

Banc d'expérimentation avancé 3 DDL pour essais en soufflerie

Pierre-Olivier Dallaire, ing. jr
RWDI Inc, Bromont

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

André Laneville, Ph.D., ing.
Université de Sherbrooke

Frédéric Légeron, Ph.D., ing.
Université de Sherbrooke

Simon Prud'homme
Université de Sherbrooke

RÉSUMÉ

Cet article traite d'un nouvel équipement relatif à l'expérimentation en soufflerie de maquettes à échelle réduite. Les structures complexes telles que les ponts à grandes travées nécessitent des analyses pour prédire leurs comportements face à des vents. Des méthodes numériques existent pour identifier certains coefficients de couplage qui sont ensuite utilisés pour simuler le déplacement du pont face à une excitation aérodynamique. La conception de ce nouveau banc d'expérimentation comprenant 3 degrés de liberté offre plusieurs possibilités relatives à ces analyses, comme l'identification complète des 18 dérivées aérodynamiques qui sont basées sur une approche de type « *Scanlan* ». De plus, le banc d'expérimentation comprend la technologie pour effectuer la visualisation haute vitesse du sillage provoqué par l'interaction fluide-structure. Ce dernier point est un atout important pour la comparaison des résultats provenant des modèles numériques *CFD*.

1. INTRODUCTION

L'étude des effets aérodynamiques sur des ouvrages d'envergure tels que les ponts est primordiale pour connaître la réponse de la structure. En effet, l'interaction fluide-structure peut être la source d'instabilités vibratoires et générer des efforts importants. La réponse aéro-élastique, qui se caractérise par un couplage des propriétés dynamiques et aérodynamiques de la structure non-profilée, nécessite plusieurs méthodes d'analyse. Différents types d'instabilités sont généralement observés pour les ponts, voici trois exemples :

- Les vibrations éoliennes : phénomène de résonance causé par la synchronisation (ou encore « *lock-in* ») d'une fréquence propre de la structure et de la période du détachement tourbillonnaire;
- Le ballonnement : excitation de la structure par la turbulence contenue dans le vent. L'énergie présente dans l'écoulement est caractérisée par un spectre fréquentiel qui peut stimuler certains des modes de vibration ;

- Le flottement : phénomène résultant de l'instabilité aérodynamique de la structure qui engendre généralement un mouvement en torsion seule ou encore un couplage entre le déplacement vertical et la torsion du pont .

Parmi ces trois phénomènes, le flottement est celui qui peut mener à une situation catastrophique. Cette instabilité absorbe l'énergie, ce qui a pour effet d'accroître l'amplitude des vibrations dans le temps et ceci peut mener à une rupture de certains éléments mécaniques du pont. Il est ainsi très important de déterminer la vitesse critique d'écoulement qui pourrait mener à cette situation. Pour analyser le comportement du pont, il existe des méthodes analytiques/numériques semi-empiriques et expérimentales qui permettent d'extraire certaines caractéristiques aérodynamiques du corps pour ensuite les ré-injecter dans un modèle numérique 3D simulant la réponse vibratoire temporelle. Ces méthodes d'analyse sont généralement basées sur l'approche de type « *Scanlan* » [1] et comportent deux étapes principales :

1. L'obtention de paramètres dépendants du comportement aéro-élastique appelés « dérivées aérodynamiques » par méthodologie numérique (exemple : procédé itératif des moindres carrés [2]), et ce, à partir d'acquisitions temporelles expérimentales en régimes libre et forcé ;
2. Simulation temporelle de l'équation du mouvement discrétisée de la structure, modélisation des forces d'excitation (utilisation des dérivées aérodynamiques) par formulation quasi-statique, et simulation des conditions de vent à la structure [3,4,5,6].

Les deux prochaines sous-sections précisent cette approche.

