

Observations et mesures expérimentales lors de l'ouverture d'un câble porteur

Martin Talbot, ing., Ph. D.
Jean-François Laflamme, ing., M. Sc.
Direction des structures
Ministère des Transports du Québec

Résumé

L'ouverture d'un câble porteur sur plusieurs segments constitue une approche essentielle dans l'évaluation d'un pont suspendu. Cette étape permet d'établir l'état structural réel des torons, généralement cachés par les fils de guipage. Les résultats de cette ouverture pour les deux câbles porteurs du pont de l'Île-d'Orléans sont présentés ici. La mise en œuvre de cette ouverture et les observations lors de l'écartement des torons sont d'abord décrites, en particulier les mesures de galvanisation, l'extraction de fils et les tests en laboratoire. Par la suite, les campagnes de mesures par vibromètre laser et les mesures dynamiques par des capteurs à fibre optique sont introduites. Six capteurs ont ainsi pu mettre en évidence avec précision certains gradients de contraintes existant dans les torons des câbles porteurs.

1. INTRODUCTION

Le pont de l'Île-d'Orléans est une belle réalisation du début des années trente des ingénieurs montréalais Monsarrat et Pratley (aussi concepteurs du *Lions' Gate Bridge* de Vancouver, à peu près à la même époque). Il a été ouvert à la circulation en 1935 (travaux débutés en 1931) soit il y a plus de 71 ans (figures 1 et 2). Il mesure 722 m d'un bloc d'ancrage à l'autre et il possède trois travées de 127 m, de 323 m (centrale) et de 127 m. Ce pont suspendu n'a pas subi de modification ou de renforcement structural depuis 1935. Seule sa charge permanente a été légèrement modifiée par l'ajout d'une mince couche de bitume (revêtement antidérapant en 1962 et réparation du bitume en 2001).

Le pont de l'Île-d'Orléans a déjà été décrit dans la littérature (Banks, 1936) et il a fait l'objet de plusieurs campagnes de mesures pour évaluer son état structural et son comportement (Bergeron (1982), Talbot, 2000, 2001, 2002, 2003a, 2003b, 2003c), Talbot et Stoyanoff (2005), Stoyanoff et Talbot (2006), LeBoeuf et Talbot (2006). Pridham *et al.* (2006a et 2006b).

Plusieurs de ces campagnes ont d'ailleurs été inspirées de ce qui s'est fait sur des ouvrages comparables tel le *Lions' Gate Bridge* (Buckland, 1981a, b et 2003).

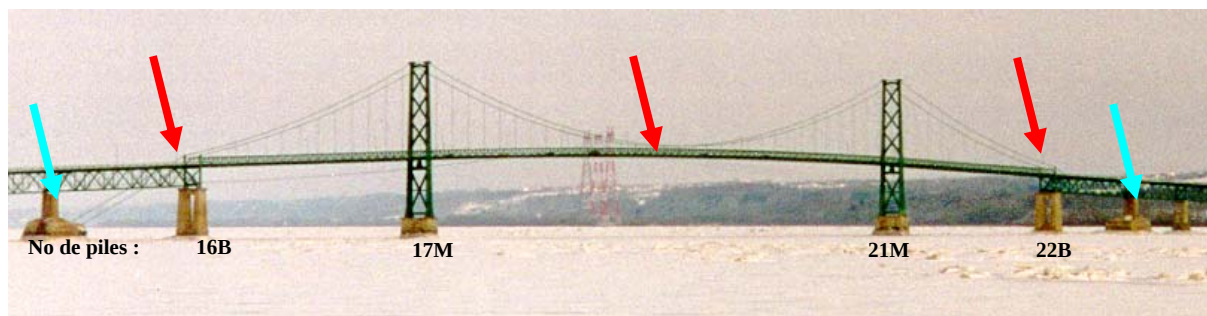


Figure 1 : Vue générale du pont de l'Île-d'Orléans (les flèches rouges indiquent les zones d'ouverture du câble porteur et les flèches bleues indiquent les blocs d'ancrage)

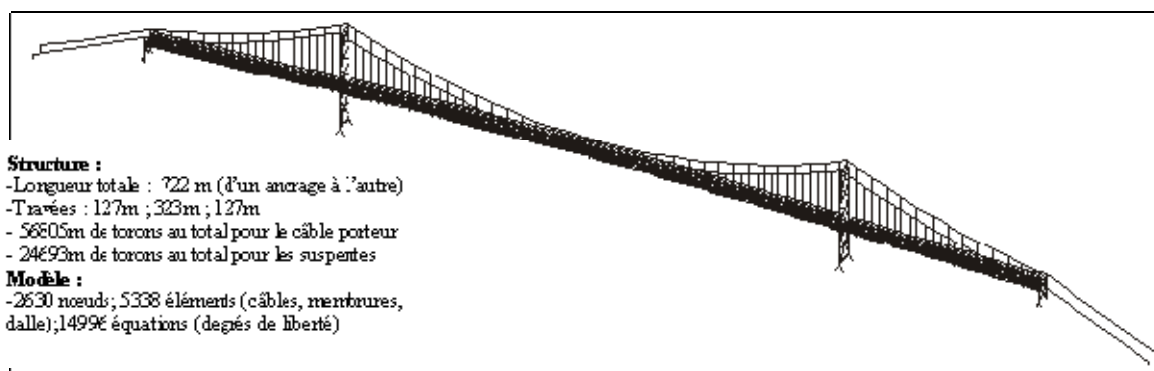


Figure 2 : Modèle par éléments finis 3-D complet du pont de l'Île-d'Orléans

2. L'OUVERTURE D'UN CÂBLE PORTEUR

L'ouverture d'un câble porteur est une étape essentielle dans l'évaluation d'un pont suspendu. En effet, le câble porteur constitue l'élément le plus important d'un ouvrage suspendu et celui-ci est en général caché par une gaine protectrice (contrairement aux haubans ou aux suspentes). Il importe donc d'ouvrir le câble sur certains segments de manière à observer les fils et à effectuer les mesures qui s'imposent.

Récemment, un guide pour l'inspection de tels câbles a été édité (NCHRP 534, 2004). C'est ce guide qui a servi de base pour établir les étapes à suivre. Il a fallu cependant l'adapter pour tenir compte du fait que le pont de l'Île-d'Orléans est constitué de 37 torons (figure 3) et non de milliers de fils parallèles.

Plusieurs auteurs ont aussi traité des différents aspects à considérer lors de l'évaluation de câbles et torons. Des exemples ainsi que des analyses expérimentales et théoriques pertinentes sont donnés dans Stahl et Gagnon (1996), Kretz *et al.* (2006), Brevet *et al.* (2004a, b), Elachachi *et al.* (2005), Crémone (2003), Godart *et al.* (2001), Faber *et al.* (2003), Raoof *et al.* (1998,1993), Mahmoud (2006a, b).

L'importance d'ouvrir le câble porteur est bien démontrée dans le cas d'un ouvrage très similaire à celui du pont de l'Île-d'Orléans, soit le pont Waldo Hancock dans l'État du Maine (Andersen *et*

al., 2004) où l'on découvrit un câble fortement corrodé avec des dizaines de fils cassés nécessitant finalement le remplacement complet de l'ouvrage. Ce genre de découverte n'est cependant pas réservé aux seuls ouvrages plus anciens puisque l'on a découvert récemment sur un pont beaucoup plus moderne, soit le *Forth Road Bridge* en Angleterre (Colford *et al.*, 2006), un état de corrosion avancé avec aussi de nombreux fils cassés. Or, ce pont est en tous points similaire aux ponts nord-américains modernes tel le pont Pierre-Laporte.

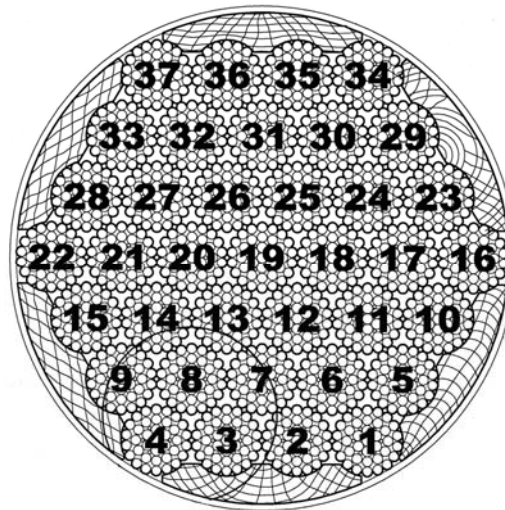


Figure 3 : Section typique du câble (1591 fils au total)

3. LE CAS DU PONT DE L'ÎLE-D'ORLÉANS

Le câble du pont de l'Île-d'Orléans a déjà fait l'objet d'une première ouverture en 1981 (voir Bergeron, 1982). Cette ouverture a permis de constater qu'il était globalement en bon état avec quelques petites zones de corrosion dues à une perte de galvanisation ponctuelle; mais les mesures et observations effectuées sont restées très qualitatives.

Deux séries d'ouvertures ont été effectuées en 2005 et 2006 par la Direction des structures. Elles ont mobilisé l'expertise de nombreux intervenants du ministère des Transports (Direction des structures, Direction de la Capitale-Nationale, Direction du laboratoire des chaussées, Service des matériaux d'infrastructures) et firmes privées (pour l'installation des échafaudages, la prise de film par caméras boroscopiques et la fourniture des jauges à fibre optique).

