

Description des caractéristiques aérodynamiques du pont de l'Île d'Orléans

Stoyan Stoyanoff, ing., Ph.D.
RWDI Inc, Bromont

Martin Talbot, ing., Ph.D.
Direction des structures, Ministère des transports du Québec

RÉSUMÉ

Les auteurs présentent les principales caractéristiques structurales et dynamiques (modales) du pont actuel ainsi que celles d'un prototype de pont avec un nouveau tablier orthotrope incluant des porte-à-faux. Les résultats relatifs aux effets aérodynamiques (dus au vent) sur cet ouvrage sont introduits. Le pont doit être modifié dans les années qui viennent et les changements proposés sont suffisamment importants pour justifier une analyse aérodynamique détaillée de stabilité pendant et après les travaux de rénovation. Il est à noter, d'ailleurs, qu'aucune étude de ce genre n'a jamais été entreprise à ce jour sur ce pont. La première phase de l'analyse a nécessité une analyse climatique locale et des mesures dynamiques pertinentes sur le terrain. Ces résultats ont servi à l'élaboration des tests en soufflerie sur un modèle 2-D du tablier de dimensions 1:25. Trois configurations ont été testées (l'existante et deux nouvelles configurations). Ces tests ont permis le calcul des principaux paramètres aérodynamiques tels les dérivées et les coefficients de forces statiques. À partir de ces valeurs obtenues en laboratoire, une analyse numérique a été effectuée pour prédire le comportement de l'ouvrage complet via une modélisation 3-D des effets de flottement (flutter) et de balotement (buffeting). Ces résultats permettront la sélection de la meilleure configuration de tablier et de la faisabilité de tels travaux.

1. INTRODUCTION

Le pont de l'Île d'Orléans est un pont suspendu en acier qui enjambe le fleuve St-Laurent entre la ville de Québec (à Beauport) et l'Île d'Orléans. Le pont a été mis en service le 6 juillet 1935, et a une travée principale de 323 m avec deux travées d'approches symétriques de 127 m. Le tablier en acier et en béton est relié à des entretoises à un intervalle régulier de 4.87 m. Les fermes triangulées ont 3.96 m de hauteur. Elles sont espacées de 9.65 m. Les deux tours, chacune d'une hauteur de 66.44 m, ont été fabriquées à l'aide de poutres croisées pour améliorer la rigidité latérale. La figure 1 montre une photo du pont.

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 les différents aspects de son état structural et de son comportement (Talbot, 2000, 2001, 2002, 2003a, 2003b, 2003c, et Talbot et Stoyanoff, 2005).

Contrairement au Lions' Gate (Buckland, 1981a, 1981b, 2003) ce pont n'a cependant jamais fait l'objet d'études aérodynamiques. Cet article résume donc de manière très générale quelques résultats extraits du rapport de RWDI (2006) intitulé « Étude aérodynamique du pont de l'Île d'Orléans ». Ce rapport final de RWDI (Rowan Williams Davies & Irwin Inc.) porte sur le pont dans sa configuration existante (E) ainsi que dans 2 configurations modifiées (C1) et (C2) telles que décrites à la figure 7.

2. ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

2.1 ÉTUDE DU CLIMAT ET DES VENTS LOCAUX

Cette phase de l'étude incluait une analyse du climat et des vents pour déterminer les vitesses de vent à utiliser pour la conception et du fait même, pour la stabilité aérodynamique et l'analyse de la structure. Une analyse des propriétés de turbulence du site a aussi été complétée.

Les données historiques sur le régime des vents, utilisées dans l'analyse climatique, proviennent de trois stations météorologiques situées à i) Aéroport International Jean Lesage (Ville de Québec), ii) Beauport et iii) Île d'Orléans, à environ 21 km et 7 km respectivement au sud-ouest, et à 28 km au nord-est du pont. La station de la Ville de Québec disposait de 47 ans de données enregistrées (1953 à 1999), la station de Beauport avait 7 ans (1999-2005) et finalement la station de l'Île d'Orléans en avait 12 (1994 à 2005). Les données provenant des stations de Beauport et Île d'Orléans, pour lesquelles le nombre d'année n'a pas été considéré comme suffisant pour les besoins de l'analyse statistique, n'ont été qu'utilisées pour valider l'information provenant de la l'Aéroport de la Ville de Québec. Comme les trois sites démontraient des vitesses et des directions de vent similaires, les données de la Ville de Québec étaient les plus appropriées pour l'analyse du site du pont.

Les vitesses du vent de calcul fournies par l'analyse climatologique et topographique du pont de l'Île d'Orléans son résumées au tableau 1. Des vitesses moyennes horaires sont recommandées pour la conception du pont et des vitesses moyennes sur 10 minutes le sont pour les évaluations de stabilité lors des travaux de rénovations et également en service. Les données historiques du vent fournies par l'Aéroport International Jean Lesage (Ville de Québec) ont été utilisées, ainsi que des informations figurant dans NBCC95 et portant sur les vitesses à utiliser lors de la conception. Le site du pont est affecté à la fois par les eaux libres du fleuve Saint-Laurent et par le relief accidenté de la région de Beauport. L'effet causé par ces eaux libres et ce relief a été inclus d'une manière approximative pour obtenir les valeurs recommandées au tableau 1.

2.2 MESURES IN SITU ET RELEVÉES

À la demande du ministère des Transports du Québec, (MTQ) des mesures ont été relevées à l'échelle réelle sur le pont de l'Île d'Orléans (Figure 1). Cette étude avait pour but d'identifier les plus basses fréquences de vibration en torsion de ce pont, en régime d'excitation forcée (Stoyanoff et Ferguson, 2004). Comme il est envisagé de remplacer le tablier de l'ouvrage, ces données sont importantes pour l'évaluation de sa stabilité et des charges dues au vent.

À la suite des essais portant sur les conditions ambiantes, au cours de l'après-midi du 14 octobre 2004 les auteurs ont eu recours à une méthode d'excitation forcée pour déterminer les fréquences en torsion les plus basses. Cette méthode reposait sur des essais semblables effectués sur le pont de Lions' Gate, le pont Mid-Hudson dans l'État de New York et le pont de Tacoma Narrows. Pendant l'essai par vibration forcée, le pont est resté fermé à la circulation. Un dispositif pendulaire comprenant une masse de 1000 kg suspendue au-dessus du milieu du tablier au moyen d'une grue (Figure 2) a servi à induire des mouvements dans le pont. En ajustant la longueur du câble de suspension, la fréquence naturelle latérale et en torsion du pendule pouvait varier entre 0,15 Hz et 0,40 Hz.

Le pendule était placé à une distance égale au tiers de la longueur de la travée principale, en partant de la tour nord. Cette position a permis d'exciter les modes de torsion symétriques et asymétriques. Au moyen de câbles, le pendule était mis en mouvement en travers du tablier pour décrire un arc d'environ 30 degrés créant une force d'oscillation atteignant environ 4000 N, appliquée au sommet de la flèche de la grue, variant d'environ 3 m à 7,60 m au-dessus de la surface de roulement. Lorsque la fréquence de l'excitation et la fréquence propre du pont devenaient synchrones, il se produisait d'importants mouvements qui étaient enregistrés.

Tel que présenté par Talbot et Stoyanoff, (2005), ces valeurs ont permis de calibrer adéquatement un modèle éléments finis 3-D de l'ouvrage existant (configuration (E)). Deux modes particulièrement importants pour l'étude aérodynamique ont été identifiés soit un mode vertical à 0,343 Hz (figure 3) et un de torsion à 0,405 Hz (figure 4).

