

Monitoring du pont Champlain

Dominic Lavigne, ing., PMP (Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée)

1. RÉSUMÉ

Dans son programme de suivi structural et maintien du pont Champlain., la Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée a mis en place un programme de monitoring du pont Champlain. Ce programme a été établi suite aux besoins grandissants de tracer un portrait plus précis de l'état et du comportement du pont Champlain,

Ce programme de monitoring, qui a été développé de manière évolutive, permet de suivre le comportement du pont en tout temps, par le biais de certains indicateurs et tests, et permet de réagir à des événements détectés par l'équipement mis en place sur la structure.

2. INTRODUCTION

Les sections 5 (40 travées) et 7 (10 travées) du pont Champlain, construites dans les années 1960, sont composées de travées indépendantes sur appuis simples. D'une longueur moyenne de 53m, chaque travée se compose de sept (7) poutres en béton précontraint qui supportent une dalle intercalaire.

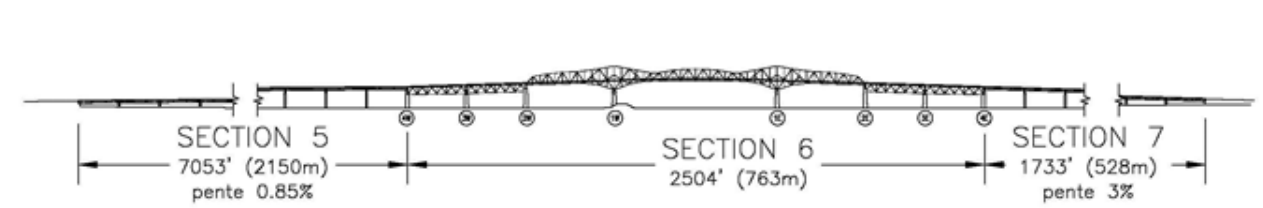


Schéma 1 : Représentation des sections 5, 6 et 7 du pont Champlain

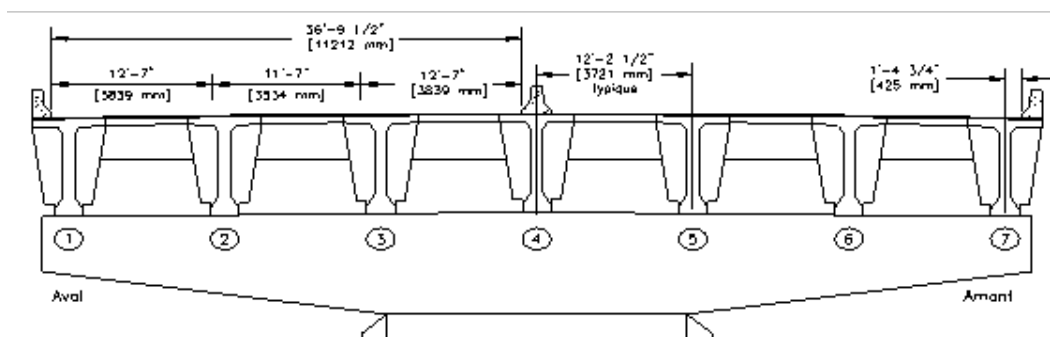


Schéma 2 : Vue en coupe d'une travée en béton précontraint (sections 5 et 7) du pont Champlain

Le programme de monitoring du pont Champlain, dont les premières bases ont été mises en place à la fin de l'année 2012 avec l'octroi du premier contrat d'installation de capteurs sur la section 7 du pont Champlain, a été développé de manière incrémentale au fil des ans.

L'équipement de monitoring installé a tout d'abord été utilisé comme un système d'alarme, avertissant le gestionnaire du pont lorsqu'une valeur seuil prédéterminée était dépassée. Depuis,

son utilisation s'est modifiée afin notamment d'incorporer un volet de mesures, permettant de suivre des indicateurs identifiés par des consultants experts. De plus, des tests périodiques ont été mis en place afin d'identifier des signes précoces de dégradation de la structure.

Ces mêmes équipements offrent également la possibilité de quantifier l'impact des divers systèmes de renforcement mis en place pour prolonger la durée de vie du pont Champlain et le maintenir en service jusqu'à la livraison du nouveau pont Champlain, prévue le 1^{er} décembre 2018.

3. ÉQUIPEMENTS UTILISÉS

Le système de monitoring utilisé pour suivre l'état et le comportement du pont Champlain est composé de plusieurs éléments. Ces éléments se résument en deux catégories : les capteurs et les contrôleurs.

Les capteurs sont les équipements que l'on retrouve en plus grand nombre sur le pont Champlain, pour un total de plus de trois cent (300) installés sur les sections 5 et 7 de celui-ci. Deux types sont principalement utilisés sur le pont :

- Capteurs de déformation (cordes optiques)

Les capteurs de déformation sont les capteurs les plus nombreux sur la structure. Ceux-ci permettent de mesurer la déformation répartie de la structure entre les deux extrémités du capteur. D'une longueur de deux (2) ou cinq (5) mètres et d'une précision de $\pm 2 \mu\text{m}$ en mode dynamique, ceux-ci sont utilisés pour mesurer les élongations des poutres de rive, au centre, dans la zone de flexion et aux extrémités, dans les zones de cisaillement. Fonctionnant sur le principe de la corde optique, ceux-ci ont une vitesse de réponse immédiate et ne subissent pas d'interférence électromagnétique pouvant affecter les mesures.

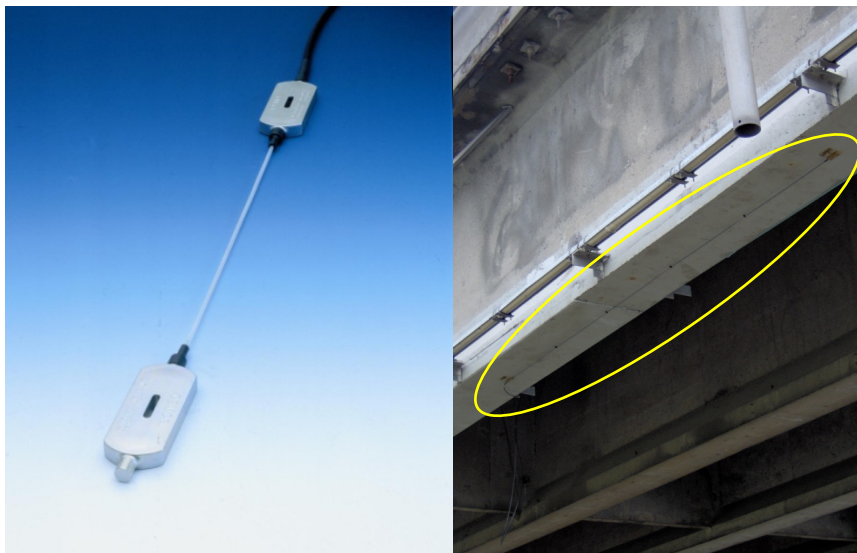


Image 1 : Capteur optique de marque OSMOS utilisé pour le monitoring du pont Champlain

- Sondes de température

Les sondes de température sont utilisées afin de mesurer la température à proximité des capteurs de déformation, permettant ainsi aux experts chargés d'analyser les données recueillies de considérer l'effet de la température ambiante sur les mesures. D'une longueur de cinq (5) à quinze (15) centimètres, ceux-ci ont une précision de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Pour contrôler tous ces capteurs, plusieurs contrôleurs à entrée optique doivent être utilisés. La configuration actuelle du système utilise vingt-et-une (21) stations à la section 5 et cinq (5) stations à la section 7 du pont Champlain. Chaque station comprend au maximum vingt (20) capteurs de déformation et deux (2) sondes de température. Toutes les stations sont également reliées par un réseau de communication par fibre optique étant donné les longues distances entre elles. Finalement, ce réseau de communication permet de consulter et télécharger les données à distance, évitant ainsi des déplacements périodiques pour récupérer les données à même les stations qui sont parfois difficilement accessibles.



