

Analyse des conditions météorologiques au site du pont de l'Ile-d'Orléans

Pierre-Olivier Dallaire
RWDI Inc

Stoyan Stoyanoff
RWDI Inc

Patrick Saathoff
RWDI Inc

Marco Accardo
RWDI Inc

Martin Talbot
Ministère des Transports du Québec

Jean-François Laflamme
Ministère des Transports du Québec

RÉSUMÉ

De manière à améliorer les estimations originales du projet d'étude de la stabilité aérodynamique du pont de l'Ile-d'Orléans, RWDI a été retenu par le ministère des Transports du Québec pour déterminer les caractéristiques du vent au site de l'ouvrage grâce à des données recueillies. En effet, le MTQ a procédé à l'installation d'un anémomètre au sommet de la tour sud du pont en 2007, ce qui a permis d'amasser des données sur une période de plus d'un an. Une analyse détaillée faisant le lien entre les données de l'aéroport Jean Lesage et les données recueillies au site du pont ont permis a) d'identifier les événements importants (tempêtes avec vent excédant 50 km/h, b) d'établir la bonne corrélation entre les deux sites et c) de proposer des courbes de récurrence de vent plus précises pour la conception et la stabilité de l'ouvrage. Les critères de performance proposés à l'aide de cette étude sont approximativement entre 3% et 8% inférieurs en terme de vitesse de vent comparativement aux critères originaux proposés en avril 2007.

1. INTRODUCTION

Les effets que les vents peuvent apporter sur un ouvrage tel que le pont de l'Ile-d'Orléans sont importants et nécessitent des analyses précises qui permettront d'estimer les charges et d'évaluer la stabilité de la structure. La première étape de ce processus comprend l'analyse du climat au site du pont. Cette analyse tient compte de la topographie des lieux et des historiques de données météorologiques à proximité (vitesses et directions), et résulte en des critères de conception et de stabilité. L'objectif de la présente étude est de peaufiner et de réviser les estimations initiales proposées en avril 2007 par l'obtention de données météo au site du pont sur une longue période (12 mois et plus). En appliquant une méthodologie statistique sur ces données et en déterminant la corrélation avec les données provenant de l'aéroport international Jean Lesage, des critères plus précis seront établis, ce qui aura comme effet de réduire le conservatisme lors de la conception s'il y a lieu. La figure 1 présente les emplacements du pont et de l'aéroport.



Figure 1 : Emplacements du pont et de l'aéroport

2. INSTRUMENTATION

À l'automne 2007, le MTQ a procédé à l'installation d'une station météo qui consiste en un anémomètre qui mesure la direction et la vitesse du vent horizontalement, le tout monté sur un mât au sommet de la tour sud du pont. L'anémomètre possède une précision de +/- 0.97 km/h et une limite de 215.65 km/h pour la composante de la vitesse du vent, et présente une précision de +/- 3° pour la composante de direction.

L'anémomètre est relié à un système d'acquisition de données CR10X de Campbell Scientific qui est alimenté par un panneau solaire de 20 Watt installé au sommet de la tour. La fréquence d'échantillonnage de l'anémomètre est de 10.7 Hz. À chaque minute, une moyenne de la vitesse et direction du vent est enregistrée. Également, une moyenne de la vitesse et direction du vent est réalisée aux 10 minutes ainsi qu'une mesure de la température ambiante. À toute les heures, la vitesse et direction moyenne du vent est calculée de même que les minimums et maximums de chacun de ces paramètres.

Le transfert des données se fait avec un modem cellulaire. Puisque le taux d'échantillonnage est élevé, que plusieurs opérations mathématiques sont effectuées et que le tout est alimenté par un panneau solaire, une considération particulière a été accordée à la consommation électrique lors de ce projet; le modem est activé pour une période de deux heures par jour pour diminuer la consommation d'énergie. Les figures 2 et 3 montrent l'anémomètre installé par l'équipe du MTQ.