D'après le tracé de réponse obtenu par la technique du pendule, on a pu déduire un rapport d'amortissement très clair de = 1,8 % (impossible à obtenir aussi clairement sous trafic ambiant). La vitesse locale du vent pendant cet essai était d'environ 4 - 5 m/s, ce qu'on estime n'avoir pas eu d'influence notable sur les mesures d'amortissement. Enfin, de nombreux autres modes provenant du calcul par éléments finis ont aussi été inclus dans les calculs aérodynamiques (modèle de stabilité appliqué à l'analyse de flottement en 3-D).

3. ESSAIS SUR MODÈLE RÉDUIT DU TABLIER DU PONT

3.1 OBJECTIFS ET CRITÈRES

Les objectifs des tests portant sur le modèle réduit étaient d'examiner la stabilité aérodynamique (c'est-à-dire le potentiel d'apparition des vibrations éoliennes, du flottement et du galop) du tablier de pont existant et proposé, et de déterminer les coefficients de force et de moment statiques équivalents. Des essais additionnels ont également été exécutés dans le but de d'estimer les dérivées aérodynamiques utilisées pour l'analyse du flottement.

3.2 DESCRIPTION DU MODÈLE RÉDUIT DU TABLIER

Un modèle de la section du pont a été construit à une échelle de 1:25 (figures 10 et 11), représentant ainsi 60.3 m en longueur d'une partie du pont réel. Comme les entretoises ne seront pas remplacées lors des travaux de rénovation, la configuration existante (E) peut être modifiée en remplaçant seulement le tablier du pont et ses accessoires (glissières, etc.), et en installant les nouvelles traverses piétonnières pour ainsi obtenir les configurations proposées (C1 et C2; voir la figure 7 pour les plans de détails des différentes configurations existante et proposées).

Les modèles réduits ont été construits en utilisant plusieurs matériaux tel le bois, le plastique et le métal, et ont été conçus pour simuler les propriétés de masse du tablier à échelle réelle. La conception du modèle s'est appuyée sur la géométrie et la masse linéaire moyenne, ainsi que sur les propriétés dynamiques du pont (fréquences naturelles et modes de vibration) fournies par le MTQ.

Les modèles réduits du tablier ont été fixés à un système de suspension comprenant des ressorts. Ce dernier système a été directement installé à l'intérieur des murs verticaux de la soufflerie; les ressorts sont quant à eux situés à l'extérieur des murs. Le système de suspension permet deux degrés de liberté et alloue ainsi les déplacements verticaux et les rotations en torsion lors des essais expérimentaux; des systèmes lasers sont utilisés pour mesurer ces déplacements. Les forces appliquées sur le modèle testé sont mesurées à l'aide de jauges de déformation fixées au centre de rotation du modèle ainsi que sur les supports d'attache des ressorts (figures 5 et 6).

Une sélection appropriée des ressorts comprenant les justes valeurs de rigidité et d'espacement permet l'ajustement précis des fréquences verticales et en torsion pour l'expérimentation. Les fréquences du pont existant ont été mesurées lors d'une séance spécifique à cet effet sur le pont réel tel que décrit à la section 2.2. La fréquence du premier mode vertical asymétrique (0.343 Hz), et celle du premier mode couplé latéral-torsion asymétrique (0.405 Hz) ont été sélectionnées comme étant des valeurs cibles à reproduire en soufflerie pour la configuration E. Ces modes ont été choisis étant donné leur potentiel à se coupler en réponse à une excitation éolienne, et ainsi produire un flottement couplé vertical et en torsion. Un modèle d'éléments finis a été développé par le MTQ et corrélé avec les mesures du terrain pour assurer une comparaison entre les valeurs expérimentales et théoriques. Cette modélisation a donc été utilisée pour prédire les propriétés dynamiques de la configuration proposée C2 (modèle d'éléments finis, figure 8). Pour cette configuration, les fréquences estimées du pont à échelle réelle sont de 0.315 Hz pour le mode vertical, et 0.511 Hz pour le mode latéral-torsion.

Il est important de mentionner que même si le modèle réduit du tablier a été initialement conçu pour une paire de modes prédéterminée, les résultats expérimentaux peuvent être également utilisés pour les autres modes en ajustant le facteur de vitesse.

L'amortissement a été ajouté au système grâce à des mécanismes d'absorption d'énergie situés à l'extérieur de la soufflerie. Ces mécanismes permettaient l'ajustement tel que désiré de l'amortissement structural pour les mouvements verticaux et en torsion. À partir des résultats provenant des tests sur le pont à échelle réelle, les amortissements modaux verticaux et en torsion pour le pont existant (E) sont de 1% et 1.8% respectivement.

Comme il est impossible d'estimer l'amortissement des configurations de rénovation, les niveaux d'amortissement ont été fixés à une valeur raisonnable de 1% pour les tests expérimentaux des configurations C1 et C2, valeur qui est généralement prévue pour la plupart des ponts suspendus en acier.

3.3 DESCRIPTION DES PROCÉDURES À UTILISER EN SOUFFLERIE

3.3.1 Essais de stabilité

Les essais de stabilité ont été réalisés avec 0 degré et ± 2.5 degrés d'angle d'attaque. L'angle d'attaque α est défini comme étant l'inclinaison du vent par rapport au plan horizontal du tablier tel que montré à la figure 6. Pour chaque essai, la vitesse de l'écoulement était graduellement augmentée suivant de petites incréments et les mouvements verticaux et en torsion ont été enregistrés. La vitesse du vent a été augmentée jusqu'au moment où le modèle présentait une

instabilité en flottement, ou encore jusqu'à ce que la vitesse maximale de la soufflerie ait été atteinte. La vitesse maximale atteinte lors des essais était équivalente à une vitesse à échelle réelle de plus de 50 m/s.

Les essais expérimentaux ont été complétés avec un écoulement laminaire pour tous les angles d'attaque. L'objectif d'utiliser un écoulement laminaire était de faciliter et de permettre l'identification d'instabilités telles que les vibrations éoliennes et le flottement. Les résultats obtenus à partir d'essais en écoulement laminaire peuvent être considérés comme étant conservateurs. D'un autre côté, les essais réalisés en écoulement turbulent donnent une indication plus réaliste de la réponse du pont soumis à de forts vents, étant donné que les vents tendent à être turbulents.

3.3.2 Détermination des coefficients de force et de moment statiques

Le même système comprenant des ressorts beaucoup plus rigides a été utilisé pour éliminer les mouvements du modèle et pour mesurer les coefficients de force et de moment statiques du tablier de pont. Les coefficients ont été mesurés pour des angles d'attaque allant de -10 degrés à 10 degrés par incrément de 2 degrés.

3.3.3 Essai pour les dérivées aérodynamiques (flottement)

L'estimation des dérivées aérodynamiques (souvent appelé dérivées du flottement) nécessite que la réponse impulsionnelle pour chacun des modèles réduits soit mesurée à un angle d'attaque de 0 degré pour plusieurs vitesses de vent. Une deuxième série d'essais a été réalisée où les modèles ont été excités grâce à un système mécanique de poulies qui pouvait appliquer directement une impulsion pour chacun des degrés de liberté (vertical et torsion). Les multiples signaux de décroissance ont été mesurés après avoir excité les modèles avec cette méthode pour chacune des vitesses de vent. Également, une autre série de décroissance a été obtenue pour chacune des configurations en utilisant une vitesse de vent nulle afin d'estimer les propriétés mécaniques de chaque modèle (c'est à dire qu'il n'y a pas d'effets aérodynamiques avec un vent nul). De dix à vingt vitesses de vent différentes ont été utilisées pour ces essais. Ceci a donc permis l'identification des dérivées de flottement.

