à la base du caisson et des tôles de fond moins épaisses de 20 mm reliant l'ensemble des 2 caissons pour former un caisson large multi alvéolaire ouvert à 4 âmes dont 2 intérieures verticales et 2 extérieures obliques inclinées d'un angle voisin de 30° à la verticale. Les épaisseurs des tôles des âmes varient de 25 mm aux appuis et 18 mm en travée; les âmes et les semelles du caisson sont longitudinalement raidies par des simples plats. Les semelles supérieures sont en tôles de 40 à 50 mm d'épaisseur connectées aux âmes par soudure à pleine pénétration.

La dalle collaborante en béton armé d'une épaisseur de 25 cm a été coulée en continu sans arrêt de bétonnage, sur un coffrage métallique perdu reposant sur les semelles supérieures de l'ouvrage. La connexion entre la dalle en béton et la structure métallique s'effectue par des connecteurs de cisaillement en forme de C soudées sur les semelles supérieures des caissons. La dalle a été réalisée en béton C40 et le ferrailage longitudinal et transversal est constitué d'armatures à haute adhérence FE 36/52.

Le pont repose définitivement sur 4 appareils d'appui du type 2, en élastomère fretté de dimensions 700x600 chacun et d'une frette de 115 mm d'épaisseur contenant 7 feuillettes. Le vérinage de 40 mm du tablier est prévu sur les pièces de pont situées aux deux extrémités du caisson métallique. Le choix des élastomères a été fait entre autres, en fonction de leur tenue aux températures élevées.

FABRICATION EN ATELIER

Les éléments de charpente ont été réalisés entièrement dans les usines de l'Entreprise Semaf situées à près de 30 km de l'emplacement du projet et transportées en pièces entières de 54,00 m de longueur et pesant environ 130 t. Pour des raisons de fabrication et de transport, la charpente a été réalisée en 2 caissons et leur assemblage s'est fait par soudure contrôlée de chantier moyennant une tôle de fond raidie de 1370 mm de largeur. La tôle de fond a été considérée comme non participante à la flexion longitudinale.

Chaque caisson a été subdivisé en trois segments de 9,50 m chacun et deux autres de 12,75 m, figure (4). Les opérations de fabrication et les étapes des travaux en atelier comportaient la découpe des tôles, le chanfreinage et la préparation des bords à souder, le sablage des pièces, le soudage ainsi que l'assemblage des segments suivi du contrôle dimensionnel et géométrique des caissons et leur assemblage et montage à blanc sur plateforme. Le soudage



Figure 4 : Élément de charpente en cours de fabrication.

en atelier a été effectué suivant le procédé automatique avec fil plein sous flux et le procédé semi-automatique sous gaz. Le contrôle des soudures interne et externe par radiographie et ultrason révéla quelques imperfections et des irrégularités qui nécessitèrent des reprises et des corrections.

TRANSPORT DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

Les modes d'expédition courants en segments courts transportables de 9 à 12 m n'auraient en aucun cas répondu aux exigences du planning des travaux.

Ajoutons que l'assemblage par soudure de chantier de ces multiples tronçons dans des conditions difficiles et risquées aurait certainement conduits à une qualité incertaine et inadéquate pour cette catégorie de projet. Il était donc nécessaire d'imaginer un mode de transport par route beaucoup plus adapté au cas présent.

L'étude du transport des pièces entières de 54 m de long depuis le lieu de fabrication au site conclut que les délais de livraison de l'ouvrage pourraient être respectés et la durée du chantier considérablement limitée. Cela permettrait aussi la minimalisation des joints soudés sur chantier et l'optimisation des sections d'acier compte tenu d'une meilleure stabilité élastique en phase de construction. Toutefois, l'étude recommanda qu'avant la livraison des caissons sur chantier la vérification des ouvrages d'art à



Figure 5 : Plan de situation.
SEMAF : Atelier de fabrication El Mariottia : lieu du projet.

traverser par les convois spéciaux afin de justifier la résistance des sections structurales avec les surcharges des camions.