1.1 IDENTIFICATION DES DÉRIVÉES AÉRODYNAMIQUES

La modélisation aéro-élastique d'une structure utilise les dérivées aérodynamiques, qui sont des paramètres aérodynamiques couplés, pour définir les forces auto excitées par unité de longueur selon trois degrés de liberté (*DDL*) : force latérale (D_{SE}), force verticale (L_{SE}) et moment de torsion (M_{SE}). L'équation (1) définit ces forces sous la forme d'une expansion de *Taylor* [7].

$$\begin{aligned} D_{SE} &= \frac{1}{2} \rho U^2 b \left[kP_1^* \frac{\dot{p}}{U} + kP_2^* b \frac{\dot{\alpha}}{U} + k^2 P_3^* \alpha + k^2 P_4^* \frac{p}{b} + kP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + k^2 P_6^* \frac{h}{b} \right], \\ L_{SE} &= \frac{1}{2} \rho U^2 b \left[kH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + kH_2^* b \frac{\dot{\alpha}}{U} + k^2 H_3^* \alpha + k^2 H_4^* \frac{h}{b} + kH_5^* \frac{\dot{p}}{U} + k^2 H_6^* \frac{p}{b} \right], \\ M_{SE} &= \frac{1}{2} \rho U^2 b^2 \left[kA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + kA_2^* b \frac{\dot{\alpha}}{U} + k^2 A_3^* \alpha + k^2 A_4^* \frac{h}{b} + kA_5^* \frac{\dot{p}}{U} + k^2 A_6^* \frac{p}{b} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

où les 18 dérivées aérodynamiques sont P_i^* , A_i^* et H_i^* pour $i=1$ à 6, U est la vitesse de l'écoulement, k est la fréquence réduite ($2\pi f B / U_{ref}$) et ρ est la densité de l'air. p , h et α

sont respectivement les amplitudes latérale, verticale et l'angle de rotation. Également, f est la fréquence modale, B est la largeur du tablier et U la vitesse du vent. L'identification des dérivées nécessite l'acquisition de multiples signaux de déplacement. Une maquette de la section du pont à échelle réduite est conçue et fabriquée selon certains critères adimensionnels. Elle est ensuite testée en soufflerie pour plusieurs vitesses de vent. La figure 1 montre un exemple de maquette en soufflerie [9] et la figure 2 présente un exemple de signaux obtenus après une excitation par impulsions.



Figure 1 : Exemple d'une maquette de pont réduite réalisée dans le cadre du projet de L'île d'Orléans, Québec – 2 DDL, déplacements possibles en régime libre : vertical et en torsion

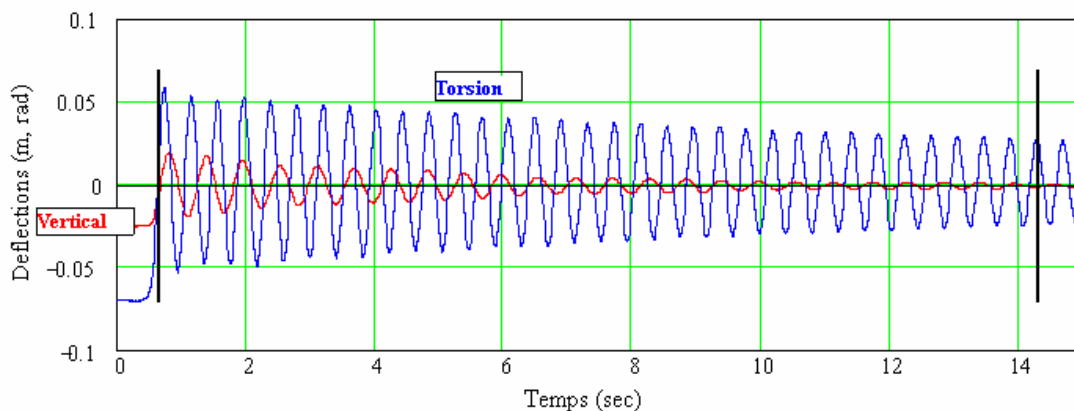


Figure 2 : Exemple de signaux temporels 2 DDL - amplitude de vibration en régime libre après une excitation par impulsion

Pour calculer ces dérivées aérodynamiques, deux procédures peuvent être utilisées en régime de vibration libre :

- Méthode de minimisation de l'erreur « EMM » [8];
- Méthode itérative des moindres carrés « ILS » [2].