3.4 RÉSULTATS DES ESSAIS EN SOUFFLERIE : STABILITÉ AÉRODYNAMIQUE

Les réponses verticales et en torsion en ce qui a trait aux essais des modèles réduits en stabilité aérodynamique ont pu être obtenues. La figure 16 montre un graphique résumant les résultats des essais pour un angle d'attaque nul et pour les configurations E, C1 et C2. Les régions où le niveau de réponse est considéré comme étant acceptable et respectant la stabilité en flottement sont ombrées en vert, tandis que les régions inacceptables sont ombrées en rouge (à noter que la région limitée par 37.0 m/s et 46.0 m/s, située au-dessus de 1.5 degrés est acceptable pour les angles d'attaque compris entre -2.5 et 2.5 degrés). La région comportant une réponse inacceptable qui est reliée aux vibrations éoliennes est aussi soulignée en rouge au-dessus de chacune de ces figures. À souligner que pour des vents supérieurs à 20.0 m/s, le critère de confort relié aux vibrations éoliennes devient beaucoup moins important étant donné que les piétons et les véhicules sont plus aptes à être affectés par le ballonnement du vent.

4. ANALYSE DE FLOTTEMENT EN 3-D

4.1 INTRODUCTION

Lors d'études de stabilité complexes portant sur les différentes phases de pont, une procédure pour réaliser l'analyse de flottement en 3-D a été utilisée et a permis la détermination de la vitesse d'apparition de ce phénomène pour les modes de vibration sélectionnés. Ces analyses utilisent les propriétés dynamiques fournies par le MTQ (fréquences et descriptions des modes retenus pour les analyses). Les résultats sont ainsi obtenus à partir de l'analyse de flottement en 3-D pour ce qui est des vitesses de vent critiques prédites pour le pont à échelle réelle.

4.2 MODÈLE NUMÉRIQUE DU PONT

Le modèle de stabilité appliqué (différent du modèle par éléments finis 3-D très détaillés) quant à l'analyse de flottement en 3-D est basé sur un total de 59 segments le long du support principal avec une longueur typique de 9.76 m. Les deux câbles principaux sont modélisés avec 61 segments chacun, et les tours avec 18 segments chacune. L'assemblage du pont complet résulte en 213 (=59+2x61+2x18) segments. Toutes les propriétés structurales et aérodynamiques sont considérées comme étant ponctuelles pour chacun des nœuds de chaque segment. Chaque nœud contient six degrés de liberté structurales et des chargements aérodynamiques, trois degrés de liberté (représentant les forces latérales, verticales et les moments de torsion) sont appliqués sur le support principal du pont, les câbles et les tours. L'effet de l'édification de l'équipement n'a pas été retenu. L'amortissement aérodynamique latéral a été inclus en utilisant les formulations quasi-statiques. Des dérivées aérodynamiques ont été attribuées pour chacun des segments en fonction de l'étape de rénovation pour l'ancienne et la nouvelle section du tablier. Chaque groupe de dérivées aérodynamiques a été lissé pour assurer la continuité des itérations lors des analyses de stabilité.

Des résultats de l'analyse de stabilité ont été développés par RWDI rapport (2006) pour le pont existant (configuration E), et pour le pont rénové (configuration C2), et pour les deux étapes de rénovation (E315mC2 montré à la figure 9 et E223mC2). Le résumé d'analyses de stabilité en flottement 3-D est donné à la figure 17.

CONCLUSION

Cet article a présenté quelques extraits sélectionnés provenant de l'étude aérodynamique détaillée de RWDI rapport (2006). En résumé, leurs conclusions sont les suivantes :

Configuration E (figure 12):

- Le flottement a été observé pour les trois angles d'attaque (0, ± 2.5 degrés).
- La vitesse de flottement observée pour un angle d'attaque nul était de 34.6 m/s. Pour +2.5 degrés et -2.5 degrés, les vitesses critiques étaient de 28 m/s et 46.6 m/s respectivement.
- Le critère de flottement a été excédé pour 0 et +2.5 degrés, mais pas pour le cas de -2.5 degrés d'angle d'attaque.
- Le phénomène des vibrations éoliennes n'a pas été observé pour cette section.

Configuration C1 (figures 13 et 14):

- Le flottement a été observé pour les trois angles d'attaque ($0, \pm 2.5$ degrés).
- La vitesse critique de flottement observée à un angle d'attaque nul était de 22.2 m/s. Pour +2.5 degrés et -2.5 degrés, les vitesses critiques étaient de 32.5 m/s et 43.5 m/s respectivement.
- Le critère de flottement a été excédé pour 0 et +2.5 degrés, mais pas pour le cas de -2.5 degrés d'angle d'attaque.
- Un niveau inacceptable de vibrations éoliennes a été observé pour les vitesses comprises entre 5 et 10 m/s, et pour un angle d'attaque nul. Ces oscillations excèdent le critère de confort recommandé de 5% de la gravité pour cette plage de vitesse.
- Des vibrations éoliennes ont également été observées pour un angle d'attaque de -2.5 degrés et à l'intérieur de la plage de vitesse de 5 à 10 m/s. Cependant, ces vibrations étaient inférieures au critère de confort.

Dans un effort de stabilisation de la section, un amortissement supplémentaire a été ajouté en torsion, et le modèle a été re-testé à un angle d'attaque égal à 0 degré. L'ajout d'amortissement a réduit la réponse des vibrations éoliennes mais cependant, le critère de flottement était tout de même excédé. La vitesse critique d'apparition du flottement pour ces conditions était de 37 m/s. Des déplacements en torsion dont l'amplitude augmentait graduellement ont été observés à partir de 20 m/s, ce qui est une indication que cette configuration de section présenterait des réponses élevées même avant de passer en flottement.

Configuration C2 (figure 15):

- Le flottement a été observé pour un angle d'attaque de 0 et -2.5 degrés. Jusqu'à la vitesse maximum de vent de la soufflerie (54 m/s), aucun flottement n'a été observé pour un angle de +2.5.
- La vitesse critique de flottement à un angle de 0 degré était de 51.2 m/s. Pour ce qui d'un angle d'attaque de -2.5 degrés, cette valeur était de 45 m/s. Dans les deux cas, le critère de flottement n'a pas été excédé.
- Des vibrations éoliennes d'une amplitude acceptable ont été observées dans un écoulement laminaire d'une vitesse de vent de 8 m/s. Cependant, ces vibrations se sont atténuées lorsqu'une intensité de turbulence de 6% a été ajoutée. Comme ce niveau de turbulence est considéré comme étant réaliste pour le site du pont, les vibrations éoliennes ne devraient pas causer de problème pour cette section.
- Les vibrations éoliennes ont également été observées pour un angle d'attaque égal à -2.5 degrés; cependant, le niveau des vibrations était inférieur au critère de confort.