Cette approche se voulait la plus exhaustive possible. Elle a permis l'établissement de l'état physique du câble (notamment, son niveau de corrosion et l'épaisseur précise de zinc restante), la résistance à la rupture des fils, l'établissement de l'état de contraintes dû aux charges mortes et vives par des mesures *in situ*.

En résumé, les grandes étapes effectuées ont été les suivantes pour chacune des six ouvertures (flèches rouges à la figure 1 en amont et en aval) :

- Installation des échafaudages (figure 4);
- Déguipage du câble et prise d'échantillons de fils de guipage à des fins d'analyses et de tests en laboratoire par le Service des matériaux d'infrastructures (épaisseur de zinc et tests à la rupture);
- Nettoyage léger à la brosse pour premières observations;
- Nettoyage au jet de maïs (figure 5). Ce type de nettoyage permet d'enlever toutes les impuretés sans faire disparaître la corrosion brune d'oxyde de fer et blanche d'oxyde de zinc (figure 6). Un nettoyage trop puissant empêche la pose d'un bon diagnostic en ramenant la vieille surface au zinc ou à l'acier pur;
- Mesures sur des centaines de points de l'épaisseur de galvanisation par l'*Elcometer* (figure 7 et rapport de Rousseau et Villeneuve, 2007);
- Écartement des torons à l'aide de coins de bois pour y filmer l'intérieur (jusqu'au centre du câble) à l'aide d'une caméra boroscopique (figures 8 et 9);
- Extraction d'un fil de plusieurs mètres à chacune des six ouvertures (figures 10 et 11) aux fins d'analyses et de tests par le Service des matériaux d'infrastructures (épaisseur de zinc, notamment par dissolution, en complément à l'*Elcometer*, et tests à la rupture par Rousseau et Villeneuve, 2007);
- Tests *in situ* par l'équipe du laboratoire mobile;
- Dans un premier temps, nous avons estimé la charge morte dans les torons pour trois des six ouvertures par une technique vibratoire (figures 12 et 13) qui sera décrite en détail à la section 4;
- Pour les quatre chambres d'ancrage, nous avons récupéré les valeurs obtenues par cette même technique vibratoire provenant d'une campagne de mesure de 2002;
- Dans un deuxième temps, nous avons utilisé une nouvelle technique de jauges à fibre optique (SOFO) en dynamique pour estimer le niveau réel de charges vives dans le câble (figures 14 et 15) pour une seule ouverture et pour un seul bloc d'ancrage;
- Fermeture du câble par la pose d'une pâte de zinc spéciale et d'un nouveau fil de guipage;
- Et enfin, pose d'une couche finale de peinture (figure 16) et démantèlement des échafaudages.

Dans l'ensemble, tous ces tests ont démontré que le câble porteur était dans un état remarquablement bon compte tenu de son âge et en comparaison d'ouvrages similaires dans le monde, et ce, tel qu'il est démontré en général dans la littérature. Aucun fil cassé n'a été observé.

Le niveau de corrosion brune (oxyde de fer) due à la disparition complète de la couche de galvanisation n'a été observé que sur de petites zones ponctuelles. Ces zones étaient généralement situées dans les torons du bas et sur les fils externes. À l'intérieur du câble, cette corrosion était pratiquement absente. La surface externe des fils des 18 torons externes était cependant généralement couverte d'une couche d'oxyde de zinc (corrosion blanche).



Figure 4 : Échafaudages



Figure 5 : Câble nettoyé



Figure 6 : Détail de deux types de corrosion



Figure 7 : Mesure de zinc par *Elcometer*



Figure 8 : Caméra boroscopique

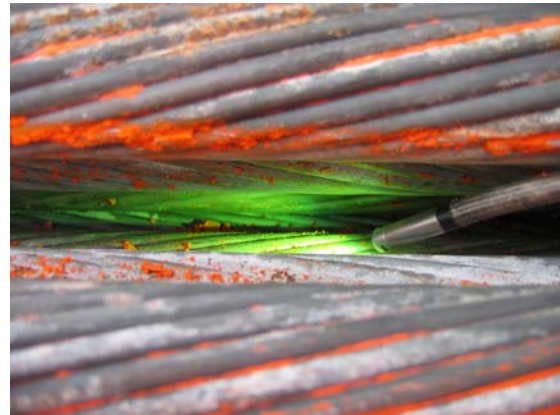


Figure 9 : Caméra boroscopique



Figure 10 : Extraction d'un fil



Figure 11 : Extraction d'un fil



Figure 12 : Tests de vibromètre laser



Figure 13 : Tests de vibromètre laser



Figure 14 : Jauges SOFO, section de câble ouverte



Figure 15 : Jauges SOFO, section de câble dans la chambre d'ancrage

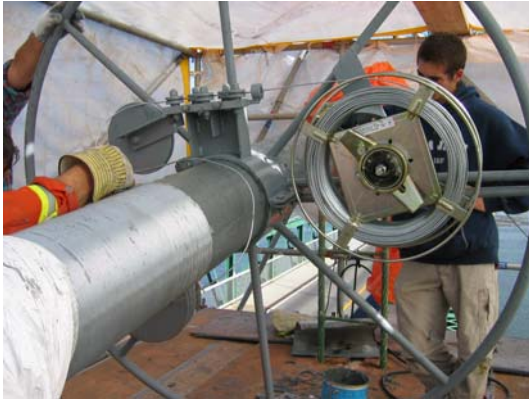


Figure 16 : Fermeture du câble porteur

Les mesures par Elcometer et en laboratoire ont démontré que l'épaisseur de la couche de zinc oscillait entre 44 μm et 65 μm . La valeur théorique devrait être de l'ordre de 50 μm environ, ce qui constitue une valeur excellente. Les limites élastiques (840 MPa à 886 MPa) et à la rupture (1543 MPa à 1650 MPa) sont aussi voisines de celles des fils neufs de l'époque. Ces résultats sont résumés à la figure 17 tirée du rapport de Rousseau et Villeneuve (2007).

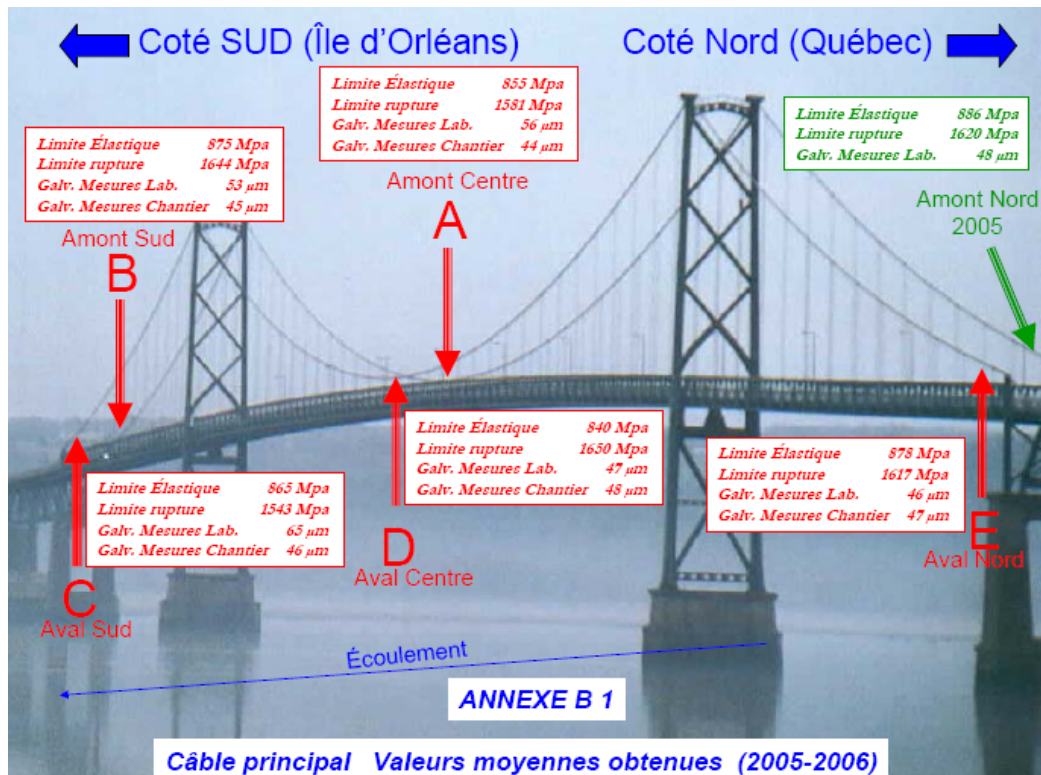


Figure 17 : Valeurs moyennes compilées des six ouvertures du câble (Rousseau Villeneuve, 2007).

Enfin, la galvanisation des fils de guipage a aussi été étudiée et a permis de constater qu'elle était encore en bon état (l'épaisseur de la couche de zinc oscillait entre 45 μm et 51 μm). Cette valeur est importante vu la très forte exposition de ces fils aux agressions du milieu depuis 71 ans.

4. CAMPAGNE DE MESURES DU LABORATOIRE MOBILE

Le laboratoire mobile a profité des ouvertures du câble porteur pour effectuer des mesures sur les torons autrement inaccessibles. Dans un premier temps, un vibromètre laser (figures 12 et 13) a été utilisé pour mesurer la tension sous la charge morte (charge permanente) sur les 18 torons formant la circonférence du câble porteur comme mentionné précédemment. Dans un second temps, on a effectué des mesures de déformations sous charges vives sur les torons au centre du câble porteur est, ainsi qu'au bloc d'ancrage sud-est à l'aide de jauges à fibre optique.

