

RÉSISTANCE ULTIME D'UNE DALLE ÉPAISSE - ESSAIS IN SITU ET ANALYSES

Bruno Massicotte
Professeur titulaire

Guillaume Cossette
Ingénieur de recherche

Emre Yildiz
Étudiant au doctorat

Groupe de recherche de génie des structures, École Polytechnique de Montréal
Montréal (Québec), H3C 3A7

Jean-François Laflamme
Service de l'entretien

Bernard Pilon
Service de l'entretien

Direction des Structures, Ministère des Transports du Québec
Québec (Québec), G1S 4X9

RÉSUMÉ : Un projet de recherche en cours à l'École Polytechnique vise à déterminer la résistance des dalles pleines des ponts existants. Dans le cadre de ce projet de recherche, des essais in situ ont été réalisés en 2008 afin de mesurer la résistance réelle des dalles épaisses. Lors de ces essais, les dalles d'un pont à deux travées ont été amenées à la rupture à l'aide d'un système de chargement conçu à l'École Polytechnique. Le comportement du pont ainsi testé était suivi au moyen d'instruments de différents types afin de suivre l'évolution des mécanismes de résistance et d'évaluer la technique expérimentale la plus appropriée pour ce type d'essai. En parallèle des analyses non linéaires par éléments finis ont été réalisées afin de prédire le comportement de l'ouvrage. L'article porte principalement sur les techniques expérimentales et analytiques. Les conclusions préliminaires de l'étude qui englobent des essais sur plusieurs ouvrages et des analyses sur des ponts de différentes géométries sont présentées.

INTRODUCTION

À la suite des événements du 30 septembre 2006, le ministère des Transports du Québec (MTQ) s'est doté d'un plan d'action comprenant plusieurs mesures visant à contrer les risques de rupture fragile dans les structures de type dalle épaisse dont il a la responsabilité. Le Ministère a ainsi décidé de procéder à des études poussées visant à mieux comprendre le comportement des ponts à dalle épaisse sans armatures de cisaillement dans le but de mieux évaluer leur capacité portante. Ces études comprennent à la fois des essais de chargement in situ pouvant aller jusqu'à la ruine de l'ouvrage combinées à des analyses non-linéaires par éléments finis.

Les résultats d'un projet de recherche sur la comparaison des méthodes d'évaluation traditionnelles et non-linéaires de certains ouvrages (Massicotte et Yildiz, 2008) ont permis de quantifier la pertinence de l'utilisation des méthodes non-linéaires pour l'évaluation des ponts. Il a en effet été démontré que les analyses linéaires s'avèrent pénalisantes dans le contexte de l'évaluation de la capacité portante du fait qu'elles ne tiennent pas compte de la fissuration progressive du béton qui vient, en toute probabilité et de façon favorable, redistribuer les efforts dans la dalle. Il a donc été décidé de poursuivre l'étude des ponts de type dalle épaisse en réalisant des essais jusqu'à la rupture sur des ouvrages existants prévus pour être remplacés. C'est dans ce contexte que le pont de Irlande a été choisi pour débiter cette étude.

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage considéré dans cette étude permet à la route 165 d'enjamber la rivière Bagot (Figure 1). L'ouvrage, construit en 1939 et de type dalle épaisse, consiste en deux travées simplement supportées s'appuyant sur une pile et deux culées. Le tablier, sans biais d'une largeur aux plans de 10.01 m (32'10"), est constitué de deux dalles épaisses ayant une longueur selon la de 9.906 m (32'6") dont l'épaisseur nominale est 464 mm (18.25"). La portée nette des dalles selon les indications données aux plans est de 9.144 m (30'). Les éléments de fondation consistent en deux culées aux extrémités du pont et d'une pile mur à mi-longueur de l'ouvrage. Ces éléments ne sont pas armés.