Signalons que les études du transport de la charpente ont débuté en même temps que les études de fabrication afin de permettre l'optimisation des dimensions, des masses et des formes des pièces à acheminer vers le site. L'acheminement des pièces sur le site ne pouvait se faire que par convois exceptionnel, ce qui suscita quelques problèmes dans la mesure où les routes à traverser étaient relativement sinueuses et étroites, figure (5).

Ce mode de transport sans précédent en Égypte a été approuvé par le maître d'ouvrage ce qui a permis la livraison de l'ensemble de l'ouvrage à temps, figure (6). L'itinéraire du convoi a été tracé puis remis aux autorités locales pour approbation préalable. Des transporteurs spécialement équipés ont été utilisés pour livrer huit caissons surdimensionnés de 54 m de long et pesant chacun près de 130 t tout le long d'un trajet de 32 km. Ce transport dans les chemins sinueux de la vieille ville du Caire fut un véritable défi.

OPÉRATIONS DE CHANTIER

Les opérations de chantier consistaient à la manutention et le levage des caissons jusqu'à leur mise en place définitive sur les appuis ainsi que toutes les séquences de soudure et l'application des couches du système de protection anti-corrosion et enfin le coulage de la dalle en place.

L'ossature métallique a été livrée la nuit en huit caissons de 54 m de long et mis en place directement à leur arrivée au site par levage à la grue sans palées provisoires. Le montage des caissons s'est effectué à l'aide de deux grues mobiles par 8 points d'élingage déterminés de façon à limiter les flèches verticales. Afin de minimiser les perturbations de la circulation dans cette zone de la ville fortement urbanisée, les opérations de levage n'ont été autorisées qu'à partir de cinq heures du matin les vendredis jours de week-end.



Figure 6 : Charpente métallique dans sa totalité en cours de chargement en atelier.

Chacun des deux caissons mis en position sur 2 appareils d'appui définitifs et deux autres temporaires. Les caissons ont été reliés entre eux par leurs semelles inférieures par soudure contrôlée d'une tôle de fond de 1370 mm de large, ce qui a permis de retirer les appareils d'appui temporaires. Le bétonnage est effectué en respectant le principe du pianotage grâce à deux outils coffrants, permettant ainsi de limiter les fissurations de la dalle. La réalisation symétrique de la dalle limite aussi l'effet dissymétrique du poids propre sur la structure métallique.

ÉTUDE DU CONTREVENTEMENT

La littérature nous rapporte un grand nombre de catastrophes de ponts et passerelles métalliques dans lesquelles le contreventement insuffisant fut incriminé. Notons entre autres le pont ferroviaire du Tay en Écosse (1879), le pont Égyptien à Saint-Petersbourg (1905) et l'effondrement spectaculaire de la passerelle de Marcy à New York (2002) etc.

En effet, la stabilité des membrures comprimées du caisson ouvert avant le coulage et la prise du béton est un problème qui nécessite une attention toute particulière. La rigidité torsionnelle du caisson ouvert en phase de construction est indubitablement insuffisante. Il faudrait dans ce cas prévoir un système adéquat de contreventement provisoire reliant les deux semelles supérieures comprimées. La rigidité des barres du contreventement compense alors la souplesse excessive des membrures comprimées du caisson ouvert.