Image 2 : Station de monitoring installée sur la glissière du pont Champlain



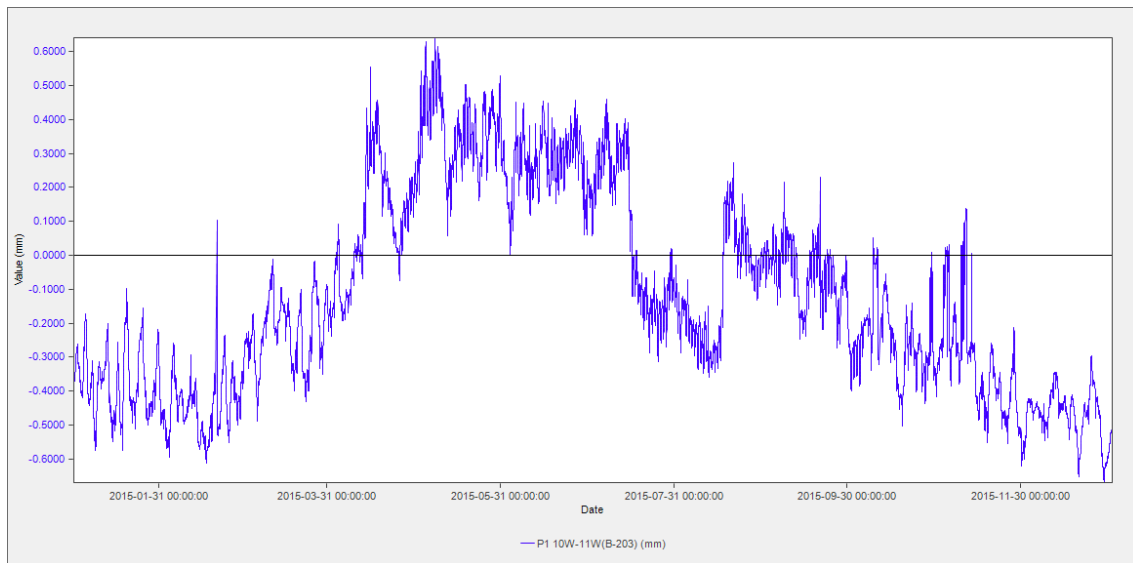
Image 3 : Intérieur d'une station de monitoring du pont Champlain

4. TYPE DE DONNÉES ENREGISTRÉES

Selon la configuration actuelle du système de monitoring, les capteurs prennent des mesures à une fréquence de 50 Hz et enregistrent deux types de données, soient des données « lentes » ou statiques et des données « rapides » ou dynamiques.

Données statiques

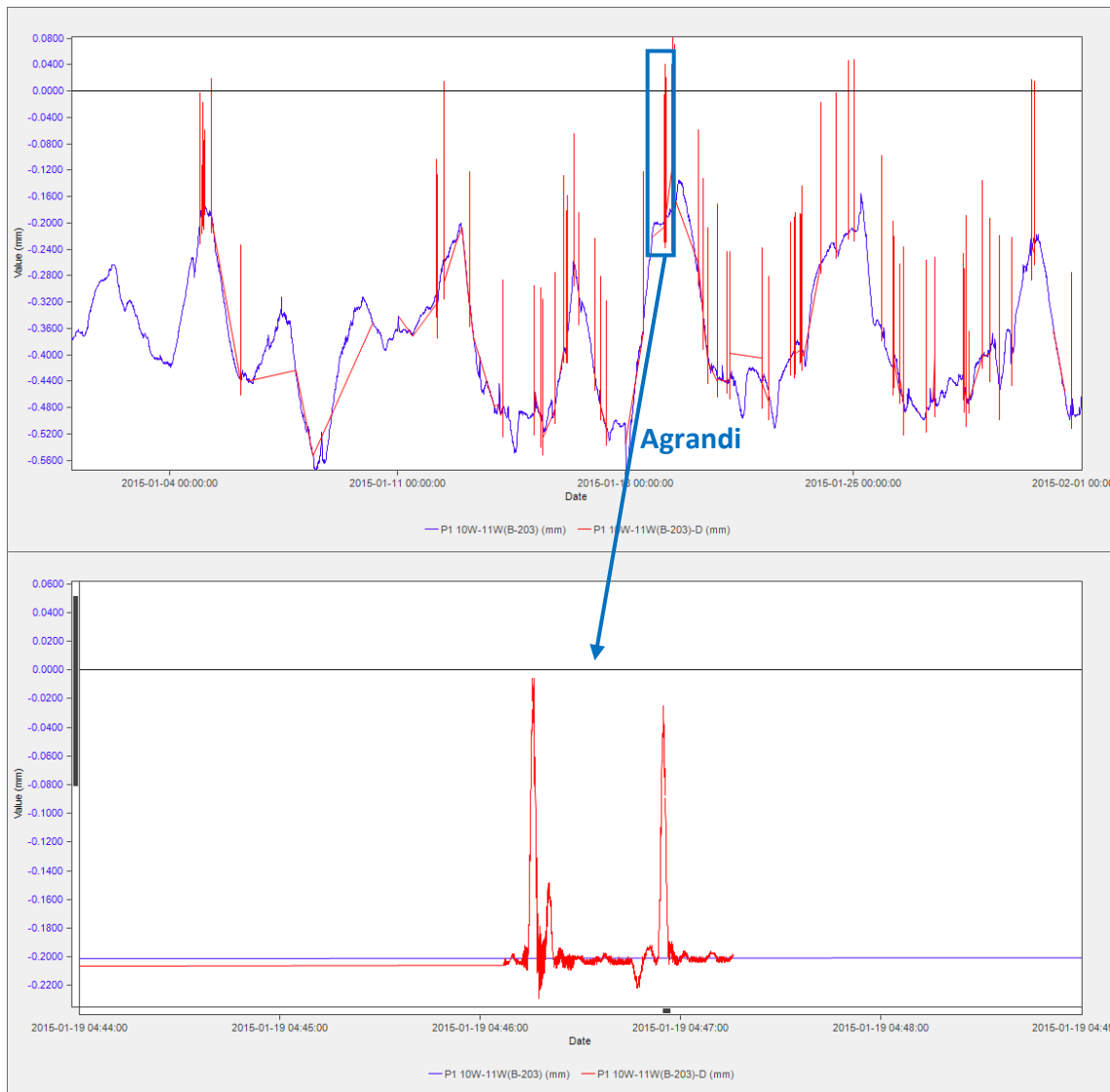
Le système enregistrera toutes les mesures prises sur une période de 10 minutes, en fera la moyenne et conservera cette donnée en mémoire. Ce type de données est généralement utilisé pour suivre le comportement de la structure en réaction à la température ambiante, facteur qui influence le plus ce type de données.