Un relevé fait en 2007 a révélé que la largeur du tablier était de 9.906 m (32'6") par rapport à la valeur initiale de 10 m. De plus, les portées nettes mesurées des travées sont égales à 9.10 m et 8.98 m pour les travées Sud et Nord respectivement, légèrement moindre que la valeur 9.14 m indiquée aux plans. Les autres dimensions indiquées aux plans ont été confirmées lors de l'inspection au chantier.

Les armatures du pont, consistant en des barres lisses, sont présentes uniquement dans les dalles et les parapets. Des mesures réalisées après les essais ont permis de déterminer que la limite élastique était de 400 MPa environ, valeur nettement supérieure à la résistance par défaut de 230 MPa indiquée dans le code S6.

Enfin des carottages réalisés en 2007 (Hovington et al, 2007) ont permis de révéler la présence de détérioration interne de la dalle dans la région nord-est de la travée nord.

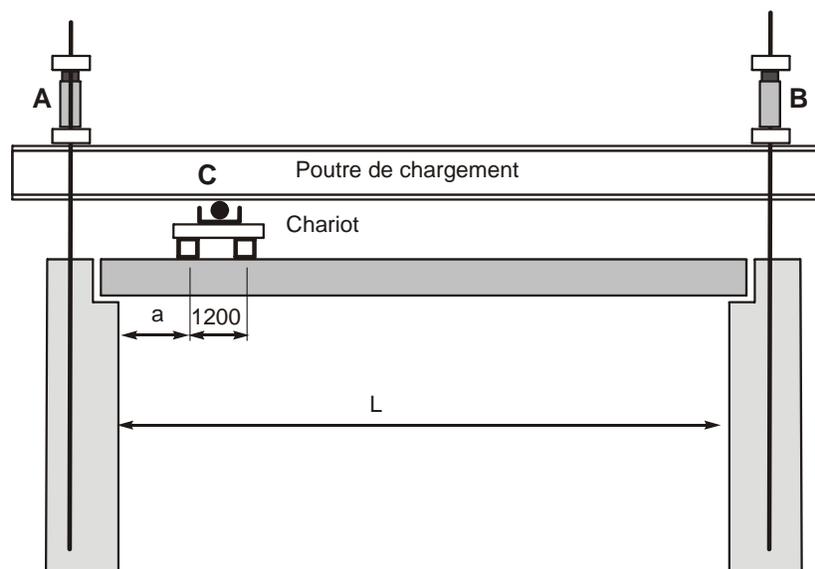


Figure 1 – Vue d'ensemble de l'ouvrage (Face amont)

SYSTÈME DE CHARGEMENT

Afin de procéder à ces essais, le ministère des Transports a confié à l'École Polytechnique de Montréal le mandat de réaliser un projet de recherche portant sur la conception d'un système de chargement adapté aux essais anticipés sur les ponts de type dalle épaisse de courte portée. Un banc de chargement a été conçu (Massicotte et al, 2008) afin d'appliquer des charges sur les ouvrages de la taille du pont considéré dans le présent article.

Le concept du banc d'essai proposé est illustré sur la figure 2. Il s'agit de 4 à 6 poutres d'acier ancrées aux piles et culées au moyen de barres d'ancrage. La charge est appliquée par l'entremise de vérins positionnés aux points A ou B. Les poutres d'acier pourront être espacées d'au plus 1.8 m.



Note: Vérins en A ou en B

Figure 2 – Concept général du banc d'essai

Le banc d'essai possède les caractéristiques suivantes:

- Le banc est conçu pour appliquer une charge totale de 100 tonnes métriques au point C (figure 2) de chacune des poutres.
- Un chariot permet l'application des charges sur le tablier en deux points espacés de 1.2 m ayant une empreinte de 600×250 mm, la dimension longue étant transversale au sens du trafic. Des coussins en néoprène sont utilisés aux points d'application des charges. Le chariot peut être modifié pour n'appliquer la charge qu'en un seul point.
- Le point de contact entre le chariot et la poutre du banc d'essai permet d'accommoder les rotations associées à la déformée du système de chargement et de la dalle.