Pour le cas des méthodes d'identification par régime de vibration forcé, le mouvement de la maquette est imposé par un excitateur externe [14]; en effet, des amplitudes, fréquences et phases sont imposées pour les DDL sélectionnés. Des données telles que les accélérations, forces et moments sont mesurés à différentes vitesses de vent. Cette méthode est très difficile à appliquer car elle exige un équipement mécanique complexe. La présente recherche propose donc une solution pour l'emploi de cette méthode ainsi que des méthodes en régime de vibration libre à l'aide du même banc d'essai.

Ces dérivées sont ensuite données comme une fonction de la vitesse réduite U/fB et utilisées pour modéliser le comportement vibratoire du pont face à un vent. D'autres techniques basées sur le principe des vibrations forcées sont également utilisées, mais requièrent un appareillage sophistiqué qui contrôle les conditions limites aux extrémités du modèle réduit en soufflerie. Cette possibilité est très intéressante du fait qu'elle peut générer des résultats complémentaires à ceux du régime de vibration libre. Avec le montage actuel, il n'est possible que de représenter les DDL vertical et en torsion, ce qui conduit à l'identification de 8 dérivées aérodynamiques seulement. La figure 3 présente les dérivées aérodynamiques obtenues lors de l'analyse du Pont de l'Île d'Orléans à titre d'exemple [9].

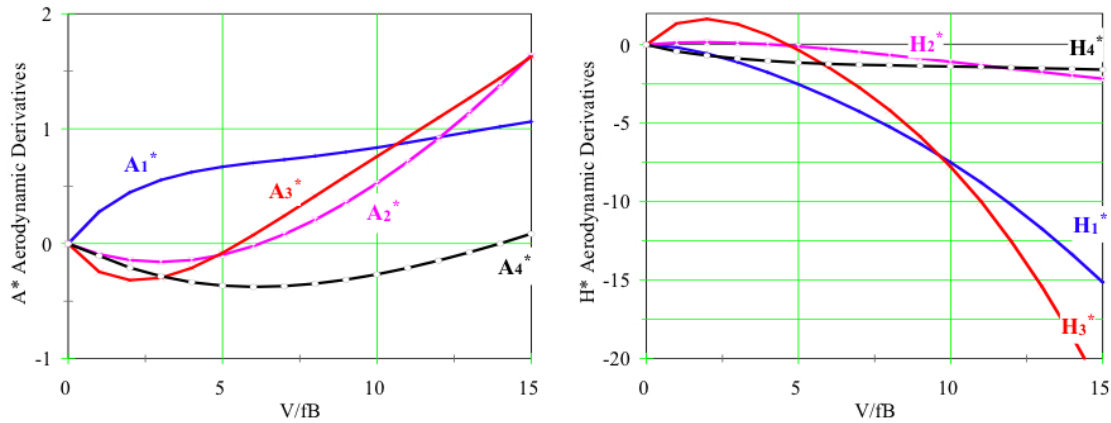


Figure 3 : Exemple de dérivées aérodynamiques calculées pour le pont de l'Île d'Orléans

1.2 ANALYSE 3D DE FLOTTEMENT

L'étude de flottement 3 dimensions est importante pour prédire la stabilité de l'ouvrage ainsi que la vitesse critique de vent. Les modes de vibration de la structure susceptibles à être excités sont retenus pour l'analyse. L'équation de base du mouvement d'un corps soumis à une action dynamique causée par le vent est donnée en (2).

$$[M]\{\ddot{Z}\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = \{F\}_{SE} + \{F\}_{BUFF} \quad (2)$$

où M , C et K sont les matrices de masse, de rigidité et d'amortissement du système global. $\{Z\}$ est le vecteur de déplacement tandis que $\{F\}_{SE}$ (défini en (1)) et $\{F\}_{BUFF}$ sont respectivement les forces auto excitées et les forces de ballotement. Les forces de

ballotement sont considérées comme étant négligeables lors des conditions entourant le phénomène de flottement. Après cette simplification, la solution en stabilité de l'équation (2) peut être analysée à l'aide des valeurs propres conjuguées λ_k pour chaque mode k :

$$\lambda_k = \mu_k \pm i \omega_k, \text{ où } \tilde{\omega}_k = \sqrt{\mu_k^2 + \omega_k^2} \quad (3)$$

$$\zeta_k = -\frac{\mu_k}{\omega_k}, \quad \omega_k = \tilde{\omega}_k \sqrt{1 - \zeta_k^2}, \quad \text{et } f_k = \frac{\omega_k}{2\pi}$$

où f_k est la fréquence naturelle du mode k et ζ_k est le ratio d'amortissement total du système (structural et aérodynamique). Le critère de stabilité basé sur l'amortissement du système est défini comme suit :