Graphique 1 : Données statiques au cours de l'année 2015 de la poutre P1 10W-11W du pont Champlain

Données dynamiques

En ce qui a trait aux données dynamiques, le système les enregistre sur commande de l'administrateur ou de façon automatique lorsqu'un seuil minimum est atteint. Lorsque le système commence un enregistrement dynamique, il prend de sa mémoire tampon les trois (3) dernières secondes et enregistre les cinquante-sept (57) secondes suivantes pour un total d'une (1) pleine minute d'enregistrement dynamique qu'il conservera en mémoire.



Graphique 2 : Données dynamiques (en rouge) du mois de janvier 2015 de la poutre P1 10W-11W du pont Champlain et agrandi d'un événement

5. INDICATEURS ISSUS DE LA CIRCULATION QUOTIDIENNE

Trois indicateurs, issus de l'analyse des événements dynamiques enregistrés par l'ensemble des équipements de monitoring, sont étudiés actuellement dans le cadre du programme de monitoring du pont Champlain :

- Nombre d'événements

Le nombre d'événements enregistrés est une donnée facile à calculer puisqu'il s'agit de faire le total du nombre d'enregistrements déclenchés par le dépassement du seuil minimal pour chaque capteur sur une période de temps donnée (jour, semaine et mois, selon l'affichage choisi). Ceci permet d'identifier les poutres qui sont généralement plus flexibles que leurs voisines, car celles-ci auront plus de dépassements de seuil pour une période donnée que d'autres. Également, le nombre d'événements permet d'identifier des tendances et des changements reliés à la circulation quotidienne sur le pont.

- Valeurs des déformations mesurées

Au-delà du nombre d'enregistrements par période, il y a les valeurs maximales et minimales qui sont mesurées pour chaque enregistrement. Ces valeurs permettent de calculer les déformations de chacune des poutres causées par la charge vive. Dans le cadre du programme de monitoring, un logiciel procède automatiquement au calcul de la moyenne de tous les maxima des déformations survenues durant une période donnée (jour, semaine et mois, selon l'affichage choisi). L'utilisation de ces données permet d'établir les tendances à long terme dans le comportement des poutres, de cibler celles qui démontrent des signes probables de perte de rigidité, de comparer les données de monitoring aux résultats théoriques, et ainsi agir de façon préventive. Comme les capteurs enregistrent une déformation relative à leur longueur en millimètre, les microdéformations ($\mu\epsilon$) sont utilisées afin de retirer les unités lors des comparaisons. La conversion s'effectue donc selon la formule suivante :

$$\mu\epsilon = \frac{\text{Valeur enregistrée}}{\text{Longueur du capteur}} \times 10^6$$

Exemple de calcul pour une valeur de 0.5mm/5m :

$$\frac{0.5mm}{5000mm} \times 10^6 = 100 \mu\epsilon$$

- Fréquences naturelles des poutres

Puisque des analyses réalisées par des consultants ont révélé que les poutres en bon état ont une fréquence naturelle d'environ 2.5 Hz, la fréquence de chaque poutre est analysée quotidiennement. Cette équation a été automatisée à l'aide d'un logiciel spécialisé qui procède au calcul des fréquences à l'aide d'événements dynamiques enregistrés à 50 Hz. Celles-ci sont calculées à partir de la méthode Welch qui réalise une estimation de la densité spectrale de puissance et aide à atténuer le bruit dans le signal. La fréquence de chaque poutre est un indicateur venant s'ajouter aux critères servant à détecter toute anomalie éventuelle au comportement des poutres dont la portée est d'environ 53m.

6. TESTS DE CHARGE MENSUELS

En plus de l'étude des données recueillies par le biais des événements dus à la circulation quotidienne sur le pont Champlain, un test de charge est également réalisé sur une base mensuelle. Ce test, toujours effectué en milieu de nuit afin de minimiser l'impact du temps requis aux usagers du pont Champlain, consiste à faire circuler un camion lourd (soit de 30T du 2 juin 2014 au 10 janvier 2016, puis de 48T par la suite) à une vitesse de 10 km/h sur la voie la plus proche des poutres de rive, c'est-à-dire la voie de droite du pont. Le système de monitoring, qui est manuellement positionné en mode dynamique pour la durée du test, enregistre donc le comportement des poutres de rive sous l'effet du passage du camion lourd. Les données recueillies par ce test permettent de vérifier l'évolution de l'état des poutres de rive à travers le temps puisqu'il s'agit toujours de la même charge auxquelles elles sont soumises.



Image 4 : Pesée du camion de 30 Tonnes utilisé lors des tests de charge

Puisque les résultats de ce test sont sensibles à toute charge additionnelle ajoutée sur les poutres de rive, la circulation sur le pont doit être contrôlée. À cet effet, trois camions atténuateurs d'impact (un par voie) bloquent la circulation sur le pont, le temps que celui-ci se vide. Puis, lorsque le camion de test commence son parcours, les camions le suivent à quelques travées de distance, rétablissant la circulation sur le pont à 10 km/h. Une fois le pont franchi, le camion fera demi-tour puis la même procédure est exécutée à nouveau en direction inverse.

Le test se conclut par une vérification de l'intégrité des données recueillies afin de pouvoir refaire un passage en cas de problème. La vérification est effectuée par une équipe d'ingénieurs spécialisés.

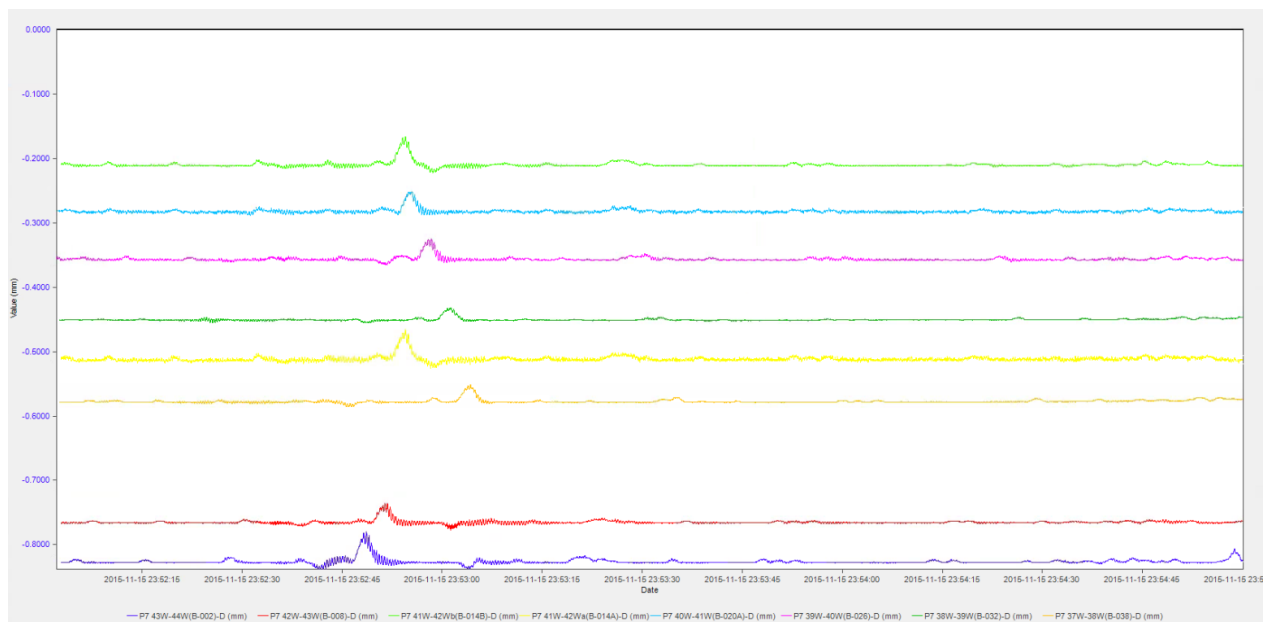


Image 3 : Données enregistrées pour plusieurs capteurs en flexion durant un test de charge du pont Champlain

Une fois les données jugées conformes, le test prend officiellement fin et il ne reste plus qu'à générer le fichier de résultats du test à l'aide du générateur de rapports intégrés au logiciel IntelliBRIDGE. Ce générateur de rapports a été développé spécialement pour PJCCI. Une fois les résultats du test en main, il ne reste plus qu'à les faire valider par les consultants responsables des tests de chargements. Les résultats sont ensuite analysés par des experts mandatés et les analyses sont ensuite présentées au comité d'experts du pont Champlain.