- Le point d'application de la charge sur le pont (point C) n'est pas à une position fixée à l'avance. La distance a sur la figure 2 peut varier de 0.5 m à environ 1.5 m.
- Les barres ancrées dans les culées doivent développer la capacité maximale des vérins au point A et une capacité moindre au point B. Le transfert des efforts entre les barres et la culée (ou la pile) doit débiter sous le niveau de l'assise du tablier afin d'éviter que la rupture du mur garde-grève. De plus, les barres d'ancrage ne doivent pas contribuer à empêcher les mouvements au joint. La capacité de la culée à développer les ancrages doit être validée à l'aide d'essais témoins in-situ préalablement au chargement du pont.
- Le système d'application de la charge à chacune des extrémités permet le blocage aux points d'application de la charge avec un dispositif dont le principe est illustré sur la figure 3.
- Dans l'éventualité d'une rupture fragile, les éléments du banc d'essais sont reliés entre eux afin de rester accrochés aux poutres de chargement.
- Les vérins sont actionnés par des pompes électriques alors que des capteurs de pression électroniques et des manomètres digitaux sont utilisés pour mesurer la charge appliquée.

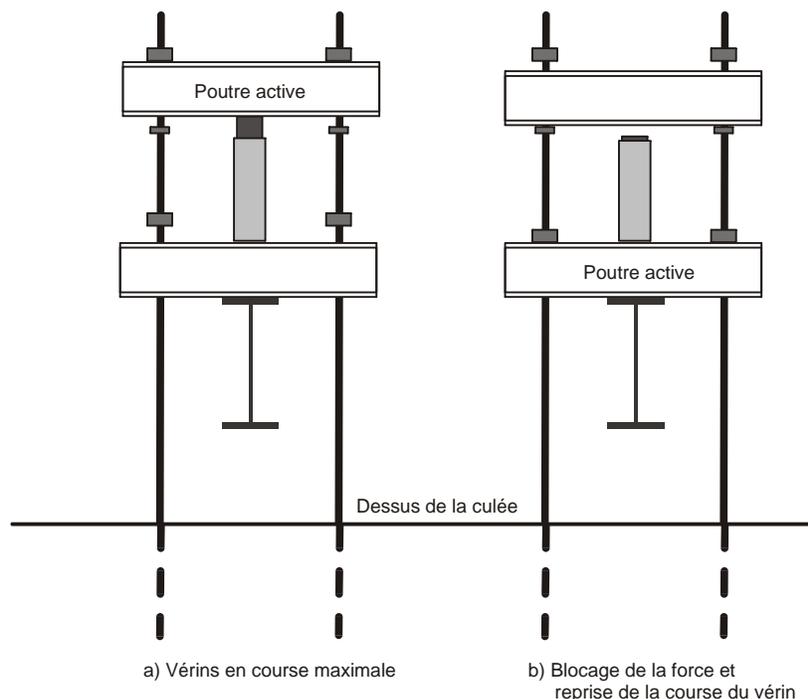


Figure 3 – Principe du système d'application de la charge à une culée

Application des charges

Les poutres 2 et 3, espacées de 1.8 m comme le camion CL-625, servent à appliquer la charge venant d'une voie de circulation alors que les poutres 4 et 5, espacées de 1.8 m, représentent une seconde voie de circulation. Les poutres 1 et 6 servent à appliquer une charge uniforme en combinaison avec les autres charges.