La vitesse de vent critique pour ce qui est de la configuration E, qui a été trouvée comme étant inférieure au critère de flottement, exige des explications supplémentaires étant donné que le pont n'a jamais expérimenté des problèmes reliés au vent dans ses 70 années d'existence. Pour palier à ceci, l'explication suivante est apportée :

- Sans l'utilisation de la correction proposée par NBCC95 quant à la vitesse à récurrence décennale, le critère de flottement pourrait être réduit à une valeur aussi faible que 40 m/s. En accord avec les pratiques actuelles de l'ingénierie adoptées en Amérique du Nord, cette correction a été implémentée pour tenir compte des imperfections possibles du terrain et de la station locale d'acquisition. **La mesure de la vitesse des vents locaux à l'aide d'une station météorologique placée directement sur le pont permettrait des prédictions plus précises et justifierait la nécessité du facteur de correction proposé par le code.**
- Les essais des modèles réduits fournissent des résultats conservateurs pour les modes de vibration sélectionnés étant donné que ces derniers n'incluent pas les forces de stabilisations aérodynamiques dues au couplage avec les modes latéraux qui augmentent l'amortissement; l'amortissement est également plus élevé avec la masse ajoutée effective provenant des mouvements des câbles et des tours. La vitesse actuelle critique pour une combinaison modale donnée pourrait s'être avérée plus élevée que ce que les essais des modèles ont révélé. De meilleures estimations du phénomène de flottement pourraient être obtenues grâce à un des essais sur un modèle aéro-élastique complet ou, comme indiqué dans la présente étude, procéder à une analyse de flottement 3-D basée sur les dérivées aérodynamiques extraites des essais du modèle réduit de la section. Le flottement concernant les autres combinaisons modales serait également vérifié.

Comme nous l'avons déjà évoqué à la section 3.4, la figure 16 présente la réponse en torsion pour les trois configurations à un angle d'attaque de 0 degré. Il est évident que d'après cette figure la configuration C2 est potentiellement plus favorable d'un point de vue aérodynamique en comparaison avec la configuration C1. Cependant, il devrait être noté qu'en raison de la complexité qui entoure le couplage des divers modes du pont, les résultats ne pouvaient être utilisés pour prédire la stabilité finale du pont à échelle réelle. Pour ce faire, la stabilité à pleine échelle telle que décrite à la section 4 (analyse de flottement en 3-D) a été utilisée avec succès.

RÉFÉRENCES

- 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, 357-470.
- Buckland, P. G. (1981a). "The Lions' Gate Bridge-investigation." Can. J. Civ. Eng., Vol. 8(2), 241-256.
- Buckland, P. G. (1981b). "The Lions' Gate Bridge-renovation." Can. J. Civ. Eng., Vol. 8(4), 484-508.
- Buckland, P. G. (2003). « Increasing the Load Capacity of Suspension bridges.» Journal of Bridge Engineering, ASCE, 8(5), 288-296.
- Stoyanoff, S., Irwin, P., Xie, J. and Hunter, M. (2004). Wind Tunnel Testing of the Parallel Tacoma Bridges, in proc. International Symposium Steelbridge 2004, Millau, France, June 23-25, 2004.
- Stoyanoff, S., Ferguson, G. B. (2004). Pont de Île d'Orléans, Québec: Full Scale Measurements Report
- RWDI Report 05-1237A, (2006). Étude aérodynamique du pont de l'île d'Orléans, version préliminaire du rapport final, 23 Mars .

Talbot, M. (2000). « Évaluation des ponts suspendus au Québec : le cas du pont de l'Île d'Orléans .» 7e colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada, 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.» 8e colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, Canada, 17-1 à 17-16.

Talbot, M. (2002). « Méthodes expérimentales et numériques utilisées pour l'évaluation du pont suspendu de l'Île d'Orléans. » 4e 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.» 10e 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, no. 16, avril, Québec, Canada.

Talbot, M. (2003c). Évaluation de l'état structural et propositions de modifications du pont de l'île d'Orléans. MTQ. Rapport préliminaire.

Talbot, M. and Stoyanoff, S. (2005). "Full-scale modal measurements of the I'ile d'Orleans suspension bridge", International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES), Bordeaux, France.

Période de récurrence (années)	Application	Vitesse de vent (m/s) (moyenne sur 1 heure sans les effets de directivité)	Vitesse de vent (m/s) (moyenne sur 10 minutes avec les effets de directivité)
20	Conception de structure pour les étapes de rénovation	32.8	–
100	Conception de structure pour le pont complété	36.0	–
1000	Vitesses de flottement pour les étapes de rénovation	–	41.0
10000	Vitesses de flottement pour le pont complété	–	45.7

Tableau 1. vitesses du vent de calcul fournies par l'analyse climatologique et topographique.



Figure 1: Vue générale du pont et installation de l'appareillage pour les tests in situ (octobre 2004).



Figure 2: Le pendule de mise en vibrations forcées – masse mobile de 1000 kg.