- Si $\zeta_k \leq 0$, divergence ou oscillations croissantes (flottement);
- Si $\zeta_k > 0$, oscillations décroissantes d'un système dynamiquement stable.

L'amortissement structural est une valeur constante propre au système. Le phénomène de flottement se produit lorsque l'amortissement aérodynamique devient négatif et sa valeur absolue supérieure à celle de l'amortissement structural.

1.3 DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES ACTUELLES

La qualité des résultats concernant la prédiction des vitesses de vent critiques est directement liée à la qualité des essais en soufflerie. Étant extraites des signaux de déplacements temporels, les dérivées aérodynamiques sont ainsi limitées par le montage expérimental 2 DDL. Dans un effort de recherche et de développement, *RWDI* et l'*Université de Sherbrooke* ont lancé un projet visant la conception et la fabrication d'un banc d'expérimentation 3 DDL aux caractéristiques multiples et avancées; des bancs d'essai à 3 DDL existent déjà et ont eu du succès [10]. Également supporté par le *CSRNG*, ce projet permettra d'effectuer des essais en soufflerie beaucoup plus complets et apportera plusieurs améliorations quant au contrôle des paramètres d'expérimentation. De plus, l'extraction des 18 dérivées aérodynamiques couplées sera possible.

2. DESCRIPTION DU BANC D'EXPÉRIMENTATION 3 DDL

Le projet se situe actuellement au stade de conception et de validation des idées. Cette section présente les éléments importants de ce nouvel appareil ainsi que les principaux défis à relever. Le banc d'expérimentation comprend les deux grands thèmes suivants :

- Structure/mécanique (DDL, amortissement, rigidité, ...);
- Visualisation avancée de l'écoulement.

La description des capteurs (jauges de contraintes, capteurs de position, etc.) ne sera pas présentée étant donné qu'elle ne contient pas d'innovations majeures en comparaison avec ce qui est présentement utilisé. Des représentations graphiques préliminaires seront exposées pour définir le concept global. Le banc sera installé à la soufflerie de l'Université de Sherbrooke; la figure 4 présente une photo de la section d'essai de 6 pi par 6 pi.



Figure 4 : Soufflerie de l'Université de Sherbrooke – vue de profil de la section d'essai

2.1 STRUCTURE ET MÉCANIQUE DU MONTAGE

De manière à obtenir 3 DDL, un concept de « guide » a été élaboré ce qui permet de découpler les trois directions. En effet, l'idée d'utiliser des paliers à air (ou encore « *air bearings* ») [11] cylindriques avec un tube de précision a l'avantage d'éliminer la friction et d'obtenir des degrés de liberté qui sont ajustables de manière indépendante. Avant d'exposer les détails du concept, l'illustration présentée à la figure 5 spécifie l'emplacement du banc d'expérimentation en référence à la section d'essai. À noter que l'installation du banc est identique sur la face opposée.

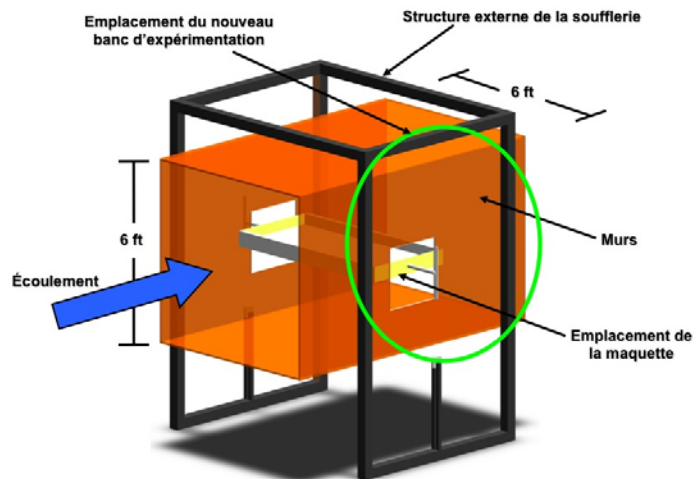


Figure 5 : Illustration de la section d'essai – emplacement du banc d'expérimentation