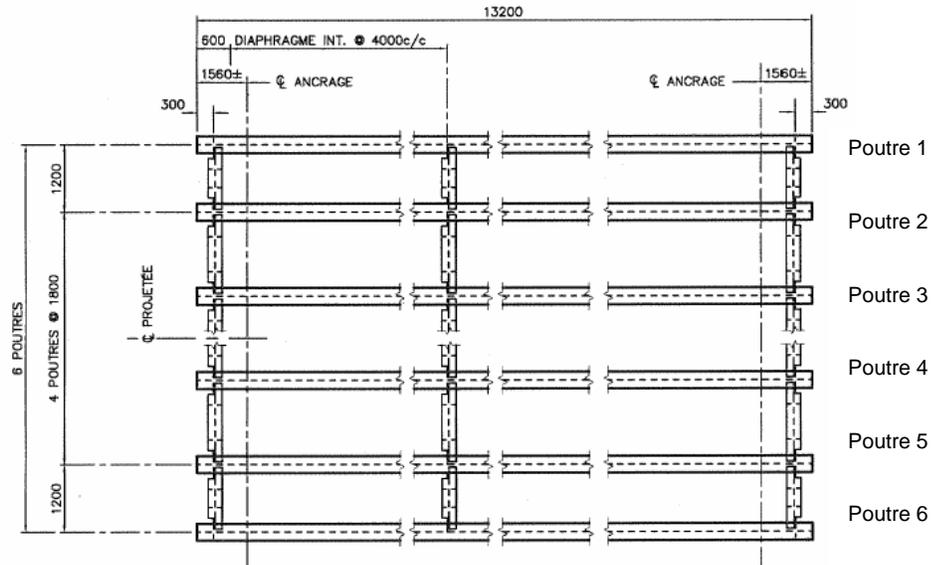


Figure 4 – Poutres du banc de chargement

La configuration du pont est telle que le chargement critique est constitué des essieux 2 et 3 (essieu tandem) du CL-625 situés près de l'appui et de l'essieu 1 situé plus loin en travée. La charge sur un groupe de deux roues d'un même côté du tandem est de 125 kN.

$$P_{essai} = R_L \alpha_L (1 + FAD) P_{CL-625} \quad (1)$$

Pour l'effort tranchant, les paramètres prennent les valeurs suivantes:

- $FAD = 0.30$
- $\alpha_L = 1.70$
- $R_L = 1.0$ ou 0.9 pour une ou deux voies chargées respectivement.

On obtient donc à partir de l'équation 1:

$$P_{essai-1\text{ voie}} = 1.0 \times 1.7 (1 + 0.3) P_{CL-625} = 2.2 P_{CL-625} = 2.2 \times 125 = 275 \text{ kN}$$

$$P_{essai-2\text{ voies}} = 0.9 \times 1.7 (1 + 0.3) P_{CL-625} = 2.0 P_{CL-625} = 2.0 \times 125 = 250 \text{ kN}$$

Ces charges sont celles devant être appliquées sur chacun des chariots (un par poutre du banc d'essai) afin de représenter l'essieu tandem du chargement CL-625, majoré par les coefficients de pondération des charges et le facteur d'amplification dynamique (FAD) approprié.

Advenant le cas où les charges de calcul déterminées précédemment ne conduisent pas à la ruine de l'ouvrage, il est prévu d'utiliser les 6 poutres de chargement simultanément afin d'atteindre la rupture de l'ouvrage. Des conditions extrêmes peuvent être étudiées, pour les appuis et pour les matériaux.

CAPACITÉ THÉORIQUE

L'ouvrage a été analysé par éléments finis en utilisant la même approche qu'utilisée dans une étude précédente (Massicotte et Yildiz, 2008) dans laquelle le logiciel de béton EPM3D (Massicotte et al, 2007) a été utilisé sur ABAQUS. La géométrie détaillée d'une travée a été modélisée avec des éléments solides pour le béton et des éléments noyés pour les armatures comme le montre les figures 5 et 6.