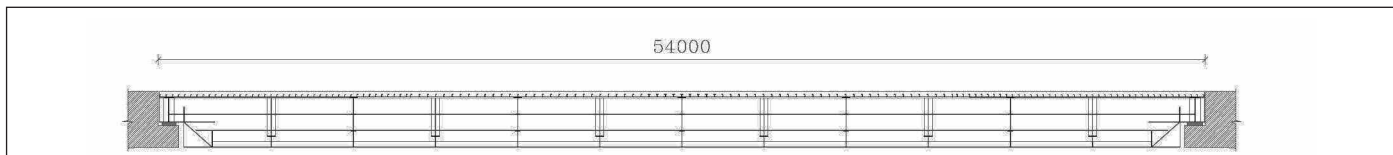
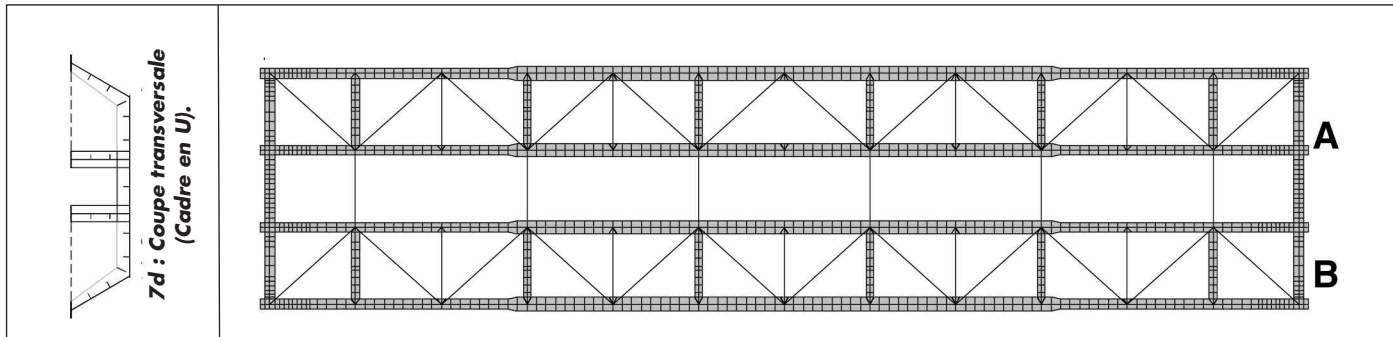
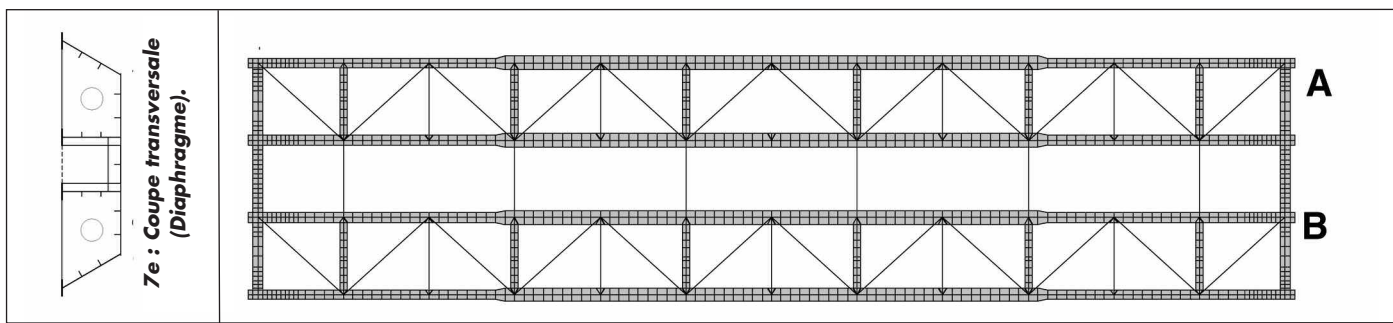
La résistance du caisson ainsi quasi-fermé augmente considérablement notamment aux moments fléchissant et de torsion. A cet effet des études paramétriques détaillées spécifiques à cet ouvrage ont été menées par les auteurs sur le modèle du pont afin d'évaluer:

- La forme efficace et la géométrie du contreventement à mettre en place,
- L'inclinaison optimale de l'âme extérieure du caisson par rapport à la verticale,
- Le mode d'attache des barres du contreventement avec le caisson.