7 ANALYSE DES MESURES ENREGISTRÉES

Compte tenu de la détérioration rapide des poutres de rive du pont Champlain, la Société a mis en place un programme de suivi et de renforcement des poutres de rive qui vise principalement à assurer la pérennité du pont jusqu'à sa mise hors service pour la circulation routière régulière. Divers types de renforcements sont utilisés, mais aussi des mesures d'atténuation d'impact de la circulation de véhicules lourds.

L'analyse des données recueillies par la circulation quotidienne ainsi que lors des tests de charge mensuels, permet d'étudier l'efficacité des mesures mises en place pour le renforcement des poutres de rive du pont Champlain. Ces données permettent également d'étudier l'impact d'un changement de la circulation quotidienne sur le pont Champlain ainsi que des mesures mises en place pour atténuer l'impact des charges lourdes.

Voici les cas spécifiques à la travée 10E-11E de la section 7 du pont Champlain (au-dessus de la route 132) qui sont particulièrement évidents à observer.



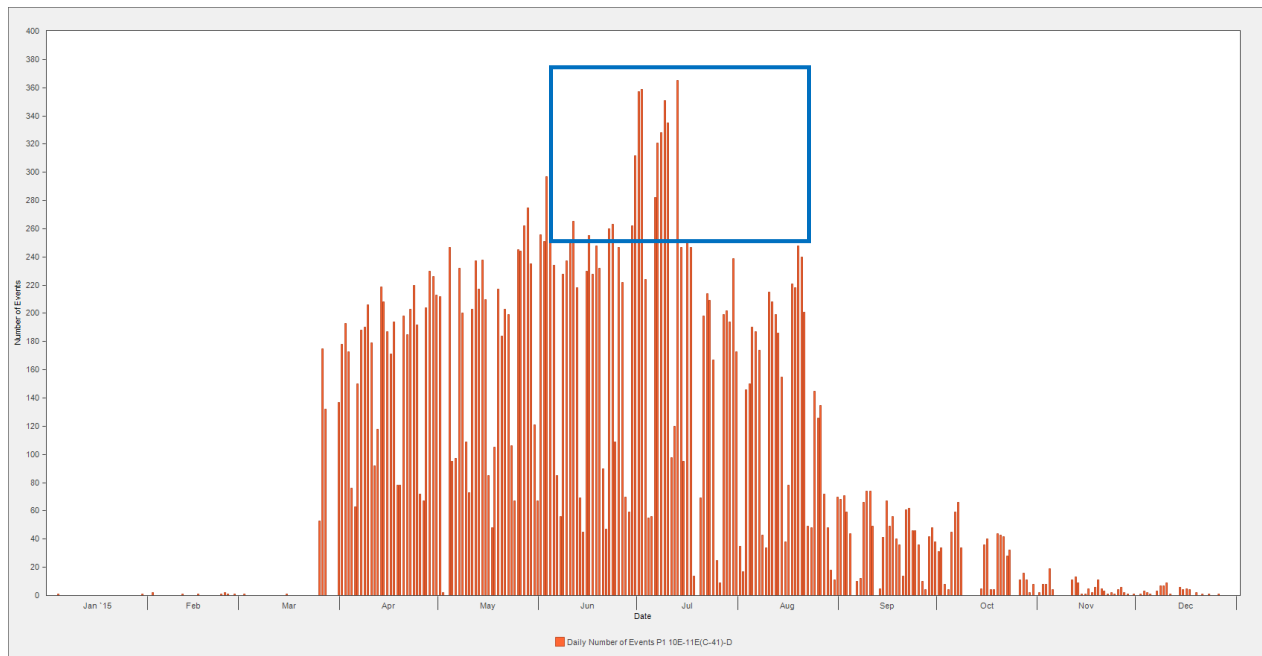
Image 5 : Travée 10E-11E (encadrée en jaune) de la section 7 du pont Champlain



**Image 6 : Travée 10E-11E de la section 7 du pont Champlain qui enjambe la route 132
(source : Google Street View – juin 2015)**

Le premier cas d'intérêt est l'effet du camionnage pour la construction de la jetée du nouveau pont Champlain sur l'ancien pont qui s'est échelonné sur une période d'environ deux mois, soit en juin et en juillet 2015. Le groupe Signature Saint-Laurent (SSL), chargé de la construction du nouveau pont Champlain, a dû construire une jetée afin de commencer ses travaux. Pour ce faire, ils ont eu besoin d'acheminer les matériaux nécessaires par camion, ce qui a représenté une circulation additionnelle d'environ trois cent cinquante (350) camions-bennes d'une capacité d'environ cinquante tonnes chacun. Les camions-bennes pleins provenaient de la Rive-Sud, traversaient le pont Champlain, déversaient leur chargement au site de construction de l'île-des-Sœurs et retournaient dépourvus de leur chargement sur la Rive-Sud de Montréal via le pont Champlain.

Il a d'abord été constaté que la poutre P1 (en direction Montréal) a subi une augmentation significative du nombre d'événements enregistrés par jour. Cette augmentation du nombre d'événements quotidiens pouvait atteindre jusqu'à 140 événements supplémentaires par rapport à la moyenne habituelle pour les poutres.



Graphique 4 : P1 10E-11E, augmentation du nombre d'événements enregistrés quotidiennement en raison du camionnage du groupe SSL

Cette augmentation n'a toutefois pas été notée sur la poutre P7 (direction Rive-Sud) étant donné que les camions repartaient dépourvu de chargement.