D'un point de vue global, les caractéristiques du montage sont les suivantes :

- Chaque DDL possède un arrangement de ressort individuel pour régler la fréquence;
- Un arbre maintenu par un roulement à très faible friction est utilisé pour générer le mouvement de torsion du modèle;
- Des paliers à air se déplacent sur des guides cylindres pour les directions latérale et verticale – ces paliers sont alimentés en permanence par une source de pression;
- L'amortissement est généré par dissipation de champ magnétique (phénomène des *courants d'Eddy* ou *Foucault*) et ce, pour chaque DDL. Des solénoïdes sont utilisés pour générer des champs magnétiques qui sont ensuite induits dans des pièces en mouvement;
- Des vérins hydrauliques de haute puissance sont contrôlés et assurent les vibrations forcées ainsi que les variations d'angle d'attaque.

La figure 6 présente une illustration des éléments mécaniques qui assurent le mouvement de rotation.

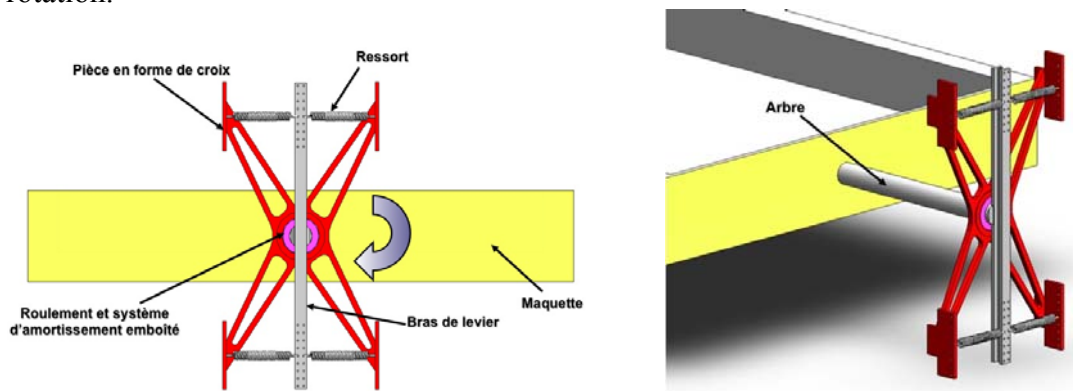


Figure 6 : Banc d'expérimentation – détails du DDL en rotation

Les paliers sont ensuite assemblés sur la pièce en croix et permettent le déplacement vertical de l'ensemble; voir figure 7.

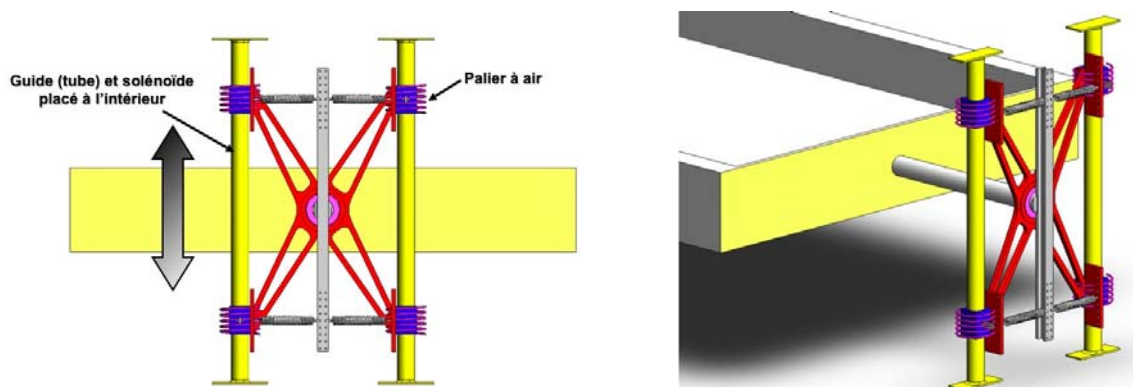


Figure 7 : Banc d'expérimentation – détails du DDL vertical

Pour obtenir une rigidité en direction verticale et le DDL latéral, quatre paliers supplémentaires sont installés sur les guides verticaux. Des ressorts reliant ces nouveaux paliers aux précédents sont ensuite ajoutés. Pour assurer le déplacement latéral, un cadre extérieur muni de guides horizontaux soutient l'ensemble tel que présenté à la prochaine illustration.