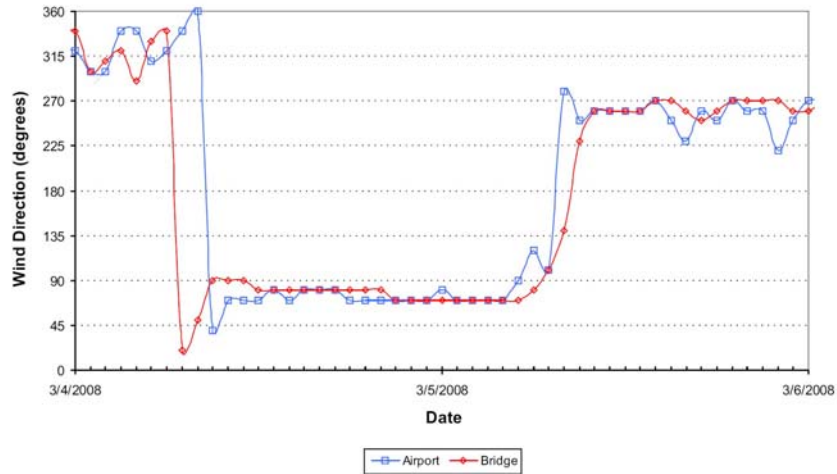


Figures 2 et 3 : Anémomètre installé au sommet de la tour sud du pont

3. MÉTHODOLOGIE

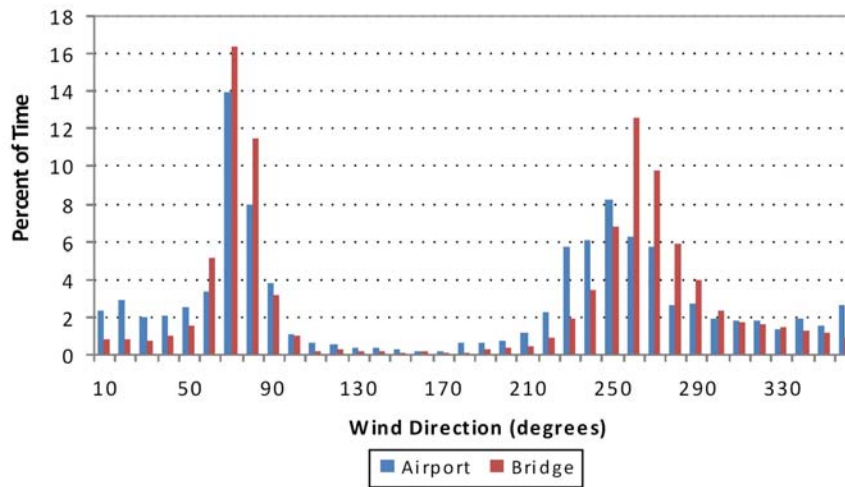
L'approche utilisée pour établir des critères de conception et stabilité plus précis comprend les points suivants :

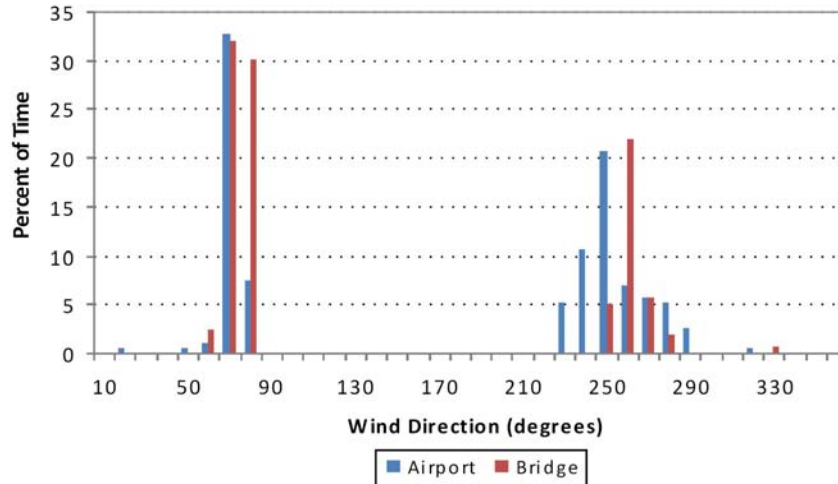
- Conversion des données (aéroport et pont) à l'élévation du tablier (37 m au-dessus du niveau de l'eau) et comparaison d'événements important;
- Établissement de la corrélation entre les deux sites et re-calcul des données long terme obtenues à l'aéroport Jean Lesage pour conversion / extrapolation au site du pont;
- Analyses statistiques finales sur les données obtenues directement au site du pont et sur les données «converties» de l'aéroport.