Diverses formes et configurations géométriques de contreventement sont utilisées en renfort aux membrures comprimées des caissons ouverts. Parmi les systèmes couramment utilisés, on observe des systèmes triangulés en X (En croix de Saint-André), en W (Type Warren), en N (Type Pratt) ou en K. La figure (7) donne les détails des treillis de contreventement du pont d'El Mariottia à tablier bi-caisson composé de deux parties A et B reliées entre elles par 6 barres d'attache et deux pièces de pont aux extrémités.

A. Les caractéristiques de la section transversale

Les caractéristiques globales de la section transversale du caisson métallique à treillis ont été en premier lieu, calculées en assimilant le treillis de contreventement à une tôle continue fictive d'épaisseur équivalente suivant le concept donné dans les règles CM66. Les résultats obtenus par

Figure 7 : Système de contreventement supérieur du caisson.**7a : Coupe longitudinale et vue de l'intérieur du caisson.****7b : Contreventement symétrique.****7c : Contreventement asymétrique.****7f : Caisson Contreventé.**

cette méthode de l'âme pleine équivalente d'une poutre à treillis bien que commode d'application n'ont pas permis d'élucider l'importance de la forme, du type ni de la rigidité du système de contreventement supérieur indispensable au stade de la construction. Il était donc nécessaire de faire appel à des études plus avancées et des justifications aux éléments finis d'un modèle tridimensionnel.

B. Étude Paramétrique

Les contreventements dans ce cas sont disposés soit symétriquement par rapport à l'axe du pont en image renversée réfléchie fig. (7b) ou asymétrique dit aussi en parallèle fig. (7c). Notons que les membrures ou cordes du treillis de contreventement constituées par les semelles supérieures des caissons sont soumises à des efforts de compression. La stabilité des membrures supérieures comprimées en phase de construction du caisson vis-à-vis du flambement a été vérifiée.

Les courbes représentées sur les figures (8 à 11), relient les efforts dans les membres latéraux des deux systèmes de contreventement à savoir symétrique en image réfléchie dit en miroir et asymétrique en parallèle. La présente étude a été limitée à la comparaison des forces affectant uniquement la partie B des deux systèmes de contreventement considérés. En outre, deux cas de chargement ont été considérés notamment des charges symétriques uniformément réparties sur toute la longueur de l'ouvrage et asymétriques ne couvrant qu'une moitié de celui-ci. Ces deux cas de chargement ont permis d'évaluer séparément les effets des moments fléchissant et de torsion sur les différents éléments du treillis qui constitue le contreventement.

Les deux courbes des figures (12 et 13) donnent les efforts dans les barres d'attache reliant les deux parties A et B du contreventement, correspondants aux deux cas de chargement symétrique et asymétrique envisagés.