4.1 Tension sous la charge morte

En se basant sur la théorie de la corde vibrante, il est possible de déterminer la tension dans les torons qui composent le câble porteur du pont de l'Île-d'Orléans. Cette approche a déjà été citée par plusieurs auteurs pour le traitement de câbles et de torons en général. Pour une description détaillée de la théorie et de la technique, il est possible de se référer aux publications suivantes : Angelo (1997), Chase et Washer (1997), Ciolko (1999a, b), Cunha et Caetano (1999), Gourmelon (1985, 1986, 1997), et Robert (1991, 1993). Plus récemment, Talbot (2001) et Laflamme et Mercier (2006), ont décrit des cas d'application de cette technique à la Direction des structures.

Afin de ne pas prolonger l'ouverture du câble porteur, le laboratoire mobile a privilégié une technique qui permet une installation rapide pour effectuer les mesures, raison pour laquelle le vibromètre laser a été utilisé. De plus, des mesures utilisant la même technique avaient été effectuées avec succès dans les quatre chambres d'ancrage (4 x 37 torons) du même pont en 2002. Le principe de la technique est décrit à la figure 18. Il consiste à mesurer précisément la vitesse de vibration du toron par interférométrie laser, d'en extraire les fréquences de vibration par FFT et d'en déduire la tension par comparaison avec une charte de valeurs provenant des résultats numériques par éléments finis.

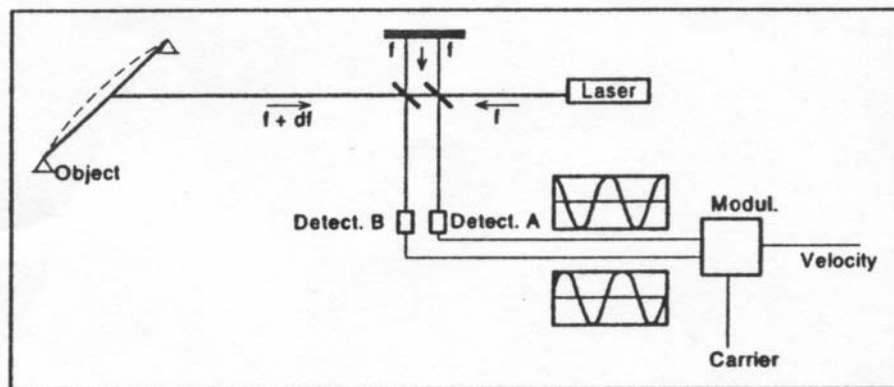


Figure 18 : Schéma théorique de l'interférométrie laser (d'après Cunha *et al.*, 1999)

L'appareil utilisé pour les mesures est le PDV-100 de la compagnie Polytec. Des acquisitions de 65 secondes ont été réalisées avec une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz. Bien que l'objectif des mesures fût de déterminer la tension sous la charge

morte de la structure, les mesures ont dû être effectuées durant le jour sous le trafic ambiant. Des précautions ont été prises pour assurer un signal de qualité et surtout ne pas l'entacher de bruit (passage de camions). Les mesures s'effectuaient la plupart du temps lorsqu'il n'y avait pas de véhicules sur la partie centrale du tablier et reprises plusieurs fois afin de diminuer l'influence de possibles véhicules et ainsi obtenir des fréquences moyennes valables.

Pour permettre au toron de vibrer librement par rapport à l'ensemble du câble porteur, ce dernier a été soulevé de l'ensemble avec des coins prismatiques en bois d'érable situés aux extrémités près des suspentes comme le montre la figure 12. Les coins ont été insérés près des suspentes afin d'avoir une longueur libre pour la vibration la plus grande possible. Un ruban réfléchissant a été collé sur le toron de manière à bien réfléchir le signal du laser. La position du point de mesure a été calculée afin de s'assurer qu'il y avait toujours de l'amplitude et ainsi éviter un nœud. L'excitation du toron s'effectuait en frappant sur celui-ci à main nue avec un faible impact.

Le traitement des signaux obtenus est montré pour le câble ouest au centre, toron 22, essai 3 à la figure 19. Le tableau 1 résume les efforts obtenus pour deux des segments ouverts et les quatre chambres d'ancrage. On remarque que les valeurs obtenues sont, en moyenne, voisines des valeurs calculées par éléments finis. Cependant, il y a des différences au sein d'une section donnée. Il y a un léger gradient assez peu significatif (la précision de la méthode est de l'ordre de 5 %) pour les sections ouvertes, mais beaucoup plus important pour les chambres d'ancrage, soit de l'ordre de 50 kN de haut en bas.

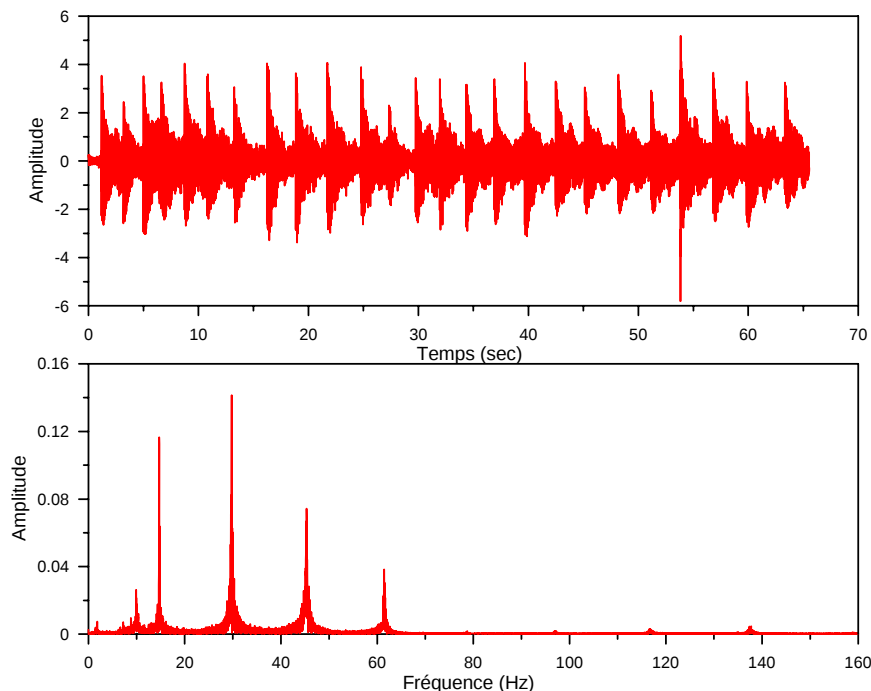


Figure 19 : Câble ouest au centre, toron 22, essai 3

Tableau 1.a						Valeurs moyennes
Efforts des torons (kN)						par rangée (kN):
Extrémité sud-est		270	275	265	286	274,0
	261					285,5
	262					262,5
	270					270,0
	261					261,5
	269					272,0
		263	262	270	278	268,3
Moyennes par colonne (kN)	264,6	266,5	268,5	267,5	282,0	276,0
Moyenne totale (kN):		270,7				

Tableau 1.b						Valeurs moyennes
Efforts des torons (kN):						par rangée (kN):
Centre sud-ouest		274	270	266	273	270,8
	267				267	266,5
	265				270	267,3
	268				271	269,3
	263				265	263,8
	268				266	266,8
		262	262	253	263	260,0
Moyennes par colonne (kN)	265,9	268,0	266,0	259,5	268,0	267,5
Moyenne totale (kN):		266,1				

Tableau 1.c						Valeurs moyennes
Efforts moyens des torons (kN)						par rangée (kN):
Moyenne des 4 chambres d’ancrage Soit 148 torons au total		266	273	276	267	270,1
	275	286	293	282	285	284,2
	284	280	269	263	283	278,7
	303	285	265	269	290	287,3
	300	282	291	283	285	291,4
	315	306	303	303	302	308,4
		330	310	315	329	321,1
Moyennes par colonne (kN)	295,4	290,6	286,3	284,4	291,6	303,6
Moyenne totale (kN):		291,2				

Tableau 1 : Résumé des tensions sous charge morte dans certains torons accessibles du câble porteur

4.2 Déformations sous charges vives

Des mesures de déformations de certains torons du câble porteur est, au centre et dans la chambre d'ancrage sud, ont été effectuées en conditions quasi statiques et dynamiques sous trafic contrôlé avec deux charges connues. Des essais ont été réalisés avec un et deux camions 12 roues dont la masse pesée précisément est d'un peu plus de 30 000 kg chacun. Durant les essais qui ont été réalisés de jour, le pont a été fermé à la circulation normale pour permettre le passage des véhicules d'essais qui circulaient du sud vers le

nord. Pour les essais avec un camion, celui-ci circulait dans sa voie de circulation normale du côté du câble porteur instrumenté. Pour les essais avec deux camions, ces derniers circulaient côte à côte dans les deux voies étroites de circulation.

Le système SOFO Dynamique et les jauges de déformation SOFO de la compagnie SMARTEC ont été utilisés pour ce projet. Les jauges de déformation sont considérées comme des capteurs à longue base puisque la partie active peut mesurer de 20 cm à plusieurs mètres. Dans le présent projet, des jauges avec une zone active de 30 cm ont été utilisées. Les jauges sont protégées par une enveloppe protectrice en plastique. La partie active du capteur se situe entre deux points d'attache mécanique qui ont été fixés sur les torons à l'aide de collet en acier. La partie active du capteur se compose de deux fibres optiques; la première est la fibre active qui est tendue entre les points d'attache et la seconde est la fibre de référence libre à l'intérieur des points d'attache qui mesurent les effets de la température.