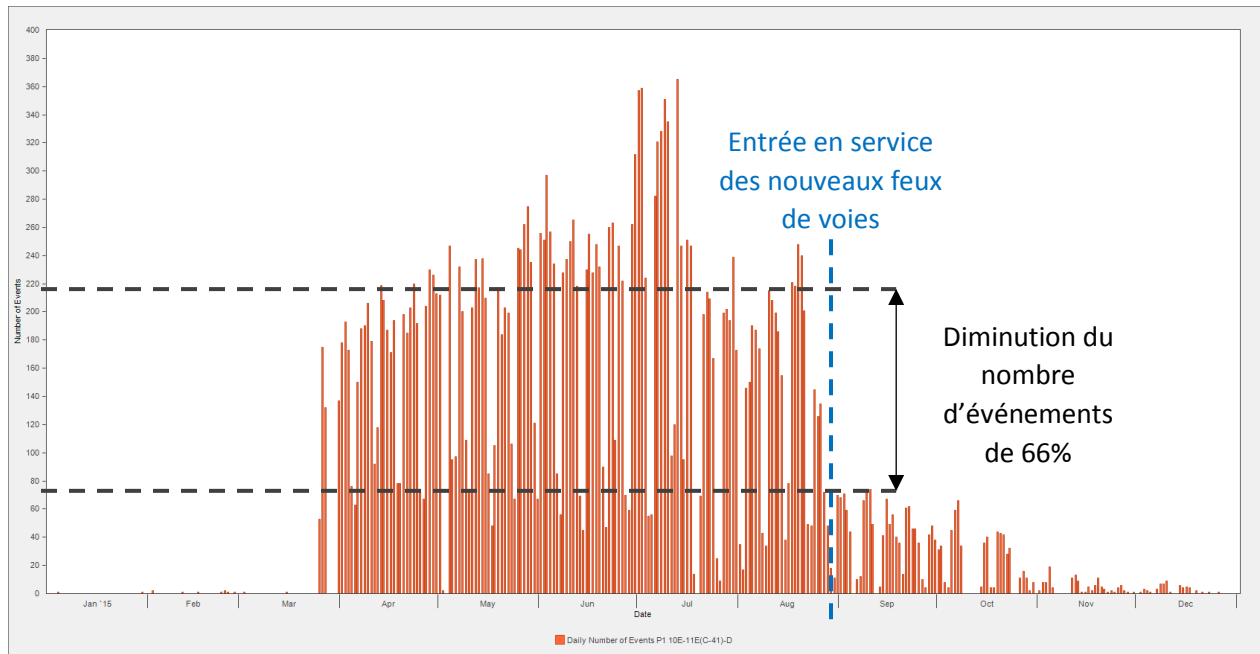
De plus, en regardant les données recueillies quant aux valeurs de déformations enregistrées chaque jour pour la même période, on peut constater que le camionnage a provoqué une augmentation des déformations moyennes d'environ $15 \mu\epsilon$ pour la poutre P1.



Graphique 5 : P1 10E-11E, augmentation des déformations maximales enregistrées quotidiennement en raison du camionnage du groupe SSL

Tout comme pour le nombre d'événements enregistrés, la poutre P7 n'a pas subi d'augmentation de déformations notable durant cette période.

Le deuxième cas d'intérêt est l'impact généré par le changement de voies pour la circulation des camions sur le pont Champlain, les faisant passer de la voie de droite à la voie centrale. Ce changement qui a pris effet le 24 août 2015 et son impact sur les poutres de rive a été immédiat en réduisant le nombre d'événements enregistrés chaque jour d'environ 66% sur la poutre P1.

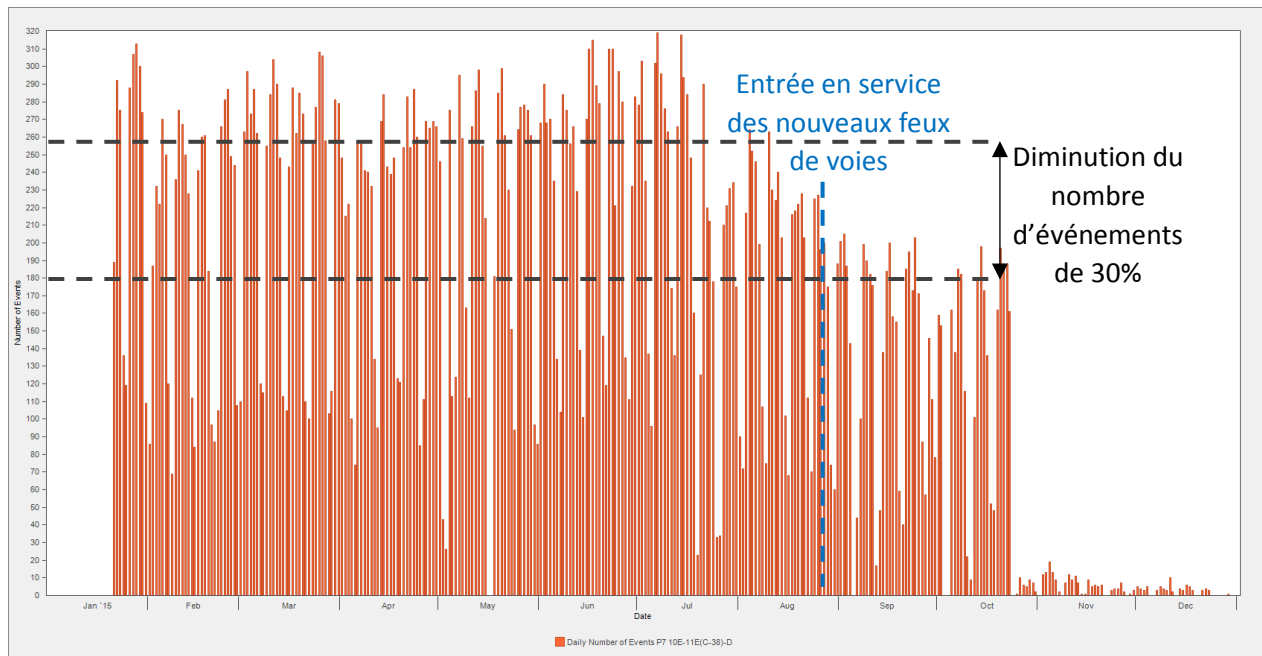


Graphique 6 : P1 10E-11E, diminution du nombre d'événements enregistrés quotidiennement après le changement de voies des camions

Dans le cas de la poutre P7 de cette même travée, la diminution du nombre d'événements a été bien moindre que pour la poutre P1. Il faut noter qu'en raison de la sortie permettant d'emprunter la route 132 à la fin du pont Champlain, la circulation des camions est permise dans deux voies, soient celle du centre et celle de droite.