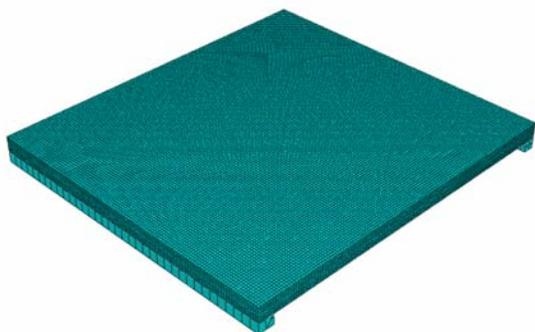


Figure 5 – Modèle d'éléments finis

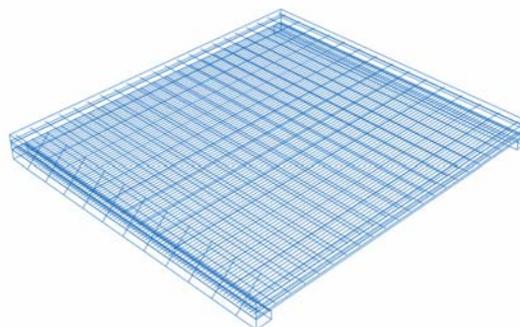


Figure 6 – Modélisation des armatures

Les propriétés du modèle ont été prises pour représenter le plus fidèlement possible la réalité. Deux aspects importants affectent les résultats: la limite élastique de l'acier et les conditions d'appui, notamment le frottement de la dalle sur les culées. L'étude de l'effet de ces paramètres était en cours lors de la rédaction de cet article.

INSTRUMENTATION

L'instrumentation a consisté en trois systèmes distincts: une série d'instruments conventionnels et deux systèmes de mesure sans contact. Des capteurs de pression ont été utilisés pour mesurer la pression dans les vérins servant à appliquer les charges.

Instrumentation traditionnelle

Pour chacune des deux travées, l'instrumentation traditionnelle comportait des 14 jauges de déformation sur les armatures (figure 7), 5 potentiomètres pour mesurer les flèches sous la dalle (figure 8) ainsi que 13 LVDT installés sur les côtés de la dalle pour mesurer les déformations puis les fissures de cisaillement (figure 9). Afin de ne pas endommager les potentiomètres utilisés pour la mesure des flèches, ceux-ci ont été localisés à l'extérieur de l'empreinte du pont et reliés à la dalle par des fils métalliques coulissant sur des poulies.