Le principe d'interférométrie de Michelson est utilisé pour mesurer la différence de longueur entre les deux fibres causée par le mouvement des points d'attache aux extrémités du capteur. Un système optomécanique est utilisé pour faire l'acquisition des signaux à haute fréquence (Del Grosso *et al.*, 2005).

Pour les mesures en conditions quasi statiques, la fréquence d'échantillonnage était de 250 Hz alors que pour les mesures en conditions dynamiques, elle était de 500 Hz. Six jauges SOFO ont été utilisées (figures 16 et 17), soit aux coins de l'hexagone que forme le câble porteur comme le montre la figure 3.

Le fait d'utiliser six jauges a fourni une certaine redondance fort utile puisque certaines jauges n'ont pas toujours bien fonctionné. Ainsi, avec cinq jauges, il était toujours possible de calculer des efforts résultants. En fait, il fallait un minimum de quatre jauges pour effectuer un calcul des quatre efforts N , M_y , M_z et B , comme utilisées pour les sections d'acier par le laboratoire mobile (Talbot *et al.*, 1993). Cette approche constitue une approximation puisqu'elle suppose que la section constituée de 37 torons se comporte de manière parfaitement solidaire, ce qui n'est probablement pas le cas. Elle met cependant en lumière le fait que le câble ne se comporte pas simplement comme un élément purement axial, comme le veut la théorie communément acceptée des ponts suspendus.

Les résultats retenus ici sont ceux de deux camions simultanés roulant côte à côte à 7 km/h (essais quasi statiques) et à 72 km/h (essais dynamiques) (vitesse maximale sécuritaire pour deux camions). En effet, le fait de doubler le poids de la charge vive permet d'augmenter le niveau de déformation mesuré par les jauges.

4.2.1 Cas quasi statiques

Les figures 20 à 25 montrent les résultats quasi statiques. En particulier, les figures 20 à 22 montrent les valeurs pour la section au centre du pont. À la figure 20, il est possible d'observer la différence notable de déformations entre les cinq jauges (la jauge 5 a mal fonctionné) mettant en évidence le fait que le câble porteur ne se comporte pas comme un élément purement axial. La contrainte calculée *a posteriori* avec ces déformations varie, à la position maximale, de 14,5 MPa à 19,4 MPa selon la jauge. Ici, ce sont les torons inférieurs qui sont les plus tendus lors du passage des camions au centre du segment instrumenté.

L'effort normal ou axial résultant est donné à la figure 21. Les valeurs obtenues se comparent bien aux valeurs théoriques provenant du modèle par éléments finis tridimensionnels de la figure 2 (effort maximal théorique de 466,6 kN et expérimental de 429,0 kN). Le moment est aussi donné à la figure 22.

Les figures 23 à 25 sont données pour la section dans la chambre d'ancrage. À la figure 23, il est possible d'observer la différence notable de déformations des six jauges mettant encore en évidence le fait que le câble porteur ne se comporte pas comme un élément purement axial. Cette différence n'a cependant pas le même profil que pour la section centrale précédente. La contrainte calculée *a posteriori* avec ces déformations varie, à la position maximale, de 10,4 MPa à 21,3 MPa selon les jauges.

L'effort axial résultant est donné à la figure 24. Les valeurs obtenues se comparent bien aux valeurs théoriques provenant du modèle par éléments finis (effort maximum théorique de 495,3 kN et expérimental de 438,6 kN). Le moment est donné à la figure 25 et est de sens opposé à celui de la figure 22.

4.2.2 Cas dynamiques

Les figures 26 à 31 montrent les résultats pour les deux camions roulant à 72 km/h. En particulier, les figures 26 à 28 donnent les valeurs pour la section au centre du pont. L'effort normal ou axial résultant est donné à la figure 27. La valeur maximale observée est de 494,3 kN soit 1,15 fois la valeur quasi statique expérimentale. Le moment est donné à la figure 28.

Les figures 29 à 31 donnent les valeurs pour la section à la chambre d'ancrage. L'effort normal ou axial résultant est donné à la figure 30. La valeur maximale observée est de 487,2 kN soit 1,11 fois la valeur quasi statique. Le moment est donné à la figure 31.

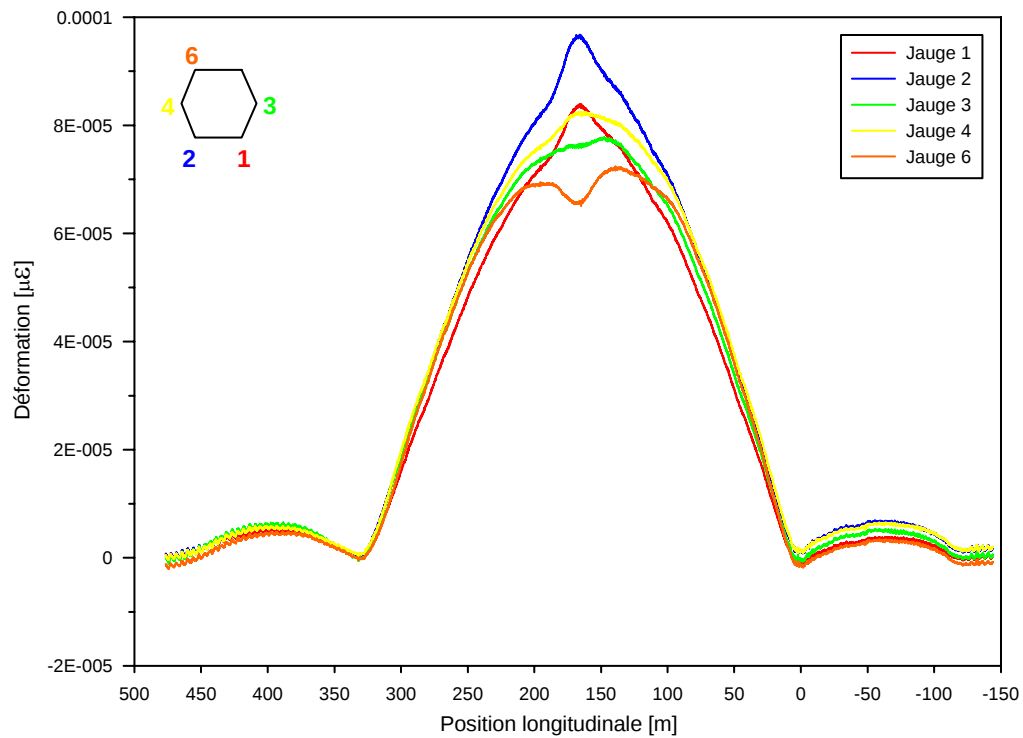


Figure 20 : Essais dynamiques, déformations des jauges SOFO pour deux camions, vitesse de 7 km/h au centre du pont

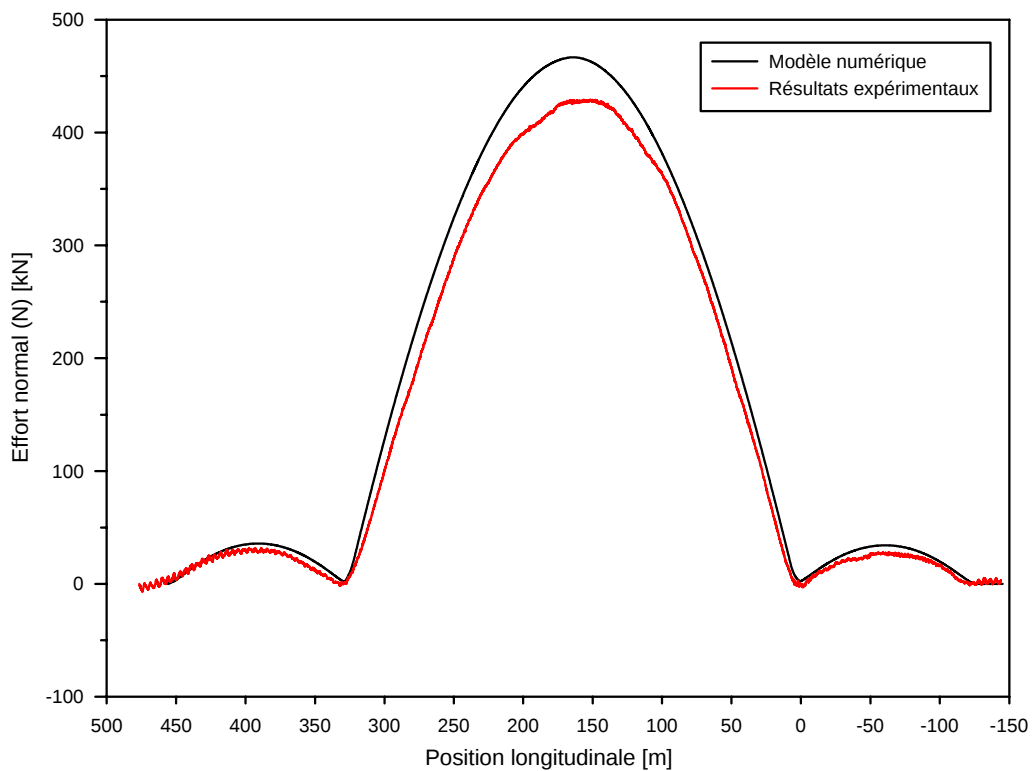


Figure 21 : Essais dynamiques, effort normal (axial) pour deux camions, vitesse de 7 km/h au centre du pont