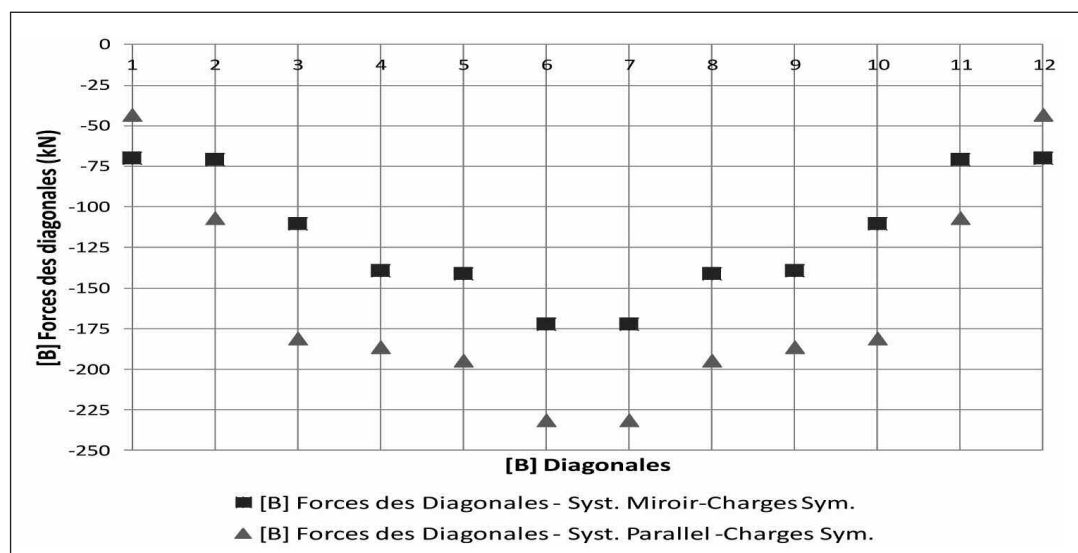


Figure 8 : Efforts dans les diagonales B (Charges Symétriques).

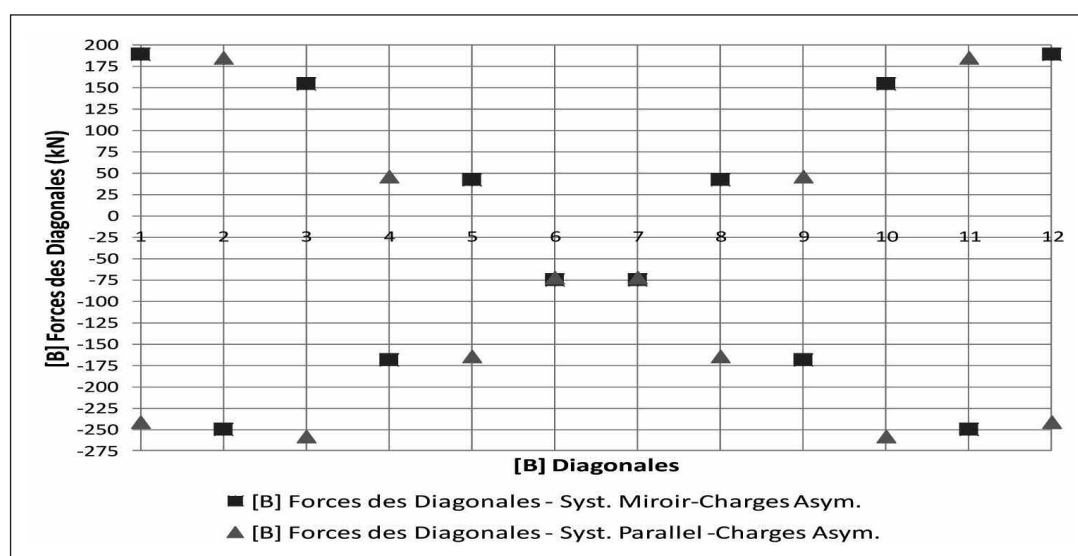


Figure 9 : Efforts dans les diagonales B (Charges Asymétriques).