Figures 4 et 5 : Vitesses et directions horaires mesurées aux deux sites le 5 mars 2008 converties au niveau du tablier

Finalement, des graphiques comparatifs de distribution fréquentielle couvrant toutes les conditions de vent et également pour les vents supérieurs à 50 km/h durant la longue période de 12 mois ont été compilés aux figures 6 et 7.





Figures 6 et 7 : Distribution fréquentielle de tous les vents (haut) et des vents > 50 km/h (bas) aux deux sites de mesure converties au niveau du tablier du pont

La comparaison des données (converties au niveau du tablier) pour la période de 12 mois aux deux sites amène les points suivants :

- La corrélation entre les deux sites est très forte bien qu'un certain décalage soit visible à cause de la distance entre les deux sites (21 km);
- La fréquence d'occurrence de vents forts (supérieurs à 50 km/h) au site du pont est moindre qu'à l'aéroport; un total de 189 heures a été enregistré à l'aéroport en comparaison avec 159 heures au site du pont;
- La majorité des vents forts sont compris entre $60^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ (côté est) au site du pont où les vents forts du sud-ouest sont moins présents qu'à l'aéroport.

3.2 CONVERSION DES DONNÉES AU SITE DU PONT

En combinant la procédure ESDU à une méthode des moindres carrés, des facteurs ont été développés pour permettre a) la conversion directe des données enregistrés à l'aéroport (à 10 m d'élévation) et b) la conversion des données enregistrés au sommet de la tour sud, et ce, au niveau du tablier (37 m). Le tableau suivant présente ces facteurs en fonction de la direction du vent.

Tableau 1: Facteurs de conversion pour obtention de vitesses équivalentes au niveau du tablier du pont

Direction du vent	Aéroport – site du pont , facteurs de conversion (10 m à 37 m)	Site du pont du sommet jusqu’au tablier, facteurs de conversion (82.5 m à 37 m)	Direction du vent	Aéroport – site du pont , facteurs de conversion (10 m à 37 m)	Site du pont du sommet jusqu’au tablier, facteurs de conversion (82.5 m à 37 m)
10	1.317	0.907	190	1.382	0.909
20	1.364	0.909	200	1.372	0.909
30	1.405	0.910	210	1.328	0.906
40	1.447	0.909	220	1.275	0.903
50	1.457	0.912	230	1.245	0.903
60	1.432	0.916	240	1.237	0.906
70	1.407	0.918	250	1.226	0.908
80	1.387	0.910	260	1.211	0.904
90	1.367	0.901	270	1.197	0.901
100	1.377	0.901	280	1.225	0.901
110	1.385	0.900	290	1.254	0.901
120	1.378	0.899	300	1.258	0.901
130	1.365	0.898	310	1.254	0.901
140	1.367	0.899	320	1.253	0.902
150	1.386	0.904	330	1.256	0.902
160	1.400	0.907	340	1.259	0.903
170	1.396	0.908	350	1.266	0.904
180	1.391	0.909	360	1.273	0.904

Le tableau 1 permet ainsi la conversion des données long terme (1967-2008) de l’aéroport Jean Lesage vers le site du pont au niveau du tablier en prévision d’une analyse statistique qui permettra d’établir des courbes de récurrence et finalement les critères de conception et de stabilité révisés.