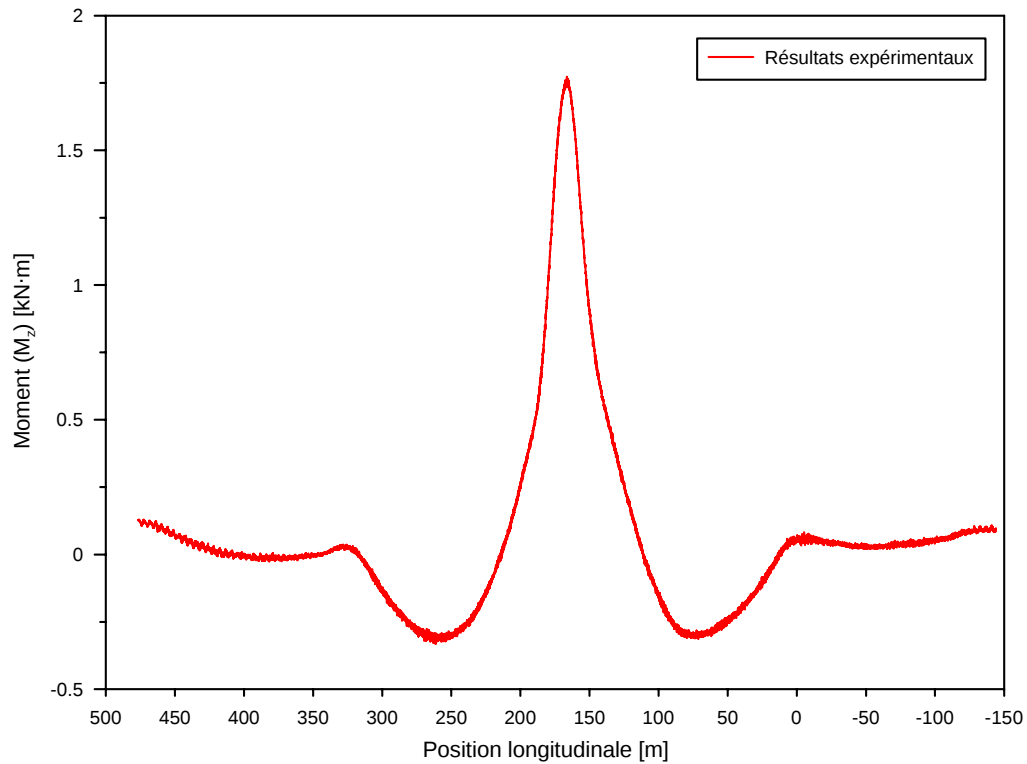


Figure 22 : Essais dynamiques, moment principal pour deux camions, vitesse de 7 km/h au centre du pont

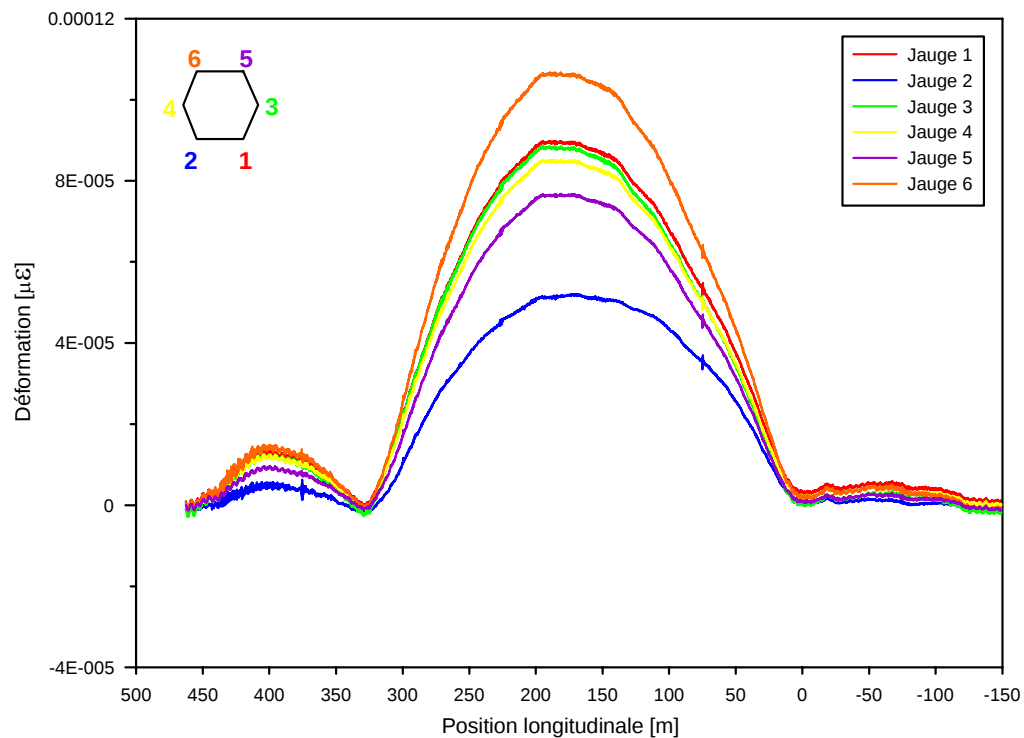


Figure 23 : Essais dynamiques déformations des jauges SOFO pour deux camions, vitesse de 7 km/h à la chambre d'ancrage

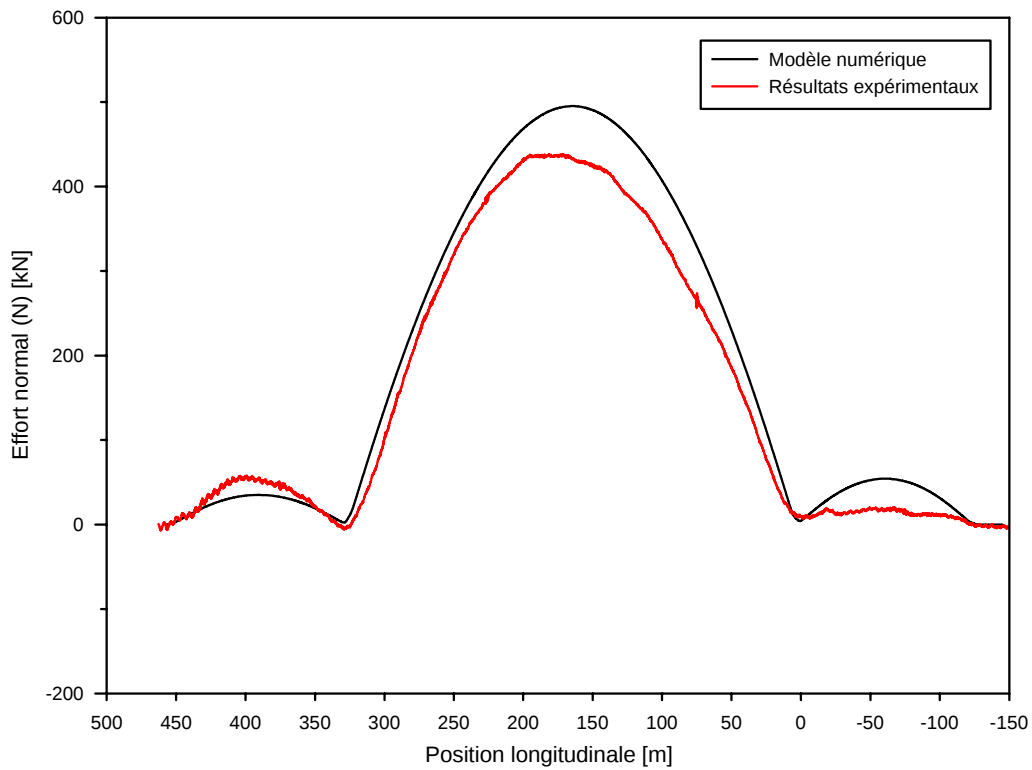


Figure 24 : Essais dynamiques, effort normal (axial) pour deux camions, vitesse de 7 km/h à la chambre d'ancrage