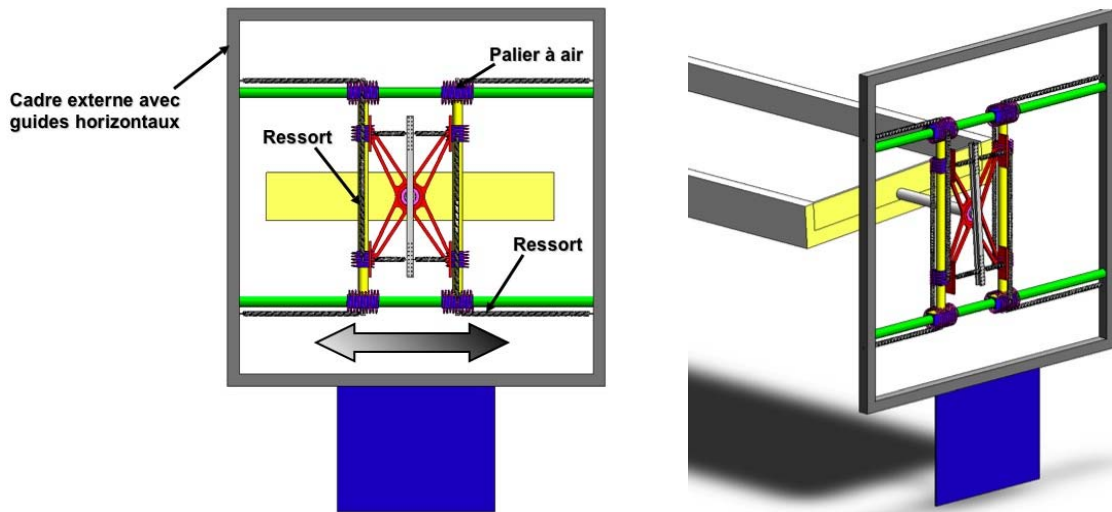


Figure 8 : Banc d'expérimentation – détails du DDL latéral

Finalement, le support du cadre externe est obtenu par l'ajout des vérins hydrauliques qui permettront de varier l'angle d'attaque du modèle et agiront également comme dispositif de contrôle des vibrations forcées. Un palier à air plat est utilisé pour stabiliser le plan du cadre et assurer un plan parfait. La figure 9 montre le banc d'expérimentation final.

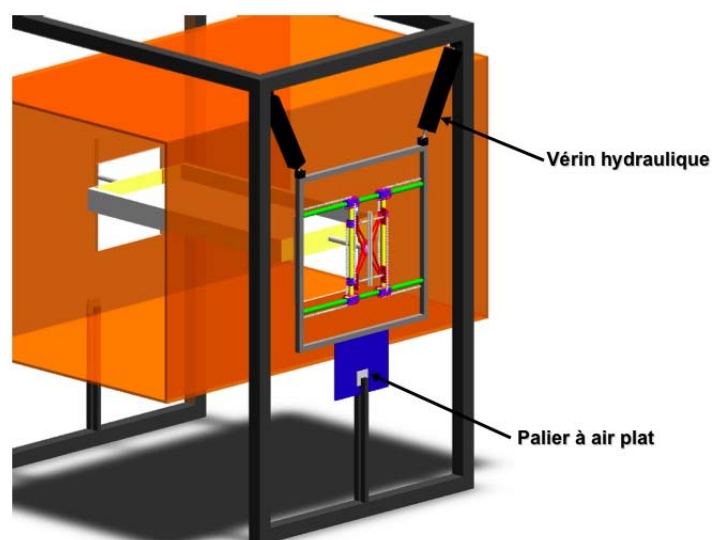


Figure 9 : Banc d'expérimentation – assemblage global

La conception de ce banc comporte plusieurs aspects qui, combinés avec les méthodes existantes, permettront des percées pour les travaux portant sur l'étude aérodynamique. Cependant, certains défis de taille demanderont une attention particulière.