3.3 ANALYSE STATISTIQUE

Un modèle mathématique qui décrit la probabilité d’occurrence de la vitesse de vent et de la direction est adapté aux données météorologiques obtenues sous la forme d’une distribution de « *Weibull* ». Cette distribution exprime la probabilité que la vitesse de vent donnée à une certaine élévation excède la valeur U comme :

$$P_{\theta}(U) = A_{\theta} \exp \left[- \left(\frac{U}{C_{\theta}} \right)^{K_{\theta}} \right], \quad (1)$$

où P_{θ} est la probabilité d’excéder la vitesse U pour le secteur décrit par l’angle θ , θ est l’angle central du secteur, mesuré à partir du Nord, dans le sens horaire; et A_{θ} , C_{θ} , K_{θ} sont les coefficients qui satisfont le meilleur lissage des données.

À noter que A_θ consiste en la fraction du temps que le vent souffle pour le secteur décrit par l'angle θ . Chaque secteur utilisé pour l'analyse comprend 10 degrés. Pour ajouter une certaine flexibilité au processus de lissage, deux courbes différentes de « Weibull » ont été utilisées pour décrire les basses et hautes vitesses de vent avec une expression de transition graduelle.

À partir de la distribution de probabilité présentée en (1), la probabilité globale d'occurrence d'une vitesse de vent est obtenue en sommant toutes les directions :

$$P(U) = P_N(U) = \sum_{\theta} [P_{\theta N}(U)] \quad (2)$$

où l'indice N réfère aux vents normaux.

En adaptant la théorie du bruit aléatoire aux données météorologiques (Rice²), il peut être démontré que la période de récurrence, R , en années pour une vitesse donnée, U , est reliée à $P(U)$ par cette méthode appelée « *Upcrossing* » :

$$R = - \left[\frac{|\dot{U}_N|}{2} \frac{dP_N(U)}{dU_N} (T_A) \right]^{-1} \quad (3)$$

où $|\dot{U}|_N$ sont les moyennes absolues des taux de variation des valeurs horaires de U pour les vents normaux dans le temps;
 T_A , est le nombre total d'heures contenues dans une année, $T_A=8766$.

Ainsi, l'équation (3) a été utilisée pour prédire la période de récurrence d'une sélection de vitesses de vent. Les vitesses de vent correspondant à des périodes requises telles que 20, 100 et 1000 années sont ensuite obtenues par interpolation de la sélection initiale.

Une modification de l'équation (3) permet également d'évaluer la période de récurrence pour les vents normaux au pont seulement^{3,4} (à considérer pour l'établissement du critère de stabilité). La période de récurrence R est donnée comme étant :

$$R = - \left[\sum_{\theta} \left(\frac{|\dot{U}_{NB}|}{2} \frac{dP_{\theta N}}{dU_{NB}} \sqrt{1 + \left(\frac{|\dot{\theta}_{NB}|}{|\dot{U}_{NB}|} \frac{dU_{NB}}{d\theta_N} \right)^2} (T_A) \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

² Rice, S.O., Mathematical Analysis of Random Noise, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 23, 1944.

³ Lepage, M.F., and Irwin, P.A., A Technique for Combining Historic Wind Data with Wind Loads, *Proc. 5th U.S. National Conference on Wind Engineering*, Lubbock, Texas, 1985.

⁴ Irwin, P.A., Prediction and Control of the Wind Response of Long Span Bridges with Plate Girder Decks, *Proc. Structures Congress '87/ST Div/ASCE*, Orlando, Florida, August 17-20, 1987.

où $|\dot{\theta}|_N$ sont les moyennes absolues des taux de variation des directions horaires de vent pour les vents normaux dans le temps;
 U_{NB} consiste en la vitesse de l'instabilité (la vitesse critique de flottement).