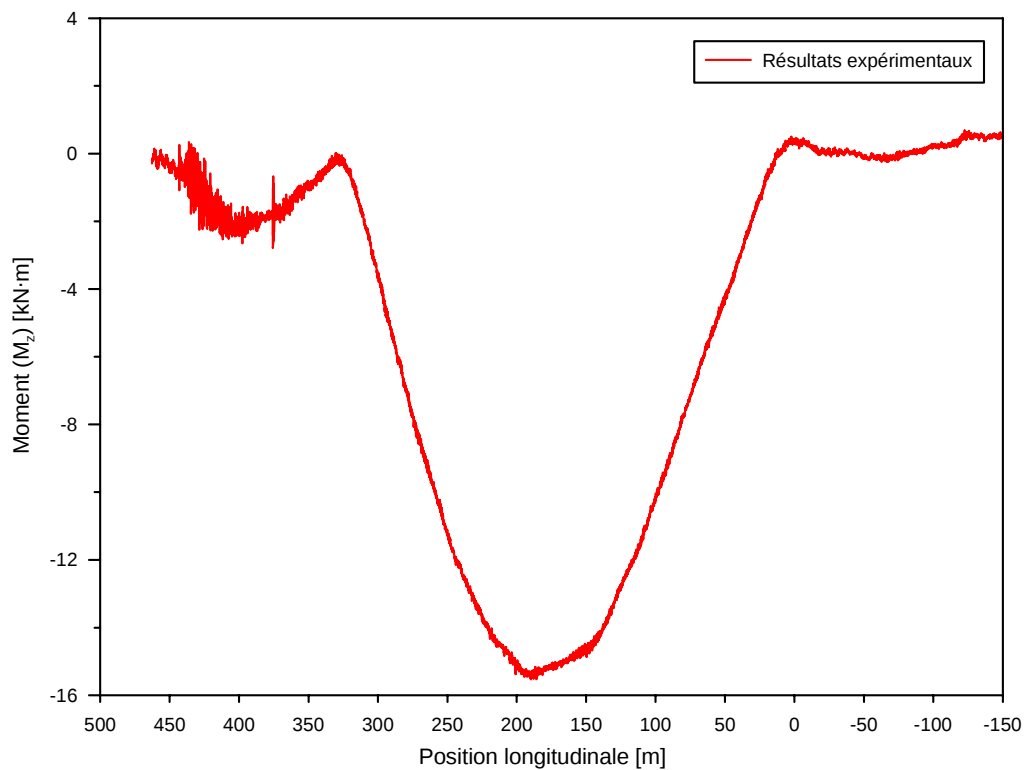


Figure 25 : Essais dynamiques, moment principal pour deux camions, vitesse de 7 km/h à la chambre d'ancrage

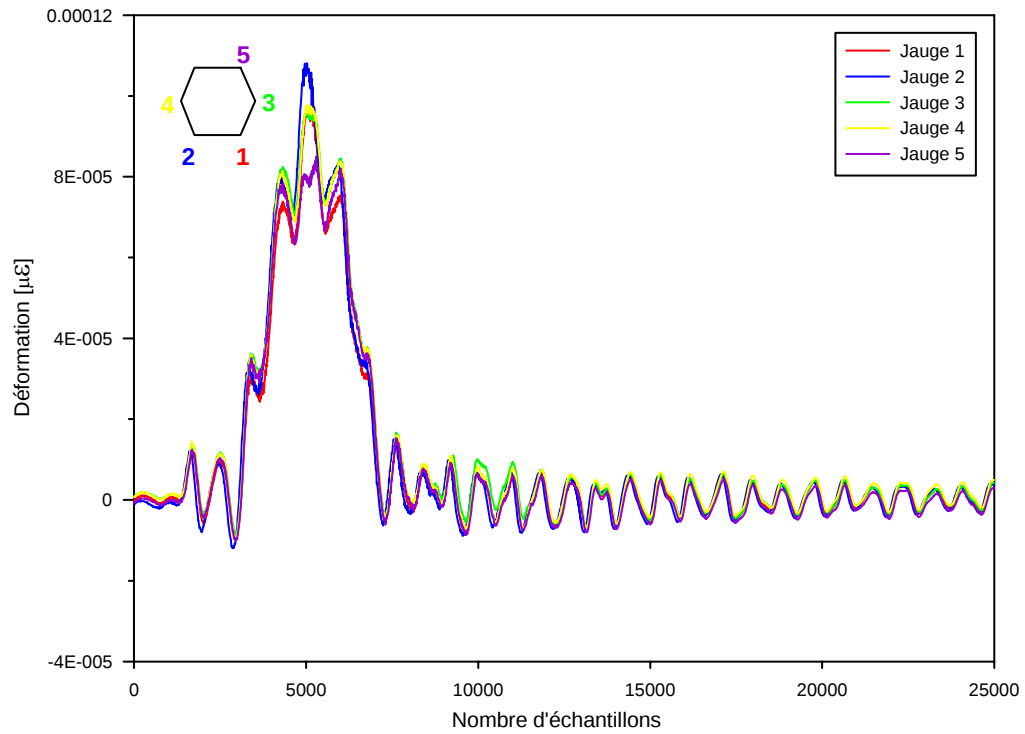


Figure 26 : Essais dynamiques, déformations des jauges SOFO pour deux camions, vitesse de 72 km/h au centre du pont

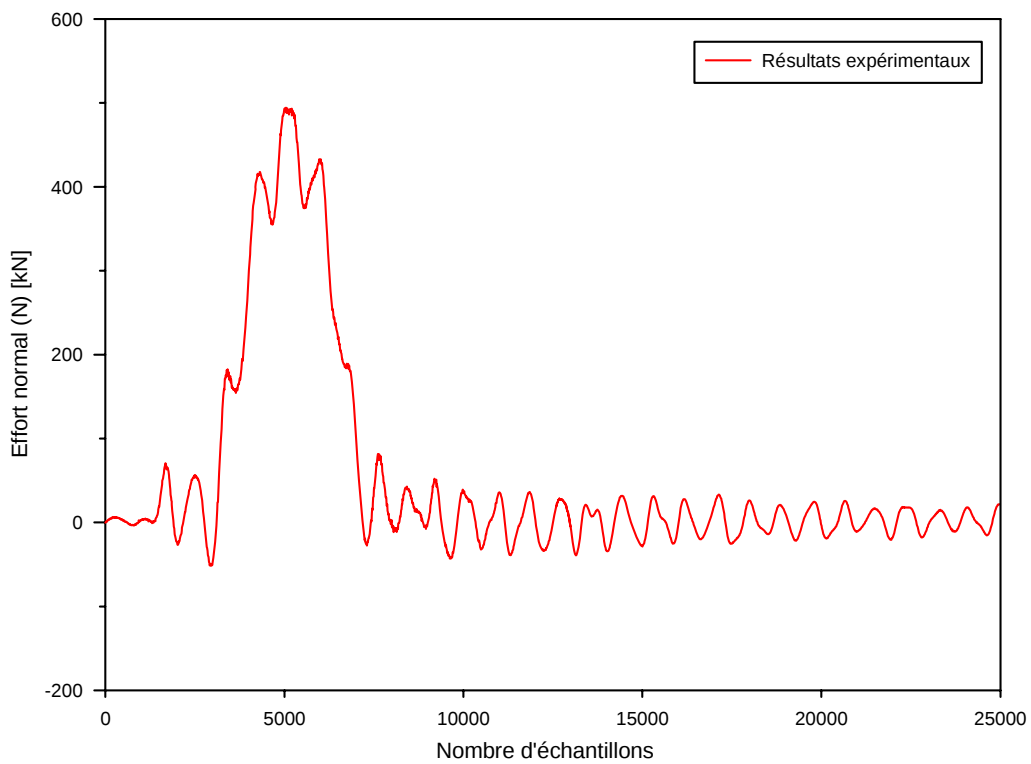


Figure 27 : Essais dynamiques, effort normal (axial) pour deux camions, vitesse de 72 km/h au centre du pont

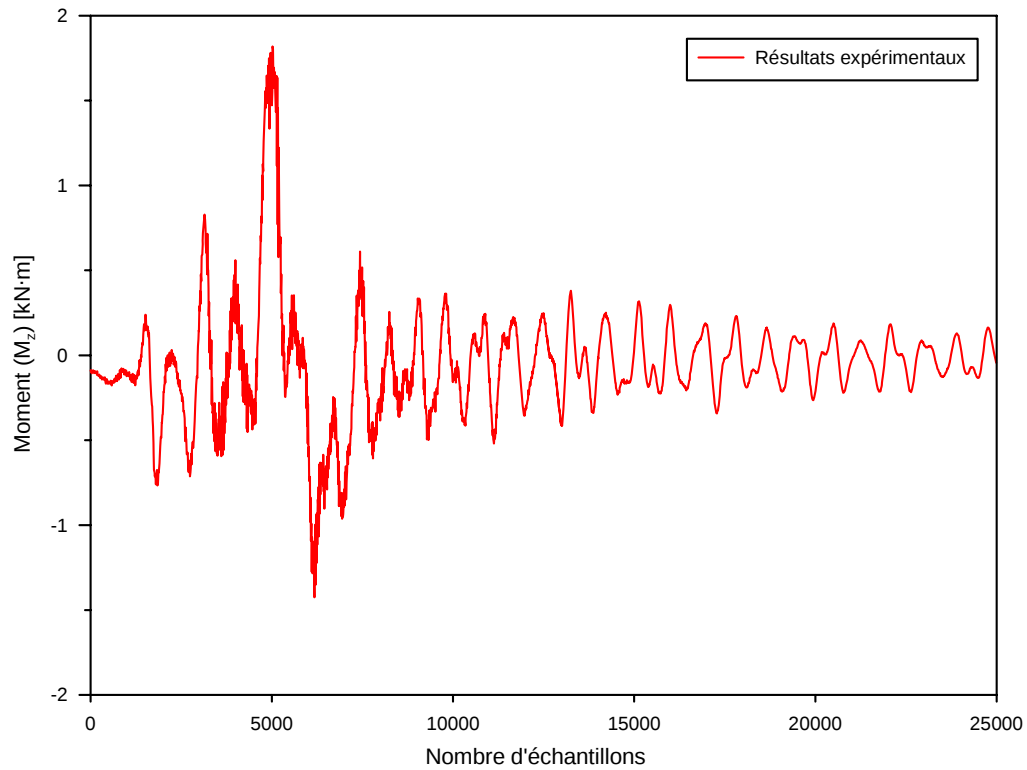


Figure 28 : Essais dynamiques, moment principal pour deux camions, vitesse de 72 km/h au centre du pont