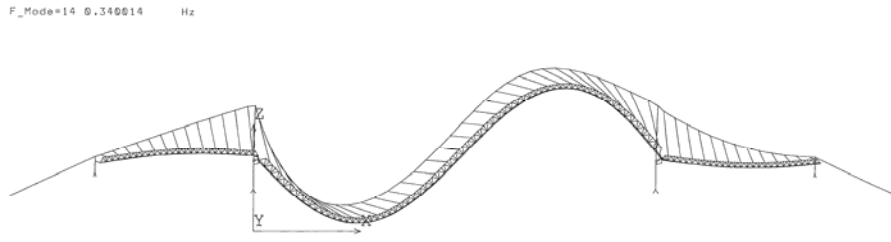


Figure 3: 2^e mode vertical (de flexion) Vertical 2: 0,343 Hz

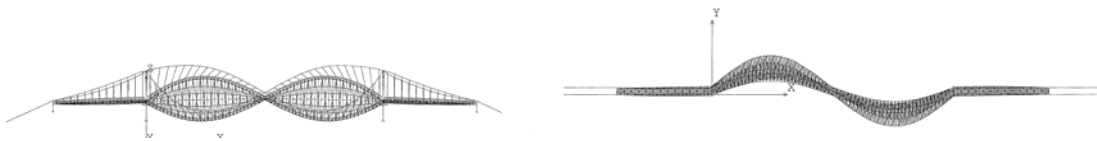


Figure 4: Premier mode torsionnel /latéral, 0,405 Hz

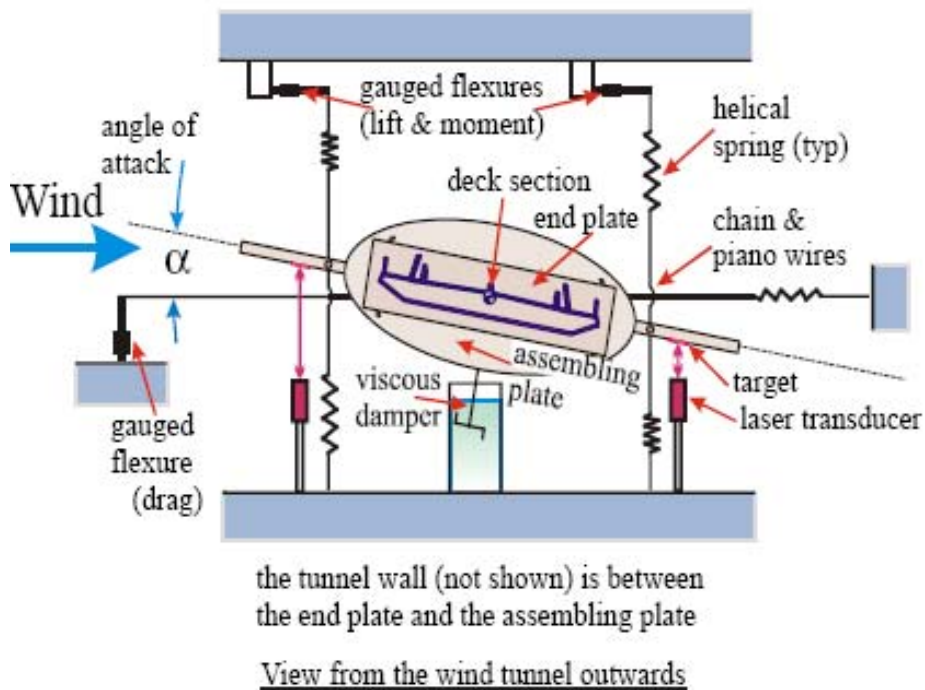


Figure 5. Schéma du modèle 2-D (pas à l'échelle).

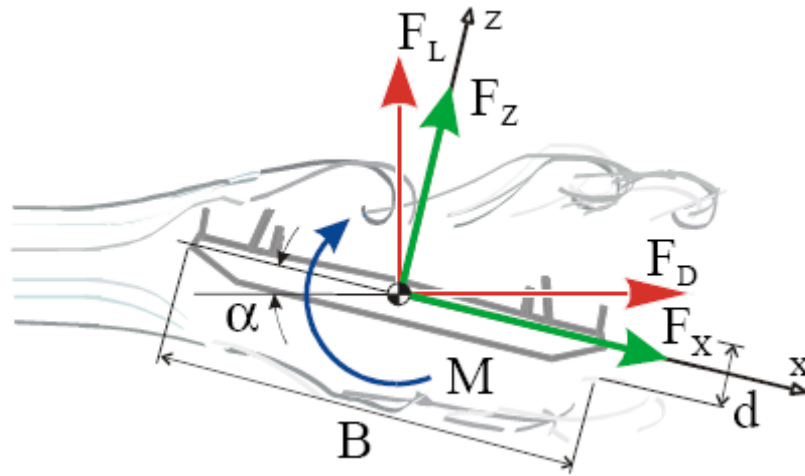


Figure 6. Définition des efforts sur le tablier du pont.

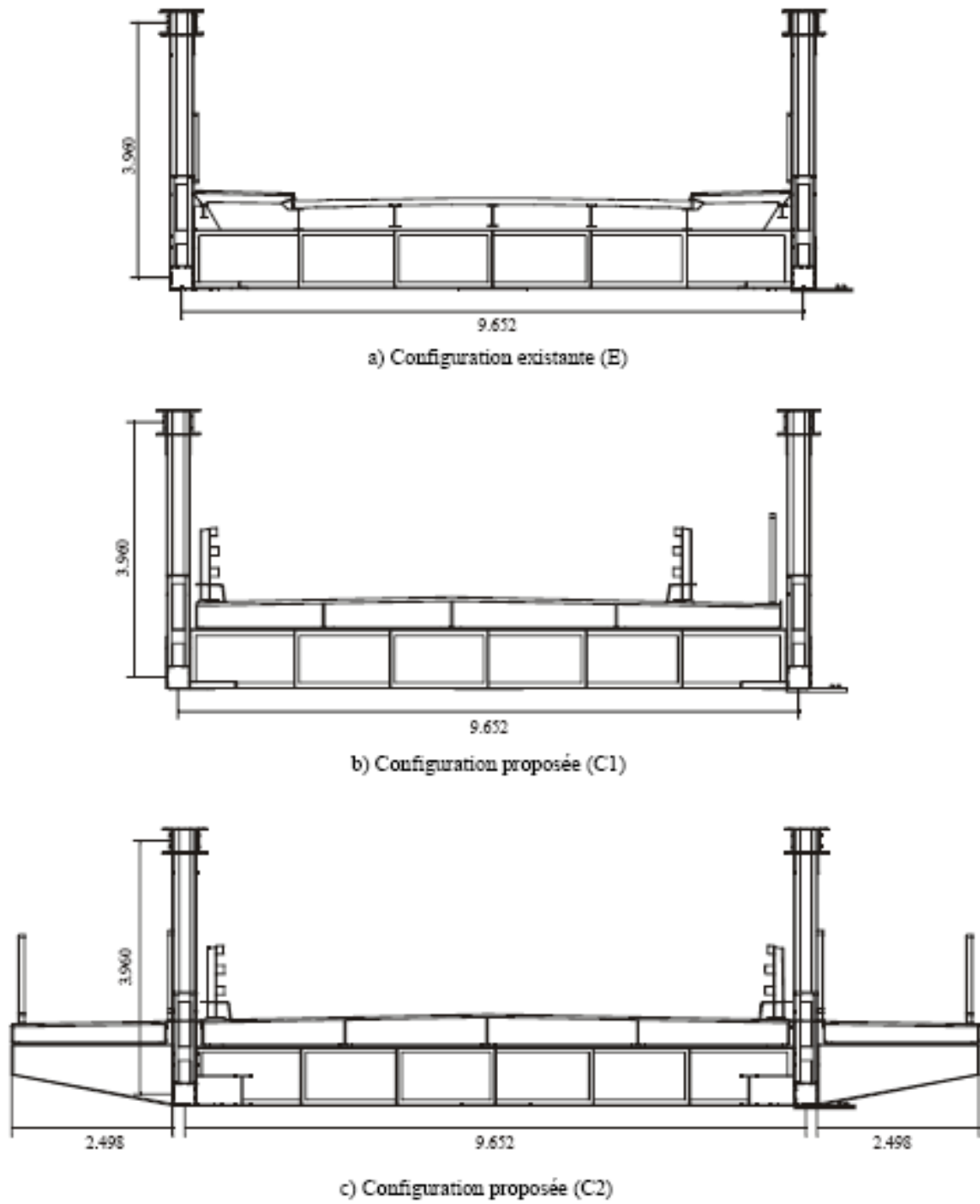


Figure 7. Les configurations existantes et proposées du tablier Note: dimensions en mètres.