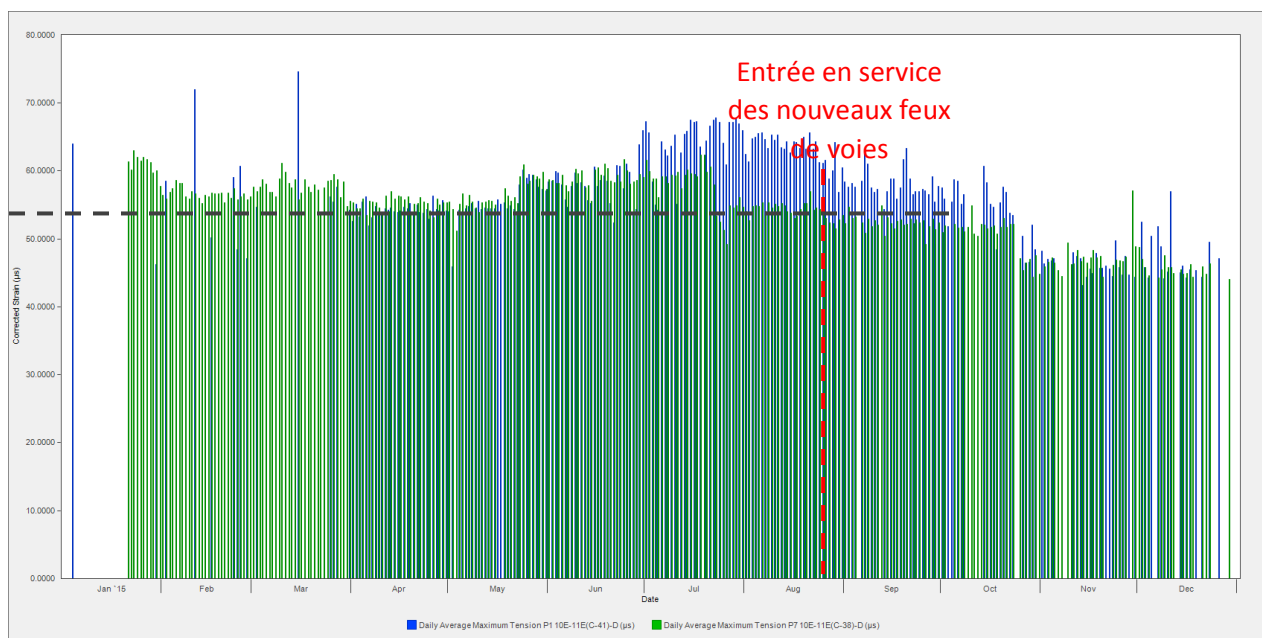


Image 7 : Section 7 du pont Champlain, sortie pour la route 132



Graphique 7 : P7 10E-11E, diminution du nombre d'événements enregistrés quotidiennement après le changement de voies des camions

Cependant, ce changement de voies n'a cependant pas eu d'effet notable sur les déformations enregistrées pour cette travée.



Graphique 8 : P1 et P7 10E-11E, aucun changement sur les déformations enregistrées quotidiennement après le changement de voies des camions

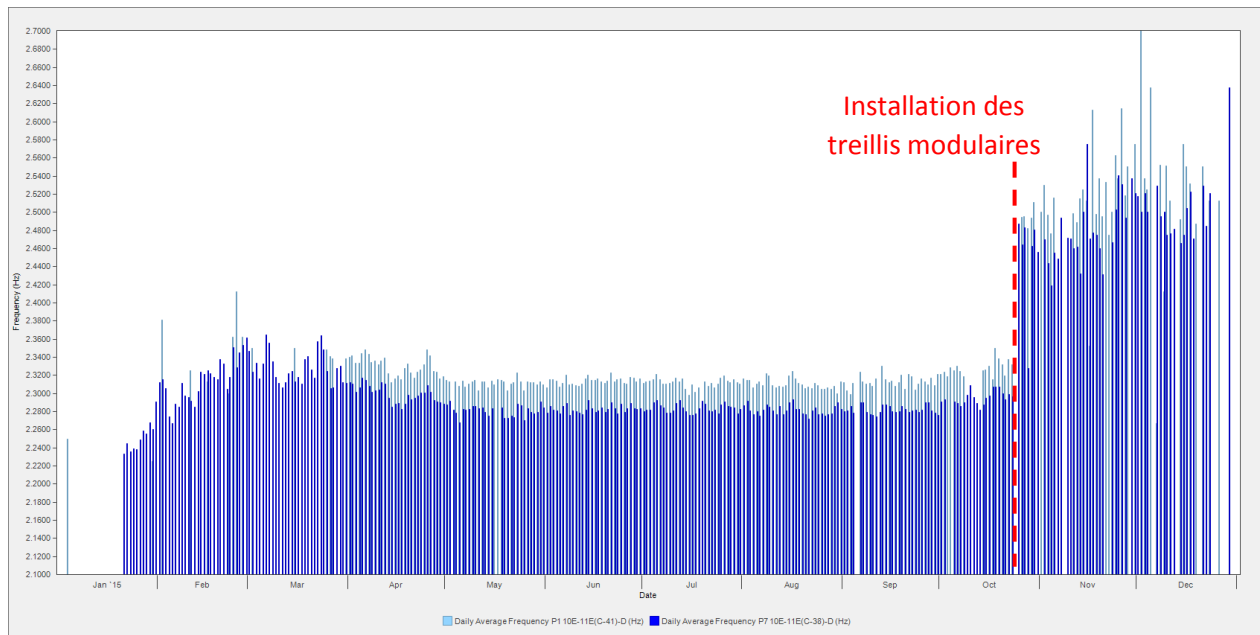
Le dernier cas d'intérêt est l'effet de l'installation d'un treillis modulaire sur les données enregistrées par le système de monitoring du pont Champlain. De tous les moyens de réfection et de renforcements mis en place par PJCCI, l'utilisation de treillis modulaires est de loin le plus efficace. Car suite à l'action composite du treillis avec la poutre grâce à des vérins en tension entre les deux, les charges sont transférées de la poutre précontrainte vers le treillis.



Image 8 : PJCCI a procédé à l'installation de treillis modulaires sur les poutres P1 et P7 de la travée 10E-11E du pont Champlain durant la fin de semaine du 24 et 25 octobre 2015

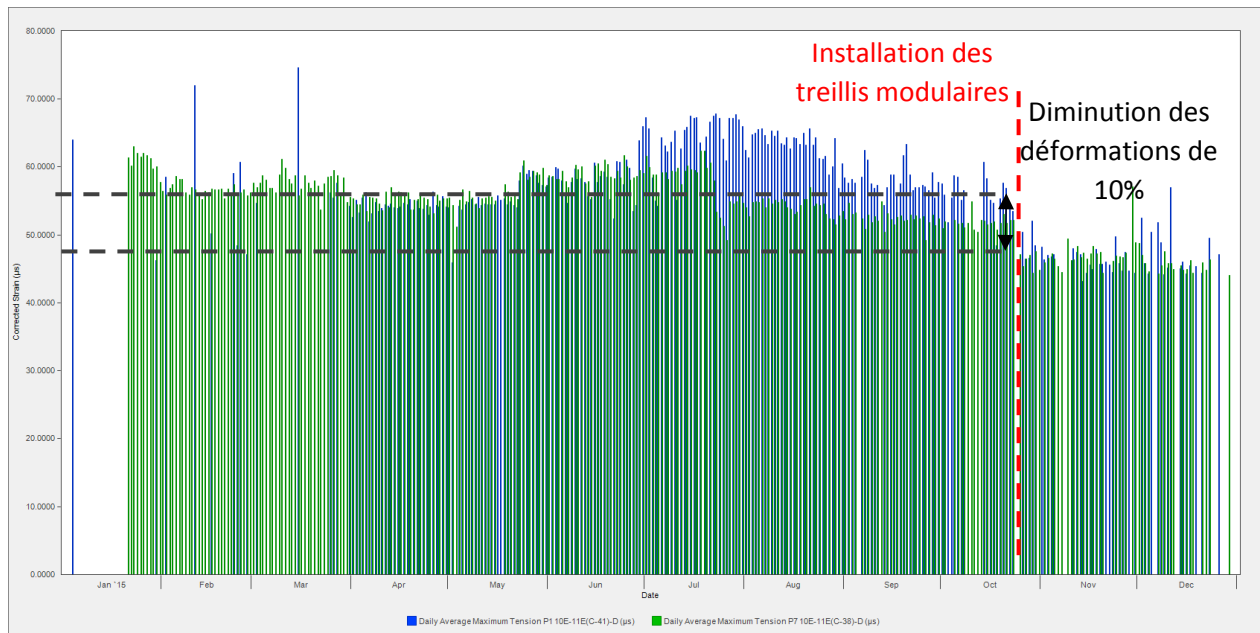
En observant les données enregistrées, on peut rapidement constater l'efficacité du treillis à reprendre les charges de la poutre de rive, car la différence a été mesurable dès le lendemain. En effet, l'installation du treillis a eu un impact positif sur le nombre d'événements, autant sur les déformations enregistrées, sur la fréquence naturelle de la poutre que sur les résultats des tests de charge mensuels. Tous ces indicateurs ont été observés autant sur la poutre P1 que la poutre P7.