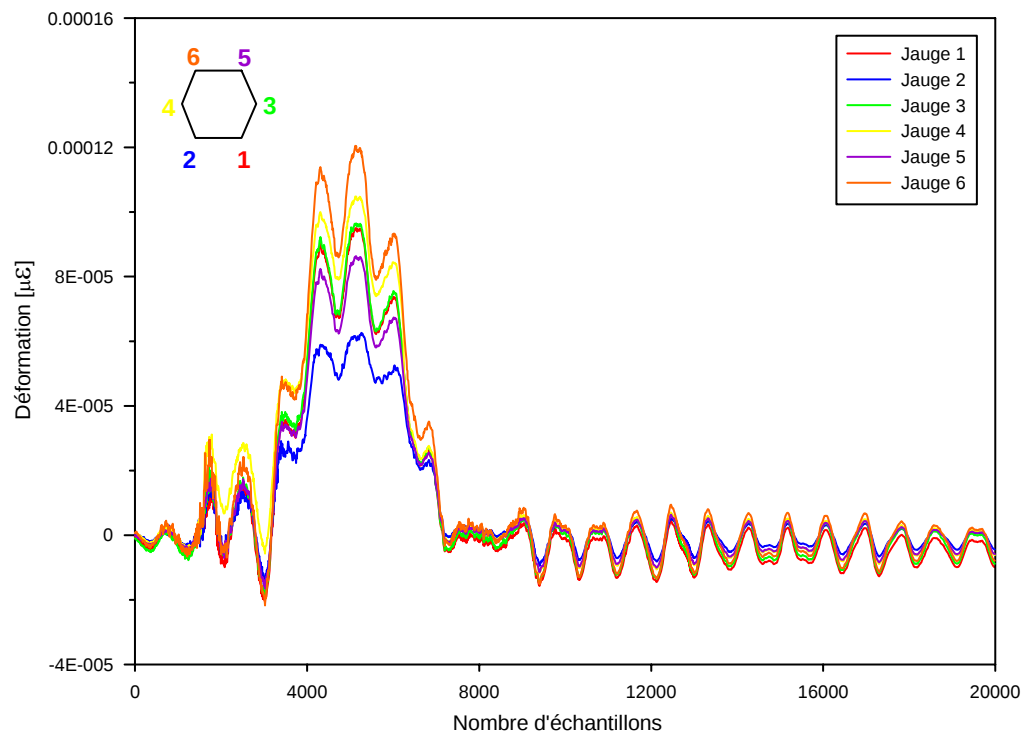


Figure 29 : Essais dynamiques déformations des jauges SOFO pour deux camions, vitesse de 72 km/h à la chambre d'ancrage

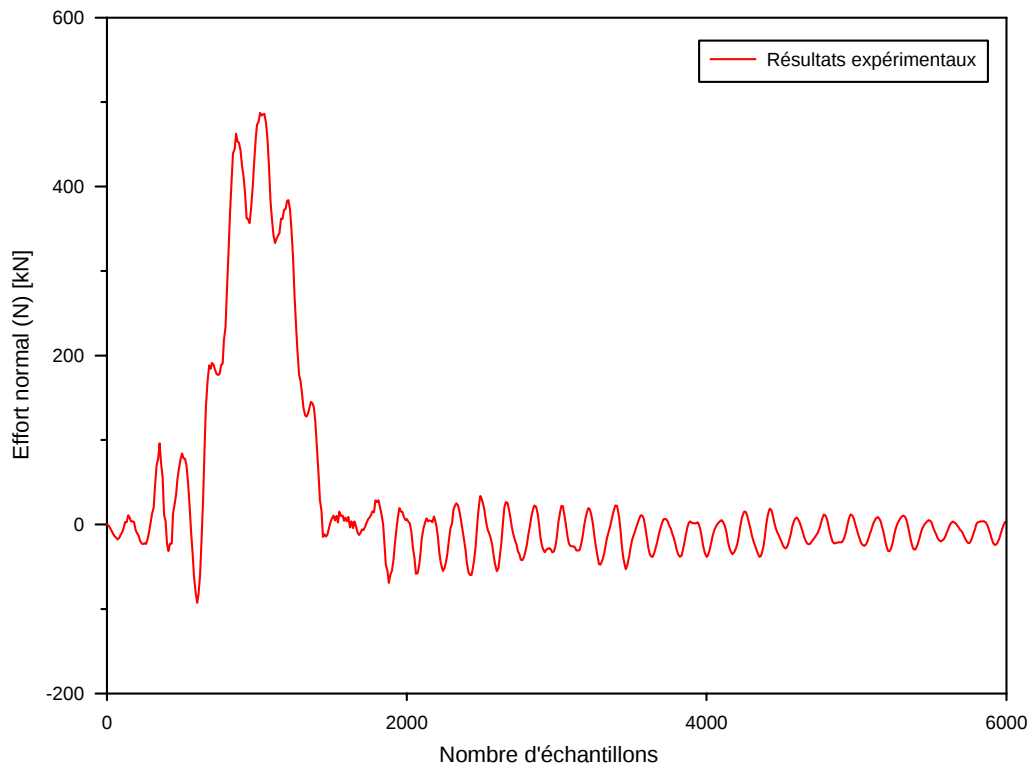


Figure 30 : Essais dynamiques, effort normal (axial) pour deux camions, vitesse de 72 km/h à la chambre d'ancrage

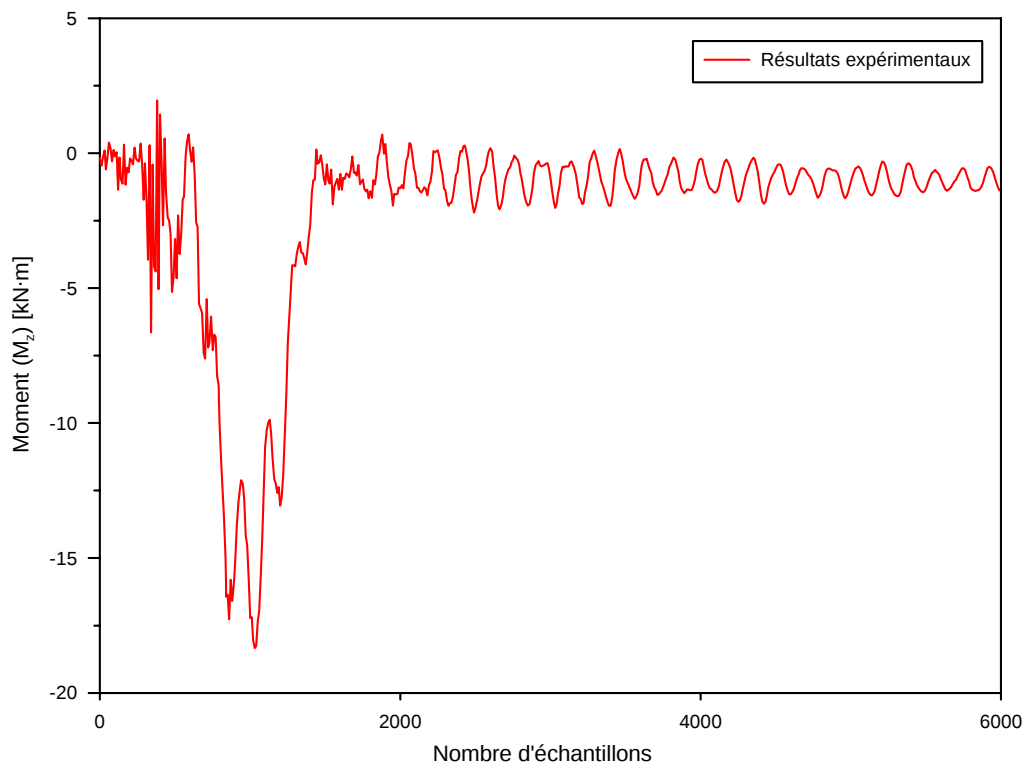


Figure 31 : Essais dynamiques, moment principal pour deux camions, vitesse de 72 km/h à la chambre d'ancrage

5. CONCLUSION

L'ensemble des mesures effectuées lors de l'ouverture du câble porteur du pont de l'Île-d'Orléans a permis d'établir avec succès et avec précision l'état de l'élément structural le plus important de l'ouvrage. Tant le niveau de corrosion que l'épaisseur de galvanisation ainsi que la résistance à la rupture des fils du câble ont pu être établis. De plus, le niveau de sollicitations dues aux charges permanentes et aux charges vives de véhicules a pu être confirmé. Enfin, il a été démontré, par les campagnes de mesures *in situ*, que tous les torons ne sont pas nécessairement sollicités également.

Ces mesures ont démontré que le câble porteur du pont de l'Île-d'Orléans est encore en bon état et qu'il se comporte réellement comme le prédisent les calculs provenant du modèle.

6. REMERCIEMENTS

Le succès de l'ouverture du câble porteur du pont de l'Île-d'Orléans a été possible grâce à la participation et à la collaboration de plusieurs intervenants.

Nous tenons à remercier notamment MM. Jean Vandal, ing., et Gaston Rodrigue, t.t.p.p. de la Direction de la Capitale-Nationale, ainsi que l'entrepreneur Lavage Haute Pression Mobile inc., pour tout ce qui avait trait à l'organisation du chantier.