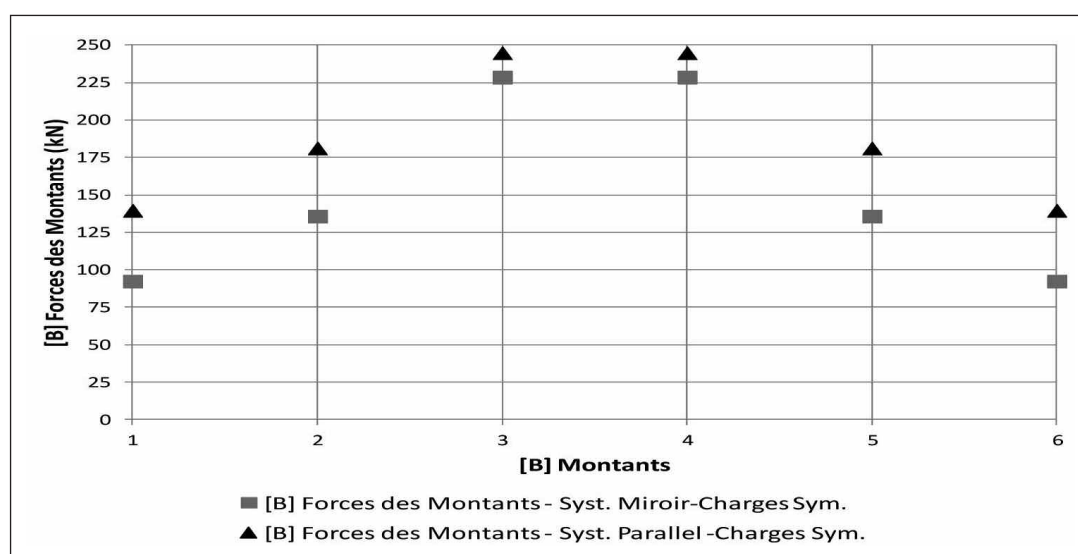


Figure 10 : Efforts dans les Montants B (Charges Symétriques).

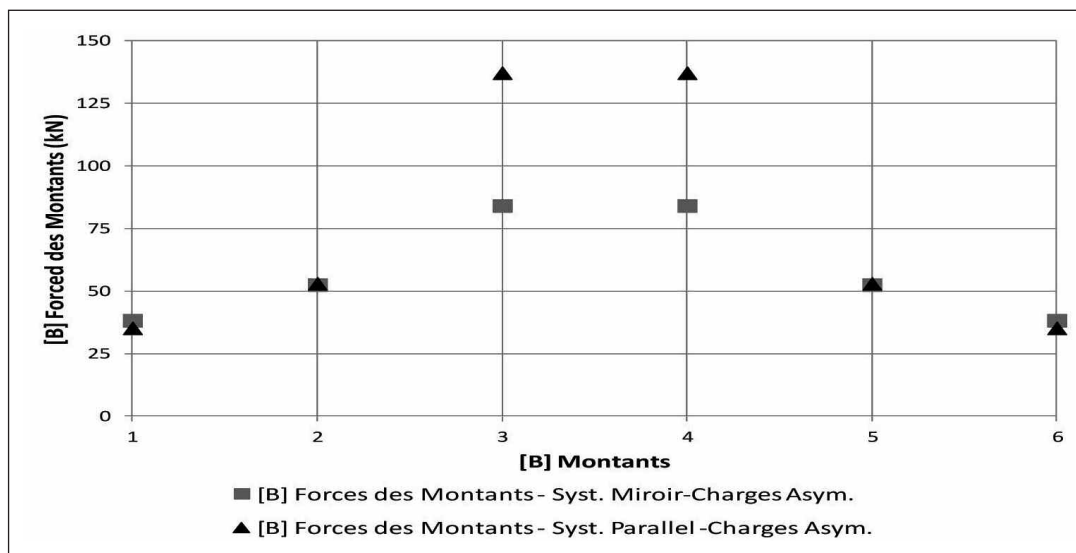


Figure 11 : Efforts dans les Montants B (Charges Asymétriques).