À titre d'exemple, on peut constater que la fréquence naturelle des deux poutres, qui oscillait à environ 2.3Hz est passée à une valeur aux alentours de 2.5Hz confirmant l'influence de la rigidité du treillis modulaire.



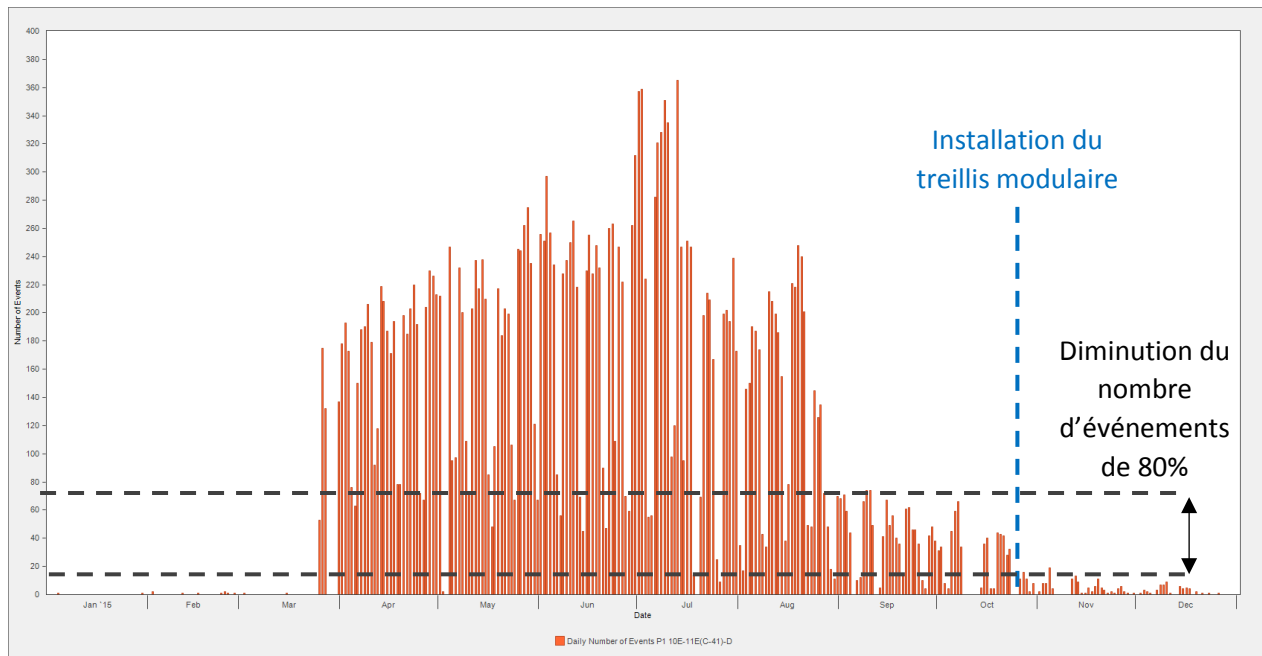
Graphique 9 : P1 et P7 10E-11E, augmentation de la fréquence naturelle des poutres avant et après l'installation d'un treillis modulaire lors du blitz de travaux du 24 et 25 octobre 2015

En regardant les valeurs des déformations enregistrées quotidiennement, on peut également constater une diminution d'environ 10%



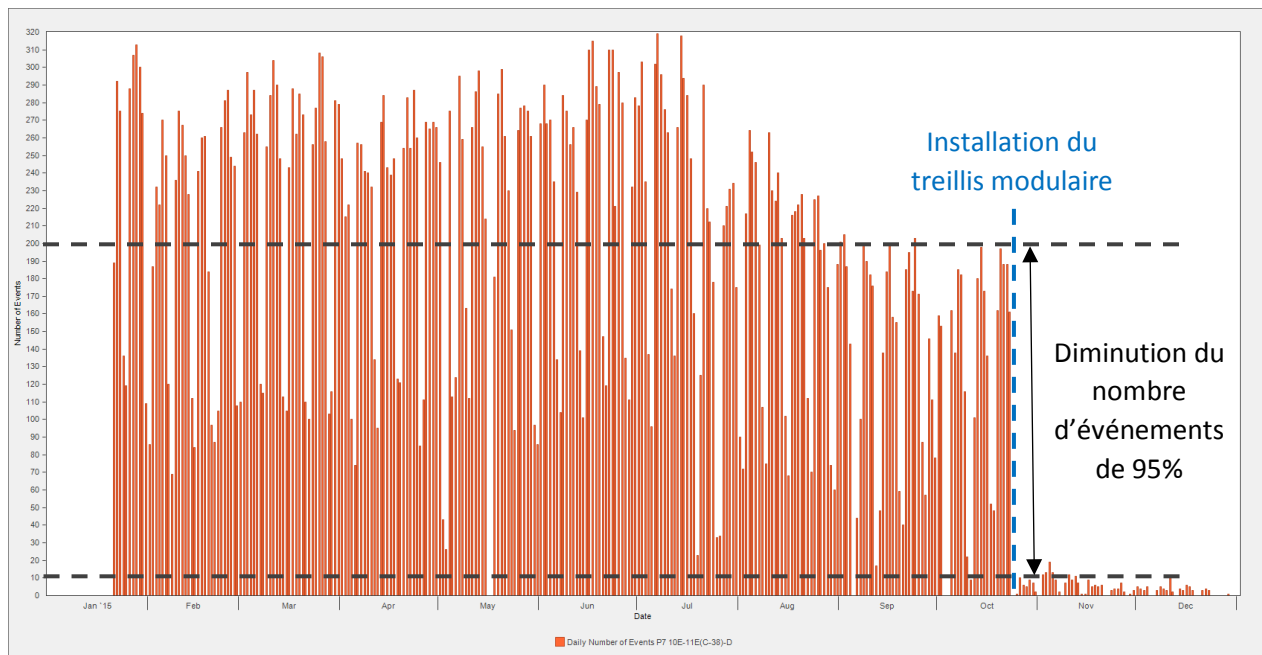
Graphique 10 : P1 et P7 10E-11E, diminution des déformations enregistrées avant et après l'installation d'un treillis modulaire lors du blitz de travaux du 24 et 25 octobre 2015

Par ailleurs, si on regarde le nombre d'événements dynamiques enregistrés quotidiennement, on peut également constater une nette diminution d'environ 80% par rapport au nombre enregistré après le changement de feux de voies. Le tout correspondant à une diminution de près de 90% lorsqu'on combine l'effet du treillis modulaire et du changement de voies pour la circulation des camions lourds sur le pont Champlain.