Avantages :

- 3DDL indépendants – identification de 18 dérivées aérodynamiques;
- Fréquence et amortissement indépendants pour chaque DDL;
- Réglage de l'amortissement par dispositif électronique;
- Choix du régime de vibration : libre ou forcé;
- Automatisation du changement d'angle d'attaque et des vibrations forcées;
- Possibilité d'exercer du contrôle actif quant à l'amortissement et aux vibrations;
- Friction réduite par l'emploi de paliers à air.

Inconvénients :

- Concept d'amortissement plus difficile à appliquer en rotation;
- Grande quantité de pièces qui requièrent un parallélisme très précis;
- Masse ajoutée peut devenir importante – sélection des matériaux.

2.2 VISUALISATION AVANCÉE DE L'ÉCOULEMENT

La dynamique du sillage engendré par l'interaction fluide-structure est généralement très complexe. Il peut exister une relation précise entre le comportement d'une structure lors d'une instabilité vibratoire et les propriétés du sillage. Pour certains cas, la visualisation synchronisée à l'acquisition de données s'avère être un outil d'une grande importance. La figure suivante montre deux images prises à une même vitesse d'écoulement lors de deux régimes permanents; il s'agit d'un tube oscillant verticalement.

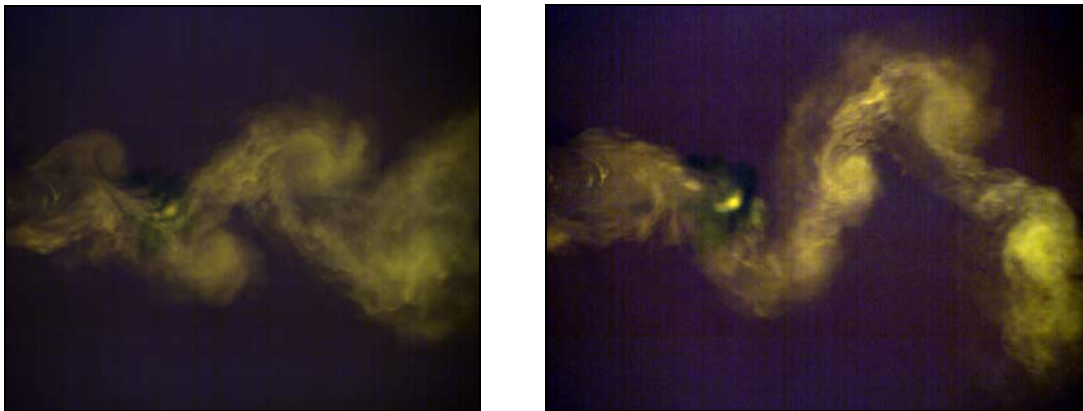


Figure 10 : Images obtenues à 500 Hz – cylindre oscillant verticalement et sillages générés
Université de Sherbrooke

Cet exemple démontre que pour les mêmes paramètres d'expérimentation, des situations différentes peuvent exister [12,13]. Pour améliorer la compréhension et l'interprétation de ce phénomène, le banc d'expérimentation sera doté des outils suivants :

- Système de traverse mécanique contrôlé par informatique permettant de manipuler des instruments en 3D;
- Deux tranches laser qui produisent des plans à haute densité de lumière;
- Deux générateurs de brouillard (fumée);
- Deux caméras couleurs et haute vitesse (500 images / sec) synchronisées au système d'acquisition principal.