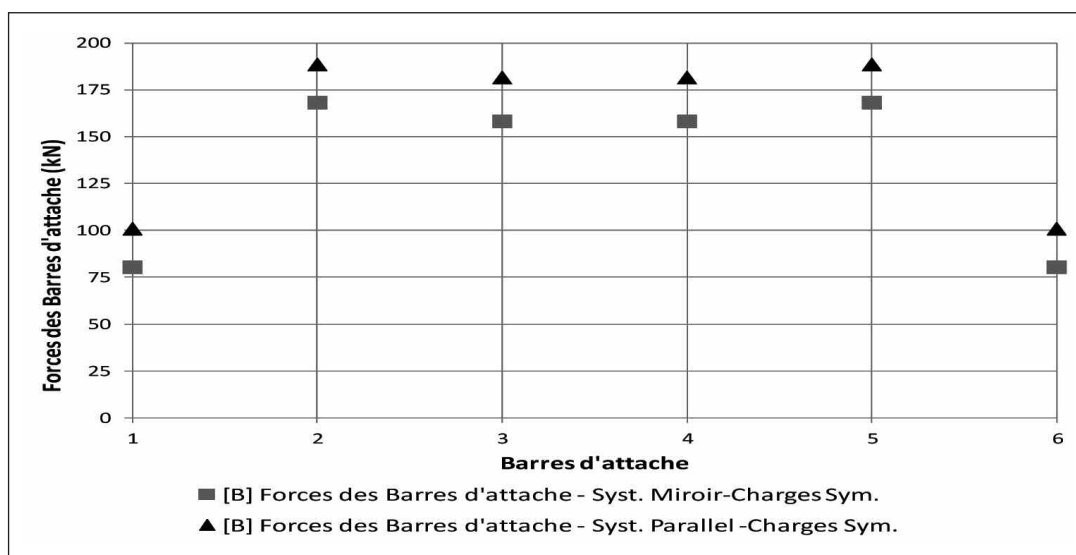


Figure 12 : Efforts des Barres d'attache (Charges Symétriques).

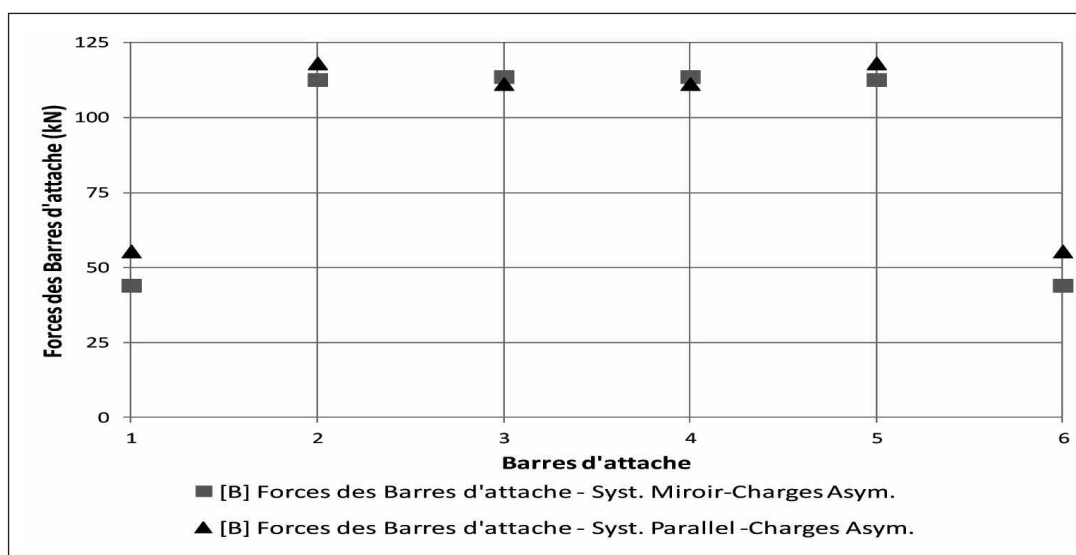


Figure 13 : Efforts des Barres d'attache (Charges Asymétriques).

C. Présentation et interprétation des Résultats

La figure (8) montre que les forces dans les éléments inclinés ou diagonales dues à des charges symétriques dans la

partie B du système parallèle sont plus élevées que ceux dans la même partie B du système en miroir d'environ 34 % à 64 %. Toutefois, pour le système de contreventement asymétrique parallèle soumis à des charges produisant des efforts de torsion, la figure (9) montre que les



Figure 14 : Ouvrage Terminé.

forces dans les diagonales sont de signes opposés, compte tenu d'abord de leur forme géométrique et de leurs inclinaisons opposées. D'autre part, les efforts dans les diagonales du système parallèle sont supérieurs de 4% à 72% par rapport à ceux calculés pour le système en miroir.