Graphique 11 : P1 10E-11E, nombre d'enregistrements avant et après l'installation d'un treillis modulaire lors du blitz de travaux du 24 et 25 octobre 2015

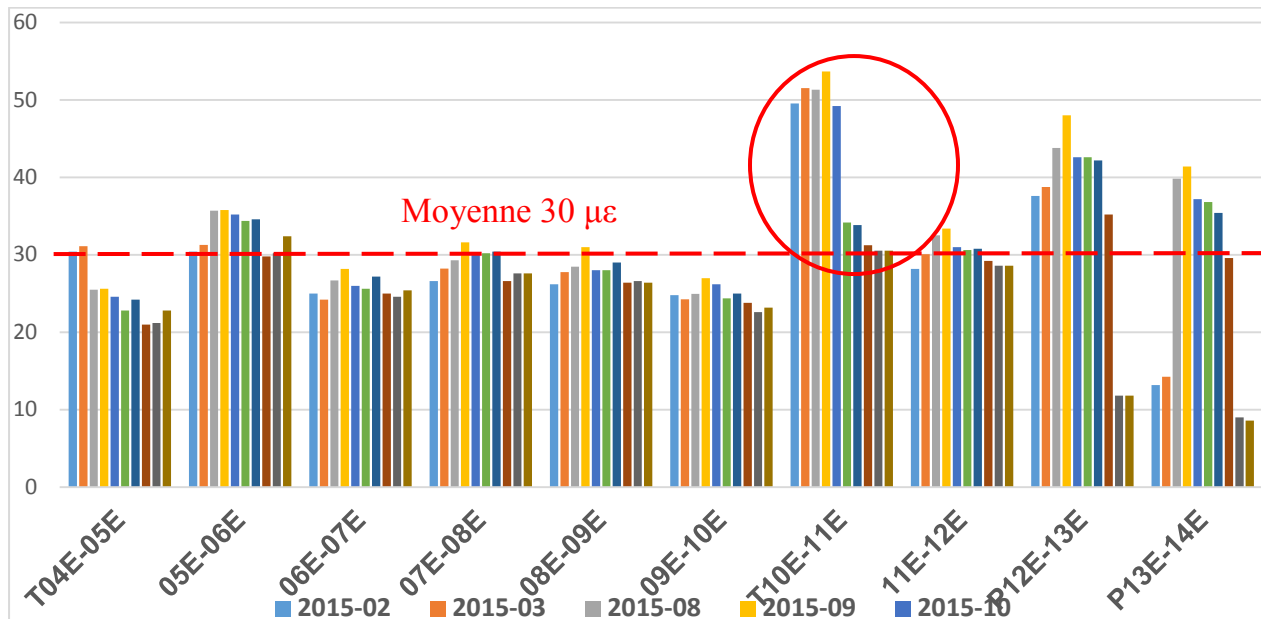
L'effet sur la poutre P7 à la travée 10E-11E est encore plus évident avec une diminution de 95% du nombre d'événements. Comme pour la poutre P1, en combinant l'effet du treillis au changement de voies des camions, on obtient une diminution de 97% du nombre d'événements enregistrés chaque jour.



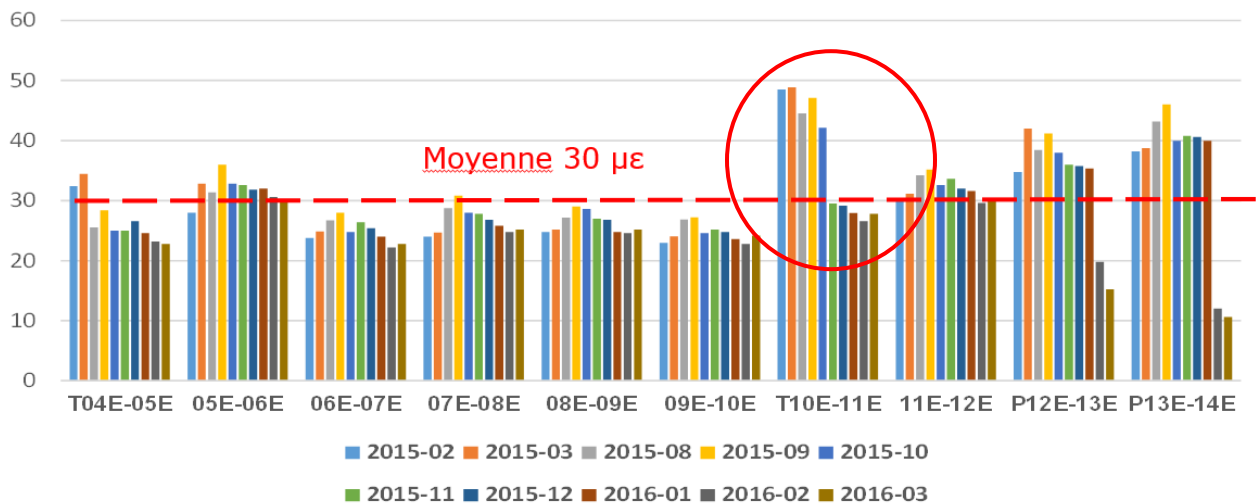
Graphique 12 : P7 10E-11E, nombre d'enregistrements avant et après l'installation d'un treillis modulaire lors du blitz de travaux du 24 et 25 octobre 2015

Finalement, lorsqu'on analyse les résultats des tests de charge effectués mensuellement sur les poutres de rive, on peut constater que l'installation des treillis modulaires est également observable. En effet, les poutres P1 et P7 à la travée 10E-11E sur lesquelles un treillis a été

installé les 24 et 25 octobre 2015 ont enregistré une nette amélioration, soit d'environ 45% lors des tests de charge.



Graphique 13 : Poutres P1 de la section 7, résultats des tests de chargement utilisant le camion de 48 Tonnes



Graphique 14 : Poutres P7 de la section 7, résultats des tests de chargement utilisant le camion de 48 Tonnes

Pour terminer, il est important de noter que l'effet combiné du changement de voies pour la circulation des camions lourds sur le pont Champlain ainsi que l'installation de treillis modulaires sont responsables de la diminution d'enregistrement d'événements dynamiques quotidiennement sur le pont Champlain, ce qui en soi est bénéfique, car les poutres de rive sont moins sollicitées. Cependant, cela occasionne l'inconvénient qu'il y a de moins en moins de données à analyser et que les quelques données dynamiques enregistrées ne parviennent pas à représenter un échantillon fiable. Dans le but d'avoir un minimum de données à analyser, le seuil minimum d'enregistrements dynamiques mis en place sur la totalité du pont Champlain ont dû être ajustés à la baisse, passant de 50 µε à 30 µε en flexion pour les poutres de rive.

8 CONCLUSION

Le programme de monitoring du pont Champlain mis en place par PJCCI, dans sa forme actuelle, permet donc de dresser un portrait assez précis de l'état de la structure et permet à son Propriétaire de réagir aux possibles dégradations et d'ajuster ses priorités de réfection et renforcements en conséquence. Toutefois, une prochaine évolution de ce programme sera nécessaire afin de mettre en place, pour chacune des poutres surveillées par le système de monitoring, une courbe de tendance qui servirait à détecter encore plus tôt, tout changement de comportement des poutres.

Ces courbes de tendance permettraient à son propriétaire de réagir dès les premiers symptômes de dégradation afin de mettre en place des mesures préventives au lieu de procéder à des mesures réactives comme c'est actuellement le cas.

REMERCIEMENTS

L'auteur souhaite remercier MM. René Tinawi et Nikola Dzeletovic pour leurs interactions et commentaires ainsi que les gens du groupe OSMOS Canada et de GlobVision.