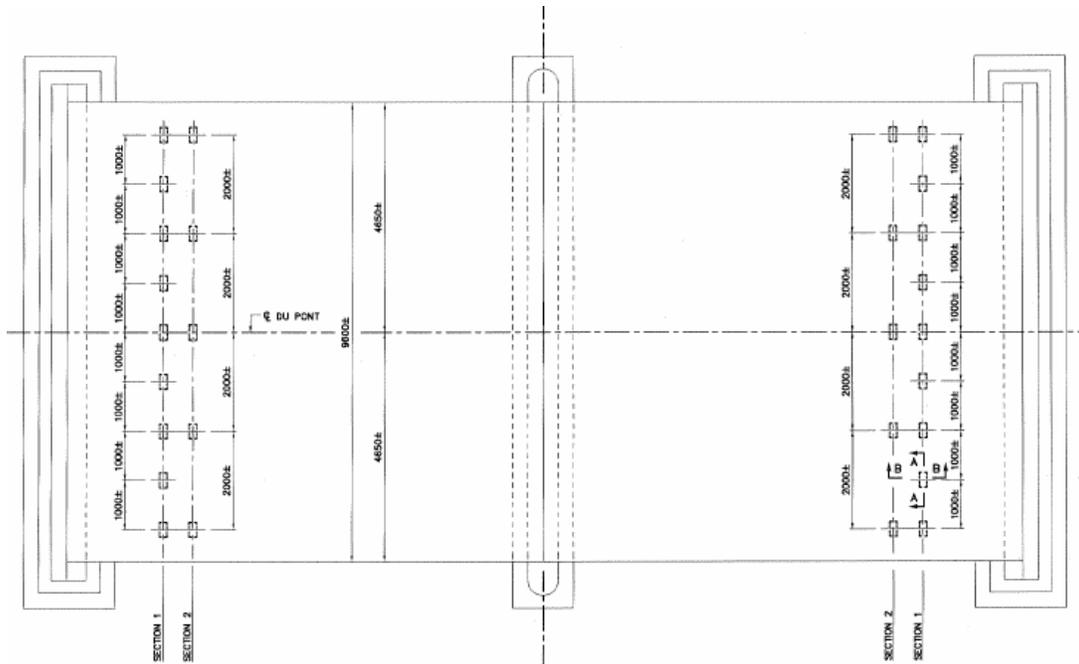


Figure 7 – Jauges de déformation électriques sur les armatures de flexion

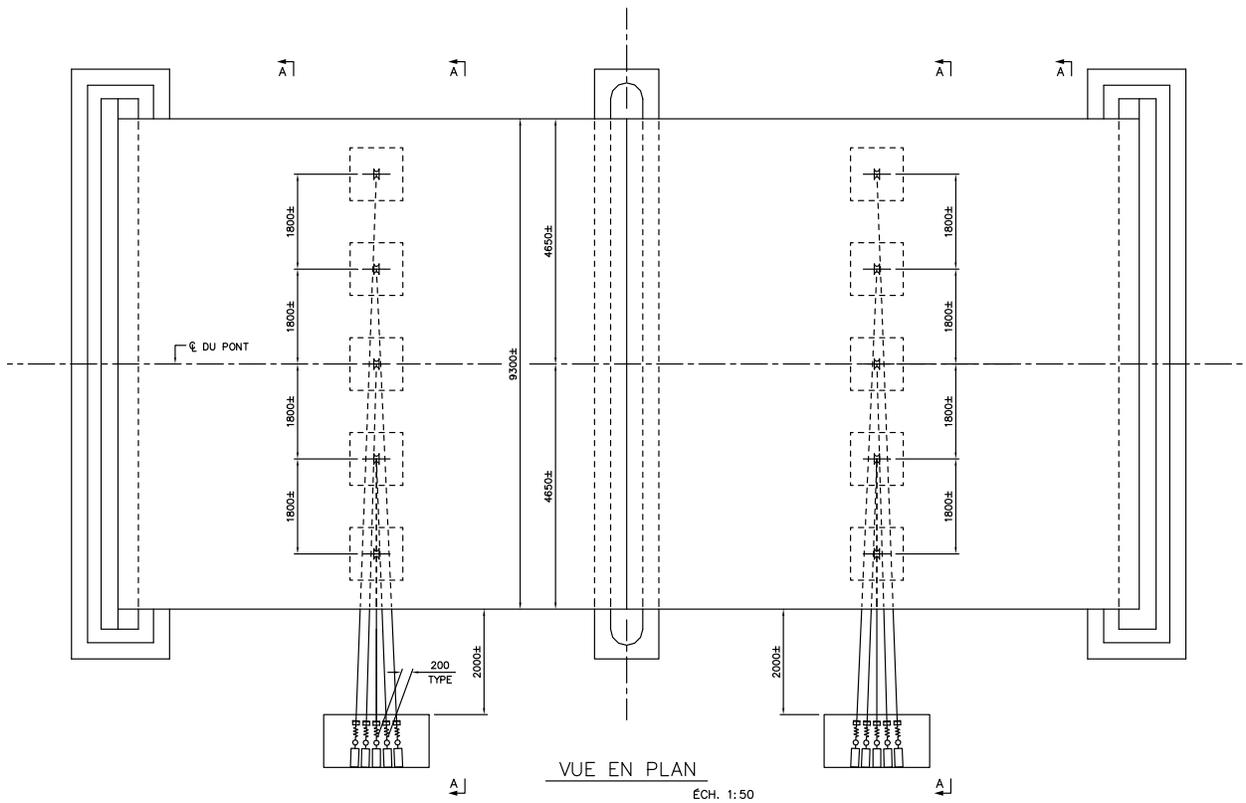


Figure 8 – Potentiomètres pour la mesure des flèches

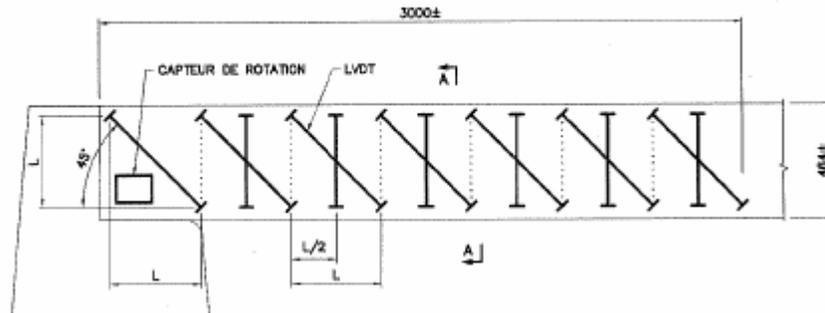


Figure 9 – LVDT pour la mesure des déformations de cisaillement sur les faces latérales

Mesures sans contact

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation de mesures in situ sans contacts, deux systèmes distincts ont été utilisés.

Un premier système d'arpentage de haute précision à balayage infrarouge (station totale montrée sur la figure 10) a été utilisé afin de mesurer les flèches sous la dalle. L'instrument était situé à environ 5 m sur le côté du pont. Cet instrument effectue un balayage fin d'une zone déterminée et permet ultérieurement d'en tracer la forme. La comparaison entre deux séries de mesures permet de déduire les déplacements relatifs. Ce type de mesure pourrait permettre, par exemple, de réduire voire éliminer, l'utilisation de potentiomètres pour mesurer les flèches. La précision est au mieux de l'ordre du millimètre. Des mesures ont été prises à intervalles réguliers lors des différentes étapes de chargement.



Figure 10 – Système d'arpentage de haute précision à balayage infrarouge



Figure 11 – Caméra de déformations

Un second système d'instrumentation sans contact a été utilisé pour mesurer les déformations sur la face latérale de la dalle opposée à celle où les LVDT étaient installés. Ce système consiste en deux caméras (figure 11) de haute précision mesurant en continu le déplacement des points d'une surface initialement peinte de sorte à former un canevas irrégulier reconnu par le système. Ce type de système pourrait éventuellement remplacer les jauges de déformations.