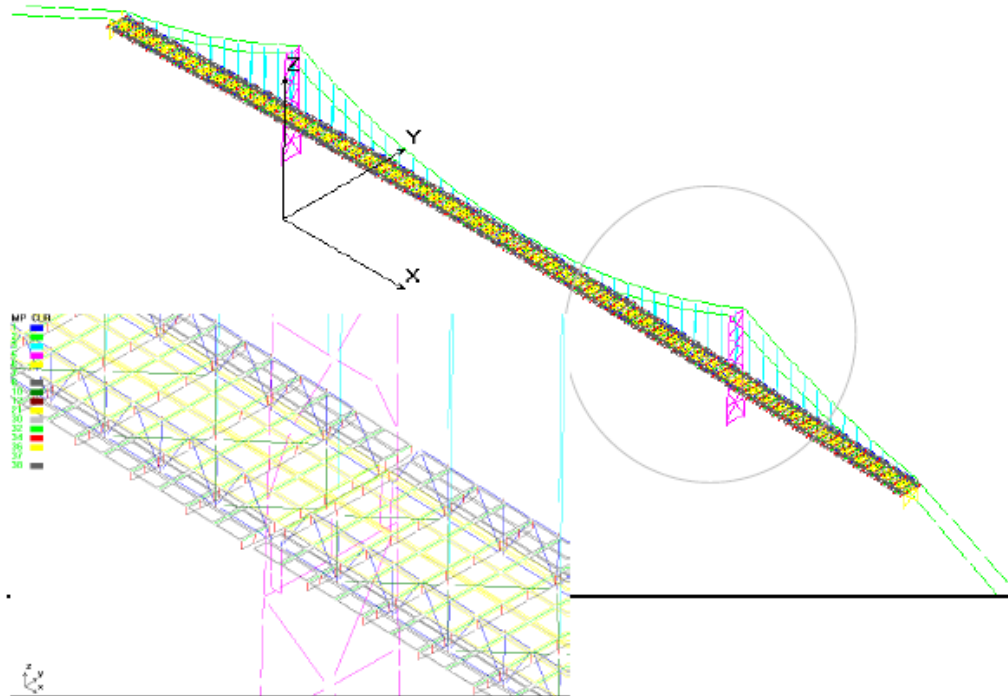


Figure 8. Modèle éléments finis du MTQ du pont rénové: configuration C2 (39,638 inconnues).

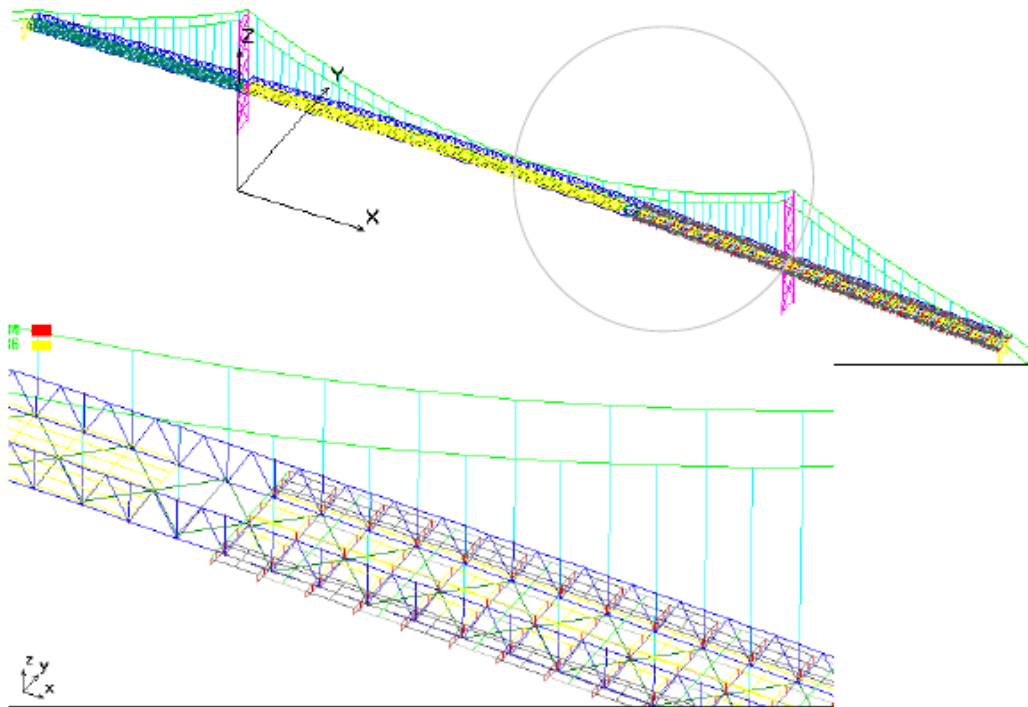


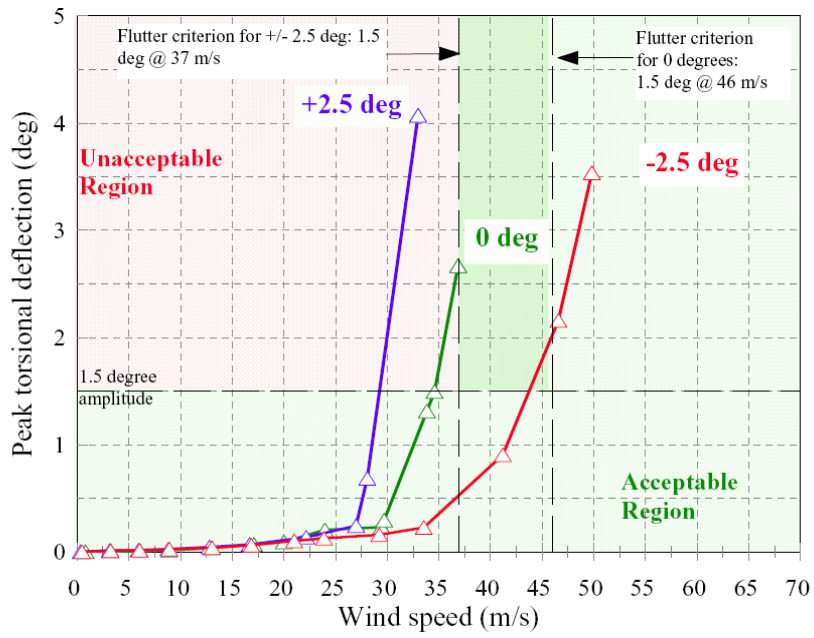
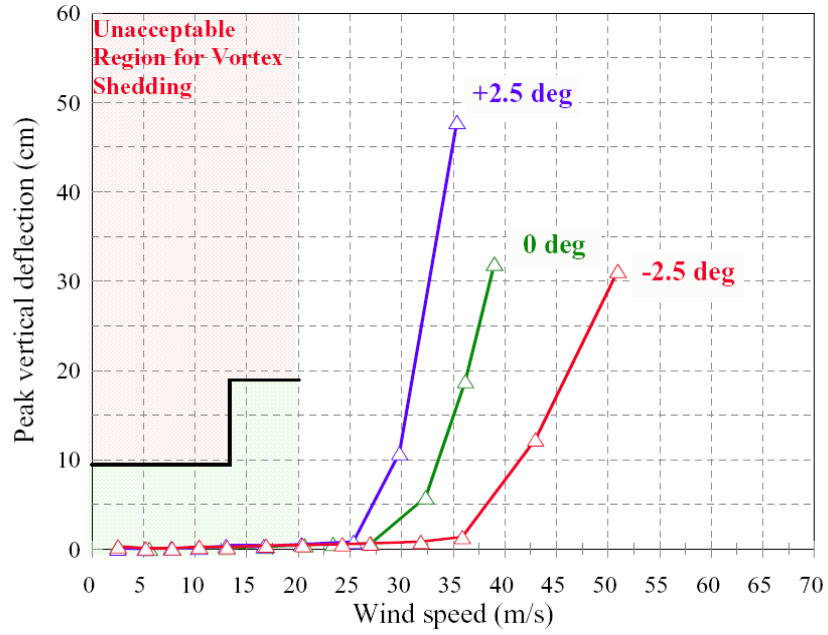
Figure 9. Modèle éléments finis du MTQ du pont pendant la rénovation: phase E 315m C2.