À titre d'exemple d'utilisation des équations (2) et (3), la figure 8 présente la distribution de la vitesse en fonction de la direction des vents au site du pont et au site de l'aéroport pour une période de récurrence de 100 années.

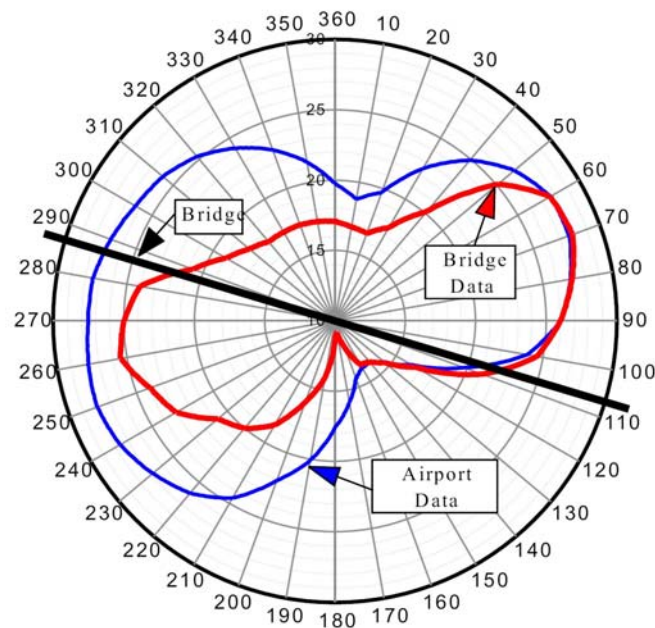
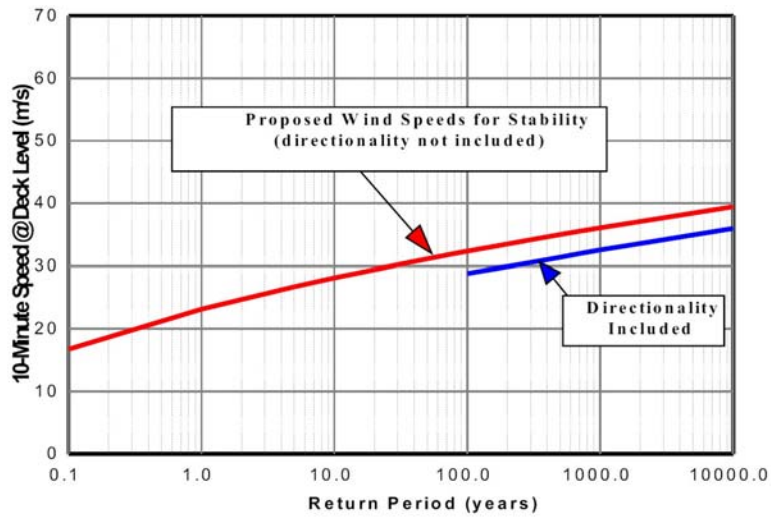
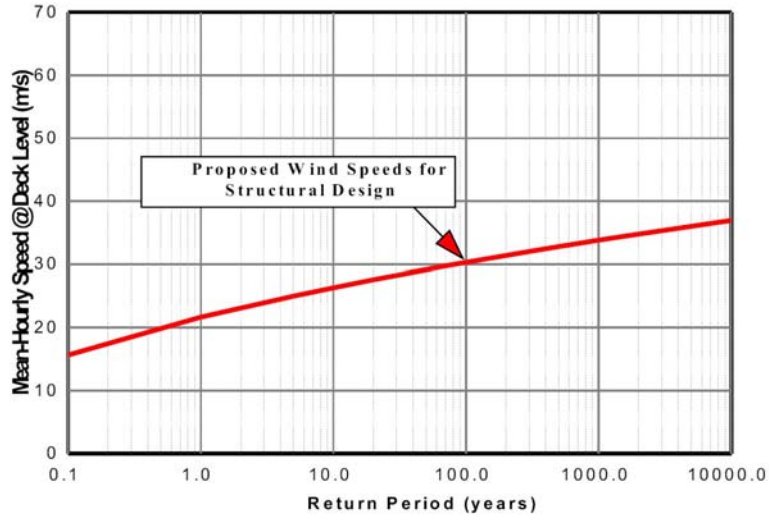