Il est important de noter que la technologie concernant le système de traverse et la visualisation a été testée au préalable à l'*Université de Sherbrooke* et optimisée. En utilisant cette technique de visualisation, il sera possible d'étudier simultanément l'écoulement sur deux plans verticaux distincts. Un des objectifs est de corréler la dynamique de l'écoulement selon l'axe du modèle étudié, c'est-à-dire avoir un plan de visualisation de référence qui serait fixe dans le temps et un deuxième qui se déplace grâce au système de traverse. Il serait ainsi possible de représenter la totalité de l'écoulement en 3D. Ce dernier point présente un grand avantage : des comparaisons directes avec des résultats provenant des méthodes de *CFD* seraient possibles. Encore peu utilisées dans le domaine de l'analyse des ponts, les techniques de *CFD* demandent plusieurs validations complexes à effectuer. En effet, les données quant aux détails du sillage sont rarement disponibles. Avec ce banc d'expérimentation, ces validations seront possible.

3. CONCLUSION

La conception d'un nouveau banc d'expérimentation 3 DDL présente des options très intéressantes pour le futur de l'analyse aérodynamique. En effet, les méthodes expérimentales et analytiques sont d'une extrême importance pour les structures aéro-élastiques telles que les ponts à grandes travées. La prédiction des vitesses critiques concernant les instabilités vibratoires (exemple : flottement) nécessite des propriétés du système qui ne peuvent être obtenues que par voie expérimentale; la qualité du montage expérimental est ainsi à la source des résultats numériques. En plus de participer à l'amélioration des méthodes numériques, cet appareil offre de nouvelles possibilités concernant la validation des techniques de *CFD* des corps non profilés. Le banc d'expérimentation 3 DDL sera un outil très utile pour la recherche fondamentale en mécanique des fluides.

REMERCIEMENTS

Les auteurs reconnaissent le soutien financier du *Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada*, de *RWDI Inc* et de l'*Université de Sherbrooke*.

RÉFÉRENCES

- [1] Sabzevari, A. and Scanlan, R. H. 1968, "Aerodynamic Instability of Suspension Bridge", Journal Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, vol. 94, EM2, pp. 489-519
- [2] Chowdhury, A., and Sarkar, P. A new technique for identification of 18 flutter derivatives using 3DOF sectional model, In Proc. of 11th Int. Conference Wind Engineering, Lubbock, Texas, 2003.
- [3] Xie, J. State Space Method for 3D Flutter Analysis of Bridge Structures, Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering, Roorkee, India, pp. 269-276, 1985.
- [4] Stoyanoff, S. A unified approach for 3D stability and time domain response analysis with application of quasi-steady theory, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 89, pp. 1591-1606, 2001.
- [5] RWDI BR02-2007, Wind Response Analysis and Design Loads, RWDI Reference Document, March 30, 2007
- [6] Stoyanoff S., and Larose, G. Identification of Aerodynamic Derivatives: A Parametric Study, International Colloquium BBAA V, Ottawa, Canada, 2004
- [7] Singh, L., Jones, N., Scanlan, R., and Lorendeaux, O. Simultaneous identification of 3-dof aeroelastic parameters, In Proc. 9th International Conference on Wind Engineering, p. 972-981, New Delhi, India, 1995.
- [8] Poulsen, N.K., Damsgaard, A., and Reinhold, T. A. Determination of flutter derivatives for the Great Belt Bridge, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44 (1992), 153-164.
- [9] RWDI Report 05-1237A, (2006). Étude aérodynamique du pont de l'Ile d'Orléans
- [10] Singh, L. Experimental Determination of Aeroelastic and Aerodynamic Parameters of Long-Span Bridges, PhD thesis, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, January 1997.
- [11] Smith, J., D. An experimental study of the aeroelastic instability of rectangular cylinders, M.A.Sc. thesis, University of British Columbia, Canada, 1960.
- [12] Brika, D., Laneville, A. Vortex-induced vibrations of a long flexible circular cylinder, Journal of Fluid Mechanics, 1993, v. 250, pp. 481-508.
- [13] Dallaire, P.O., Cuesta-Lavoie, D., Fillion, S., Laneville, A. and Van Dyke, P. A Flow Visualization of Critical Events of Vortex Induced Vibrations in the Case of a Long Flexible Cylindrical Tube, In Proc. of the 8th International Conference on Flow-Induced Vibrations, Paris, France, 2004.
- [14] Ukeguchi, N. et al. (1966). An investigation of aeroelastic instability of suspension bridges. In the Proc. International Symposium on Suspension Bridges, Lisbon, 273-284.