Nous tenons aussi à remercier MM. Donald Villeneuve, ing., et Gaétan Rousseau, t.t.p.p. de la Direction du laboratoire des chaussées, Service des matériaux d'infrastructures, pour les innombrables mesures *in situ* et en laboratoire qu'ils ont dû effectuer.

Finalement, MM. Stéphane-Éric Thivierge, ing., de Roctest et Daniele Inaudi, Ph. D., de Smartec, pour leur aide avec le système d'acquisition de données à fibre optique.

RÉFÉRENCES

- ANDERSEN, D., and J. A. BARBAS (2004). "The Waldo Hancock Bridge-Inspection, monitoring and strengthenonig of the main cables", 4th International Cable-Supported Bridge Operators' Conference, Copenhagen, Denmark, June 16-19.
- ANGELO, W. J. (1997). "Lasers ensure Stay cable safety" Engineering News-Record, Vol. 239(4), July 28, p. 10-11.
- BANKS, S. R. (1936). "The superstructure of the island of Orleans suspension bridge, Quebec, Canada", Excerpt Journal of The Institution of Civil Engineers, Session 1935-1936, No. 8, October 1936, p. 357-470.
- BERGERON, M. (1982). « Rapport d'inspection du système de suspension du pont de l'Île-d'Orléans ».
- BREVET, P., F. OLIVIÉ, J. P., GUILBAUD, et A. RAHARINAIVO (2004). « Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câbles. Synthèse des travaux du LCPC (1970-2000). I. Plasticité et endommagement », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, mars-avril, p. 35-48.
- BREVET, P., A. RAHARINAIVO, et D. SIEGERT (2004). « Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câbles. Synthèse des travaux du LCPC (1970-2000). II. Ténacité, fissuration sous contrainte et fatigue », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, mai-août, p. 75-92.
- BUCKLAND, P. G. (1981a). "The Lions' Gate Bridge-investigation", Canadian. Journal of Civil Engineering., Vol. 8(2), p. 241-256.
- BUCKLAND, P. G. (1981b). "The Lions' Gate Bridge-renovation", Canadian. Journal of Civil Engineering, Vol. 8(4), p. 484-508.
- BUCKLAND, P. G. (2003). "Increasing the Load Capacity of Suspension bridges", Journal of Bridge Engineering, ASCE, 8(5), p. 288-296.
- CHASE, S. B., and G. WASHER (1997). "Non destructive Evaluation for Bridge Management in the Next Century" Public Roads, July-August, p. 16-25.
- CIOLKO, A. T. (1999). "Cable Vision" Bridge design & engineering, First Quarter, p. 46-47.
- CIOLKO, A. T., and W. P. YEN (1999). "An immediate payoff" Public Roads, May-June, p. 10-17.
- COLFORD, B. R., and C.P.E. COCKSEGE (2006). "Forth Road Bridge-first internal inspection, strength evaluation, acoustic monitoring and dehumidification of the main cables", 5th International Cable-Supported Bridge Operators' Conference, New York, August 28-29.
- CRÉMONA, C. (2003). "Probabilistic approach for cable residual strength assessment", Engineering Structures, 25, p. 377-384.
- CUNHA, A., and E. CAETANO (1999). "Dynamic measurements on stay cables of cable-stayed bridges using an interferometry laser system." Experimental Techniques, May-June, p. 38-43.
- DEL GROSSO, A., A. TORRE, D. INAUDI, G. BRUNETTI, and A. PIETROGRANDE (2005). "Monitoring System for a Cable-Stayed Bridge using static and dynamic Fiber Optic Sensors". 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-2'2005), Shenzhen, China, November 16-18.
- ELACHACHI, S. M., D. BREYSSE, S. YOTTE, et C. CRÉMONA (2005). « Analyse multi-échelle de la résistance du câble porteur d'un pont suspendu. Description de la corrosion et de ses effets par une approche probabiliste », Revue européenne de génie civil, vol. 9, n° 4, p. 455-496.
- FABER, M.H., S. ENGELUND, and R. RACKWITZ (2003). "Aspects of parallel wire cable reliability", Structural Safety, 25, p. 201-225.
- GODART, B., and T. Kretz (2001). "Replacement of the suspension of the Aquitaine Bridge in Bordeaux", ASCE Structure Congress, Washington, May 21.
- GOURMELON, J.-P. (1985). « Méthodologie d'auscultation et de surveillance des câbles de ponts suspendus. » Bulletin de liaison laboratoires des Ponts et Chaussées, 125, sept.-oct., réf. 3017, p. 85-91.
- GOURMELON, J.-P. (1986). « Ponts suspendus et ponts à haubans », Fascicule 34 tiré de « Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. », LCPC-SETRA.
- GOURMELON, J.-P. (1997). « Pathologie des câbles de suspension », Chapitre 12 tiré de « Maintenance et réparation des ponts », Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- KRETZ, T., P. BREVET, C. CREMONA, B. GODART, et P. PAILLUSSEAU (2006). « Haute surveillance et évaluation de l'aptitude au service du pont suspendu d'Aquitaine », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, mars, p. 13-22.

- LAFHAMME, J.-F., et C. MERCIER (2006). « Endommagement par la fatigue des tours d'éclairage : gestion et renforcement », 13^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada.
- LEBOEUF, D., et M. TALBOT (2006). « Description des caractéristiques géotechniques et sismiques du pont de l'Île-d'Orléans », 13^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada.
- MAHMOUD, K. (2006). "Evaluation of the fracture toughness of the Mid-Hudson Bridge cable wire", 5th International Cable-Supported Bridge Operators' Conference, New York, August 28-29.
- MAHMOUD, K. (2006). "Evaluation of the remaining strength of bridge cables", 5th International Cable-Supported Bridge Operators' Conference, New York, August 28-29.
- NCHRP 534 (2004), "Guidelines for Inspection and Strength Evaluation of Suspension Bridge Parallel Wire Cables", TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
- PRIDHAM, B., S. STOYANOFF, P.E. DALLAIRE, M. TALBOT, and A. Brassard (2006). "Toward more realistic predictions of long span bridge flutter", International Conference on Bridge Engineering-Challenges in the 21st Century, Hong Kong, November 1-3.
- PRIDHAM, B., S. STOYANOFF, M. TALBOT, and A. BRASSARD (2006). "Wind tunnel testing and analysis of the Ile-d'Orleans suspension bridge", 7th International Conference on short and Medium Span Bridge, Montreal, Canada.
- RAOOF, M., and I. KRAINCANIC (1993). "Simple derivation of the stiffness matrix for axial-torsional coupling of spiral strands", Computers & Structures, Vol. 55, No. 4, p. 589-600.
- RAOOF, M., and I. KRAINCANIC (1998). "Determination of wire recovery length in steel cables and its practical applications", Computers & Structures, 68, p. 445-459.
- ROBERT, J.-L. (1993). « Mesure de la tension des câbles par vibration. », Méthode d'essai LPC n° 35, Laboratoire central des ponts et chaussées, France.
- ROBERT, J.-L., D. Bruhat, et J.-P. Gervais (1991). « Mesure de la tension des câbles par méthode vibratoire », Bulletin de liaison, Laboratoires Ponts et Chaussées, 173, mai-juin, réf. 3572, p. 109-114.
- ROUSSEAU, G., et D. VILLENEUVE (2007). « Rapports 06-006/06-014 d'analyses des fils du câble porteur du pont de l'Île-d'Orléans », Service des matériaux d'infrastructures, Direction du Laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec.
- RWDI Report 05-1237A, (2006). « Étude aérodynamique du pont de l'Île-d'Orléans, version préliminaire du rapport final », 23 mars.
- STAHL, F. L., and C. P. GAGNON (1996). "Cable corrosion in bridges and structures". ASCE Press, New York.
- STOYANOFF, S., et M. TALBOT (2006). « Description des caractéristiques aérodynamiques du pont de l'Île-d'Orléans », 13^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada.
- TALBOT, M. (2000). « Évaluation des ponts suspendus au Québec : le cas du pont de l'Île-d'Orléans », 7^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada, p. 8-1 à 8-20.
- TALBOT, M. (2001). « Mesure de la tension dans les suspentes et les torons des câbles porteurs du pont de l'Île-d'Orléans par une méthode d'interférométrie laser », 8^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada, p. 17-1 à 17-16.
- TALBOT, M. (2002). « Méthodes expérimentales et numériques utilisées pour l'évaluation du pont suspendu de l'Île-d'Orléans », 4^e Conférence spécialisée en génie des structures de la Société canadienne de génie civil, Montréal, Québec, Canada.
- TALBOT, M. (2003a). « Auscultation des grands ouvrages d'art par une technique du système GPS », 10^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada.
- TALBOT, M. (2003b). « Auscultation des grands ouvrages d'art au Québec : le cas du pont de l'Île-d'Orléans », Innovation transport, bulletin scientifique et technologique, n° 16, avril, Québec, Canada.
- TALBOT, M. (2003c). « Évaluation de l'état structural et propositions de modifications du pont de l'Île-d'Orléans », Ministère des Transports du Québec, Rapport préliminaire.

- TALBOT, M. and S. STOYANOFF (2005). "*Full-scale modal measurements of the I'le d'Orleans suspension bridge*", International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES), Bordeaux, France.
- TALBOT, M., C. HALCHINI, and M. SAVARD (1993). "*Load testing and numerical modeling of Quebec bridges*" Proceedings of the IABSE colloquium on Remaining Structural Capacity, Copenhagen, p. 283-290.