Figure 8 : Probabilité des vitesses horaires en fonction de la direction des vents

En ce qui a trait aux critères de performance reliés à la conception et la stabilité de l'ouvrage, ils sont déterminés à partir des figures 9 et 10 qui découlent de l'application des équations (2), (3) et (4) sur les données long terme de l'aéroport converties au site du pont. L'effet de la directionalité (calculée à partir de l'équation (4)) est visible à la figure 10 où les vitesses sont légèrement plus faibles.

Des périodes de récurrence de 20 et 100 années sont généralement utilisées pour la conception de la structure; 20 années pour les phases de construction et 100 années pour l'ouvrage complété. Ces périodes de récurrence correspondent à des vitesses horaires. Pour la stabilité de l'ouvrage, des vitesses moyennées sur 10 minutes sont plus appropriées étant donné qu'une instabilité telle que le flottement peut se former sur une période de temps plus courte qu'une heure. Les périodes de récurrence utilisées pour la stabilité sont 1000 (phases de construction) et 10000 années (ouvrage complété).



Figures 9 et 10 : Courbe de récurrence proposée pour la conception (figure du haut) et courbe de récurrence proposée pour la stabilité (figure du bas)

4 COMPARAISON DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

À partir des courbes développées aux figures 9 et 10, les valeurs de vitesses correspondantes aux périodes de récurrence de conception et de stabilité de l'ouvrage ont été extraites et sont présentées au tableau suivant où les estimations initiales sont également incluses (Avril 2007).

Tableau 2: Comparaison des résultats avec les prédictions originales (Avril 2007)

Période de récurrence (années)	Cas	Vitesse de vent horaire (m/s)	Vitesse de vent moyennée sur 10 minutes (m/s)
20	Conception de la structure / durant la construction	27.6 ⇒ Figure 9 28.1 ⇒ Avril 2007	–
100	Conception de la structure / ouvrage complété	30.3 ⇒ Figure 9 31.0 ⇒ Avril 2007	–
1000	Stabilité (flottement) de la structure / durant la construction	–	32.6 ⇒ Figure 10 35.2 ⇒ Avril 2007
10000	Stabilité (flottement) de la structure / ouvrage complété	–	36.0 ⇒ Figure 10 39.3 ⇒ Avril 2007

Les nouvelles prédictions obtenues à partir de l'analyse des données au site du pont ont permis d'abaisser les critères de conception et de stabilité :

- Pour la conception, la réduction peut atteindre 3% sur la vitesse, ce qui représente une réduction directe de 6% sur les charges appliquées à la structure;
- Pour la stabilité, la réduction est plus prononcée et est d'environ 8%.

Cette étude a donc permis de réduire le conservatisme présent dans les estimations initiales proposées en avril 2007 mais également de démontrer que même si ces estimations n'incluaient pas l'utilisation d'un anémomètre sur le site de l'ouvrage, elles étaient toutefois justes et en accord avec la présente étude.

Même si une diminution de 6% sur les charges de vent peut paraître faible, elle a des conséquences importantes où des économies peuvent être réalisées en évitant le surdimensionnement lors de la conception.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier MM. André Godbout de la direction des structures du ministère des Transports du Québec et Claude Bérubé de la firme APIC pour leur aide précieuse lors de l'installation des équipements au haut de la tour.