Figure 10. Photos de la configuration E - modèle à échelle réduite 1:25

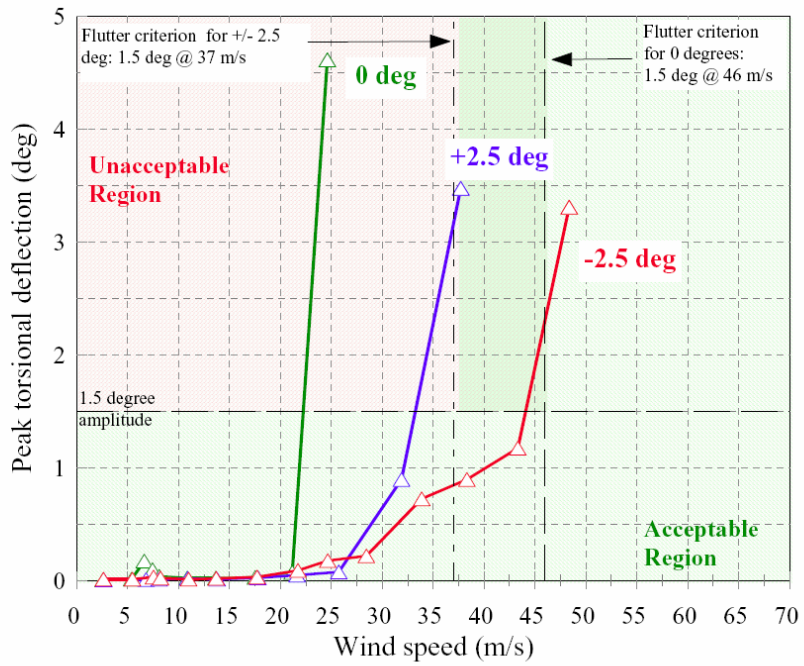
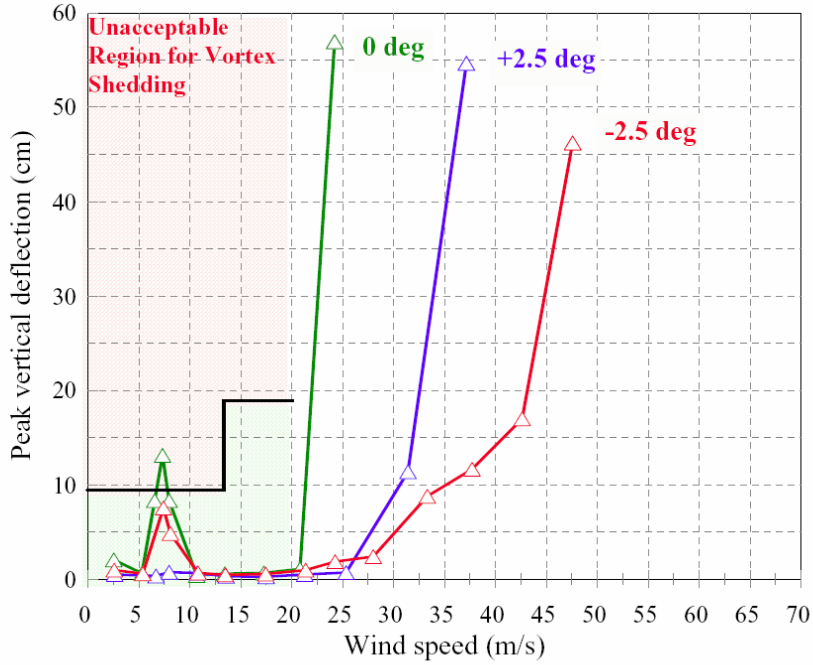


Figure 11. Photos de la configuration C2 - modèle à échelle réduite 1:25.



Notes: Region between 37 m/s and 46 m/s, and above 1.5 degrees is only acceptable for +/- 2.5 degrees.

Figure 12. Déplacements verticaux et en torsion: configuration E. Angles d'attaque du vent 0, -2.5, et +2.5 degrés.



Notes: Region between 37 m/s and 46 m/s, and above 1.5 degrees is only acceptable for +/- 2.5 degrees.

Figure 13. Déplacements verticaux et en torsion: configuration C1
Angles d'attaque du vent 0, -2.5, et +2.5 degrés.