De même la figure (10) indique que les forces dues aux charges symétriques dans les montants du système parallèle sont supérieures d'environ 7 % à 51 % en comparaison avec le système en miroir. La courbe de la figure (11) relative aux charges asymétriques confirme les résultats précédemment obtenus et indique des variations allant de 8 à 63% dans les montants du système parallèle par comparaison avec le système en miroir.

Les figures (12) et (13) indiquent que les barres d'attache dans tous les cas considérés sont soumises à des efforts de traction. La figure (12) montre des écarts de 12 à 25% dans ces membres dus à un système de chargement symétrique dans le système parallèle par rapport au système en miroir. Le cas de chargement asymétrique de la figure (13) confirme cette tendance mais avec des écarts avoisinants 2 à 26%. L'intégralité des résultats de l'étude paramétrique est précisée dans la thèse de Rageh A.E.

LISTE DES PARTICIPANTS

(Pour une seule travée métallique)

- Portée métallique intermédiaire (En réalité 72 m dont deux cantilevers en béton armé de 9.0 m chacun) : 54 m
- Maîtrise d'ouvrage :
Ministry of Housing, Utilities and Urban Development – Egypt.

- Maîtrise d'œuvre :
EHAF Consulting Engineers- Cairo, Egypt.
- Architecte Associé :
Youssef Ghali – Cairo – Egypt
- Entreprise générale :
Société Egyptienne d'Entreprises
(Moukhtar Ibrahim) – Giza, Egypt.
- Entreprise Structure Métallique :
Railway Equipment Factory (SEMAF)
Helwan, Egypt.

CONCLUSION

Les problèmes spécifiques à l'ouvrage étudié qui ont retenu toute notre attention et ont nécessité une réflexion particulière sont d'une part l'efficacité de la disposition du contreventement et d'autre part la vérification en phase de construction du caisson métallique ouvert.

En conclusion, la stabilité des membrures comprimées des caissons métalliques ouverts en phase de construction ne peut être assurée que par un système de contreventement sûr et efficace.

Il est encore trop tôt pour donner une préférence quant à un système de contreventement plutôt qu'un autre en ce qui concerne le comportement statique ou fonctionnel d'un pont à tablier en bi-caisson. Toutefois, les résultats tout à fait préliminaires indiquent que les systèmes symétriques en miroir semblent être les mieux adaptés pour les ponts à travée simple.

Dans le cas présent, l'arrangement de contreventement du type Warren symétrique en image réfléchi a été choisi compte tenu de ses bonnes performances aussi bien en flexion qu'en torsion.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arab Republic of Egypt, Ministry of Housing, Utilities and Urban Communities. 2001. Egyptian Code for Practice for Steel Construction and Bridges (ASD).
- Abbas, H., 2012, "Bridges From Egypt", Proceedings of Al-Azhar Engineering Twelfth International Conference - Cairo-Egypt.

- Abbas, H., 2012, « Le Viaduc d'El Mariottia – Tronçon Ouest-Guizèh – Egypte », Bulletin Ponts Métalliques, No. 26, ConstruirAcier, France.
- Rageh A.E., 2012, "Elastic and Inelastic Stability of Steel Box Girders", M.Sc. Thesis, Al Azhar University, Faculty of Engineering, Cairo, Egypt.
- Règles de Calcul des Constructions en Acier, « Règle CM 66 ».



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux Éditions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. 01 42 86 55 65 – Fax 01 42 60 45 35

Nom

Raison sociale

Adresse

Code postal Ville Pays

Je m'abonne pour l'année 2015 (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : 256 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : 309 € |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : 320 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : 369 € |

Je joins : ☐ Un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA

- ☐ Un virement bancaire aux Editions ESKA -
BNP Paris - Champs Elysées - 30004-00804 - Compte 000101399.56

* 5/2014