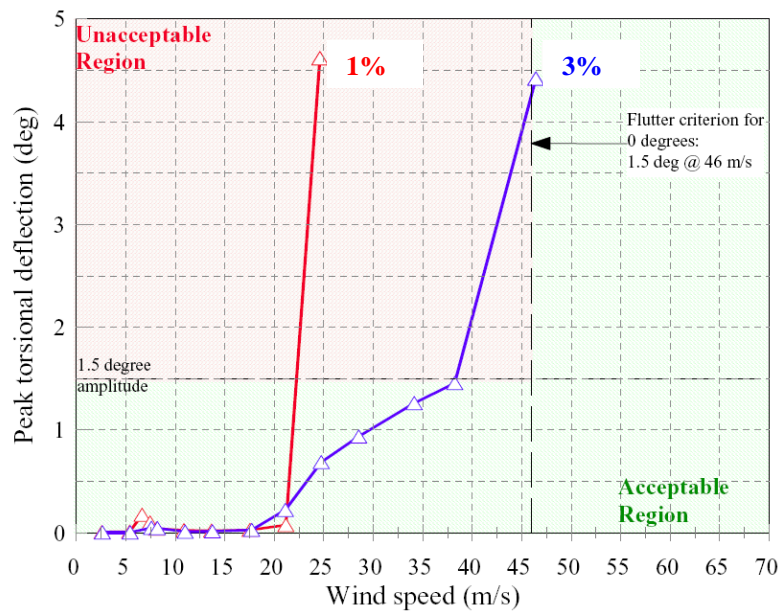
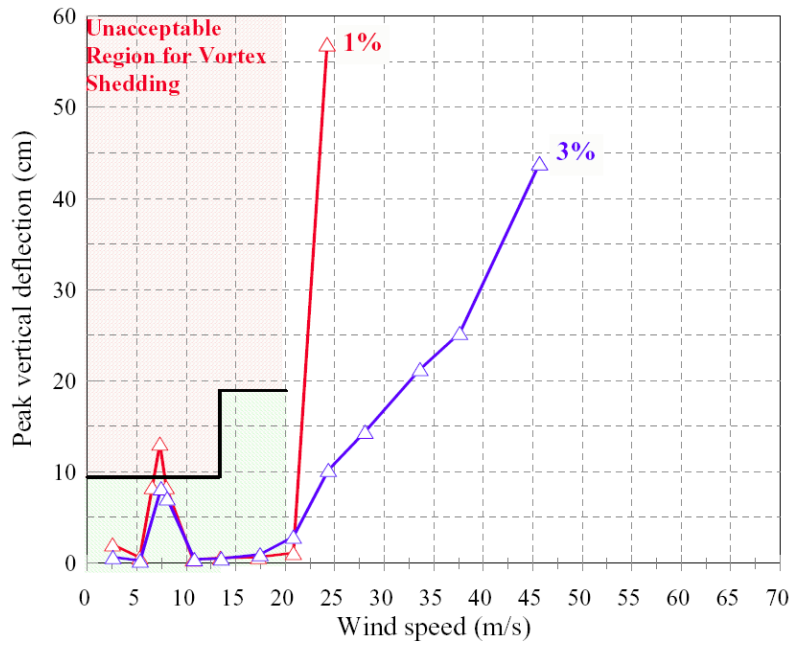
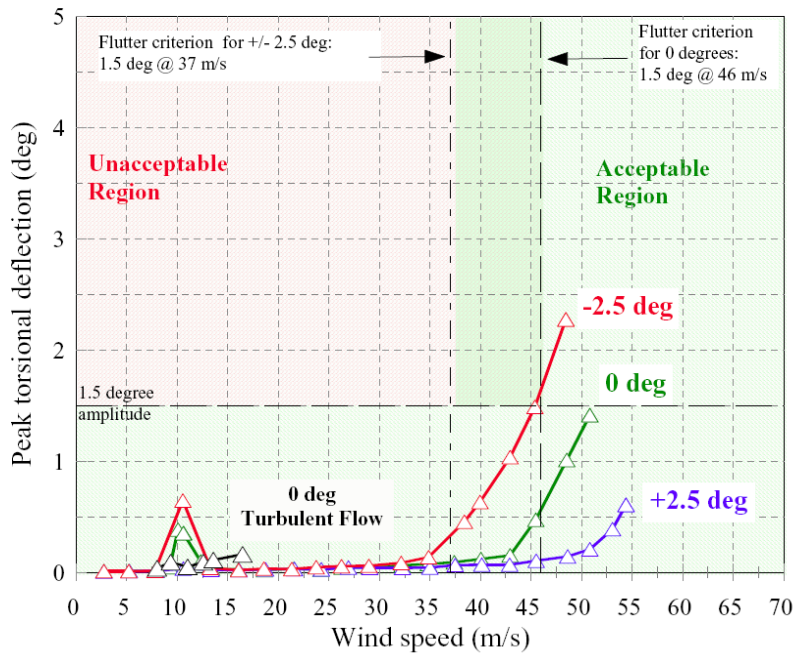
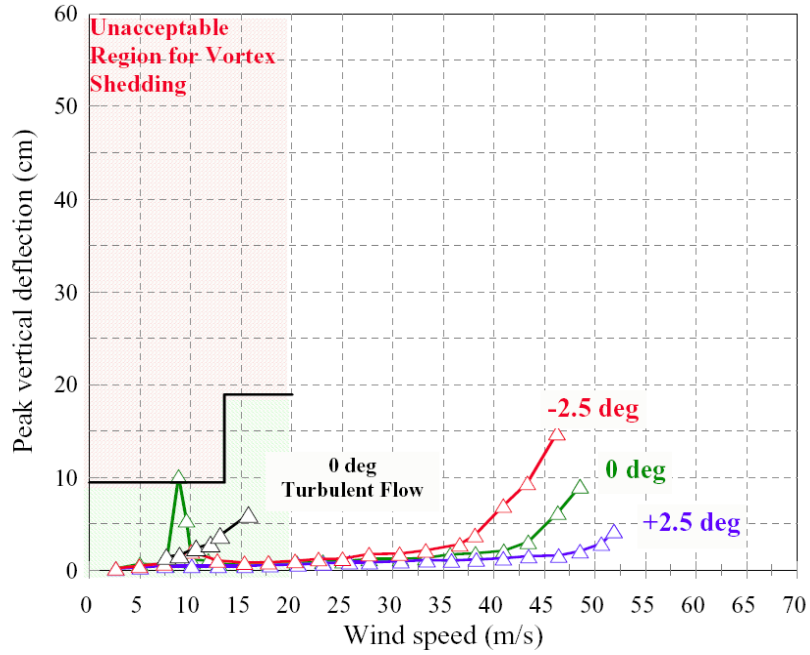


Figure 14. Déplacements verticaux et en torsion: configuration C1
 Angle d'attaque du vent 0 degré, amortissements 1% et 3%.



Notes: Region between 37 m/s and 46 m/s, and above 1.5 degrees is only acceptable for +/- 2.5 degrees.

Figure 15. Déplacements verticaux et en torsion: configuration C2

Angles d'attaque du vent 0, +2.5 et -2.5 degrés.

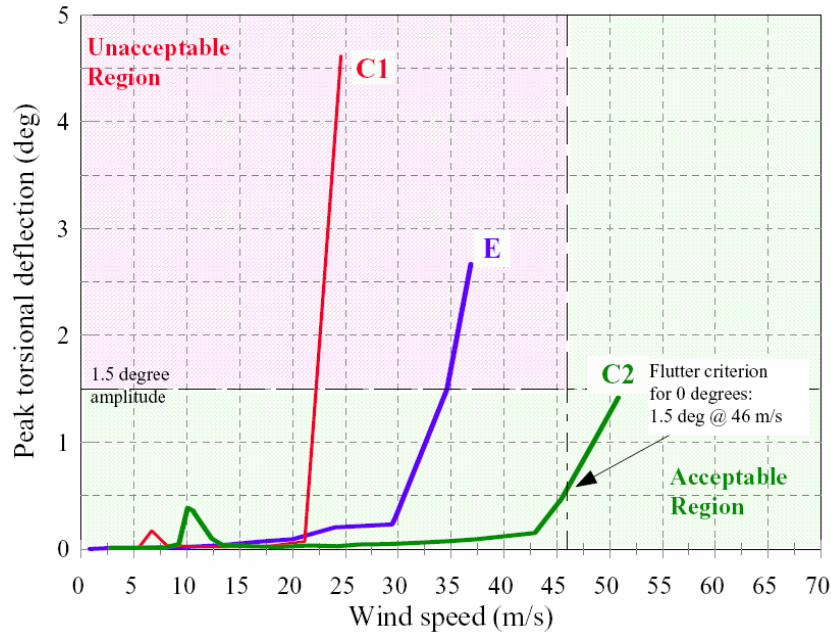


Figure 16. Déplacements en torsion pour un angle d'attaque de vent de 0 degré Configurations E, C1 et C2.

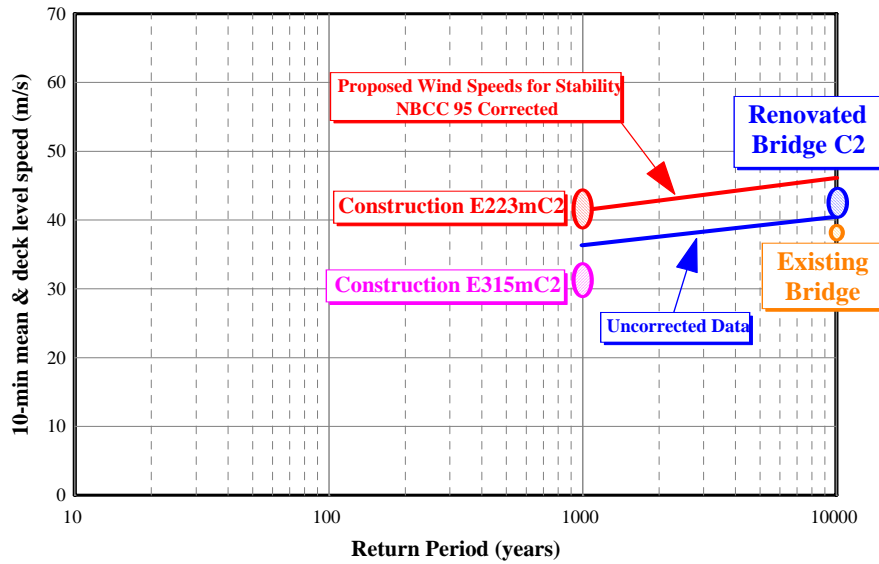


Figure 17. Résumé d'analyses de stabilité en flottement 3-D.