Dans les deux cas la puissance de ces techniques de mesure réside principalement dans la capacité des logiciels d'accompagnement à traiter les mesures faites. L'utilisation de ces systèmes en parallèle aux systèmes conventionnels permet d'en évaluer le potentiel, tant au niveau de la facilité ou difficulté d'utilisation que de la précision des mesures.

RÉALISATION DES ESSAIS

Deux essais ont eu lieu en 2008, le 29 septembre pour la travée nord et le 3 octobre pour la travée sud. Dans les deux cas, deux poutres (2 et 3) ont d'abord été chargées chacune jusqu'à 300 kN puis les poutres 2 à 5 ont été chargées également à 300 kN chacune. Tel que décrit précédemment, ces deux conditions représentent respectivement plus du double d'une et deux voies chargées. Aucune trace ou signe de défaillance ou déformations excessives n'ont été remarqués lors de ces étapes de chargement. Il a donc été convenu de charger les six poutres simultanément jusqu'à la rupture.

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES DES ESSAIS À L'ULTIME

Les figures 12 et 13 présentent la mesure de la flèche en fonction des charges appliquées dans chacun des vérins. Dans le cas de la travée nord, une rupture en cisaillement s'est produite à une charge de 426 tonnes dans la région où des défauts avaient été relevés suite au carottage. Cette rupture, qui n'a été que locale, s'est caractérisée par l'ouverture de larges fissures sur la face nord-est de la dalle. Pour les deux travées, des ruptures ductiles en flexion ont caractérisé le comportement des dalles.

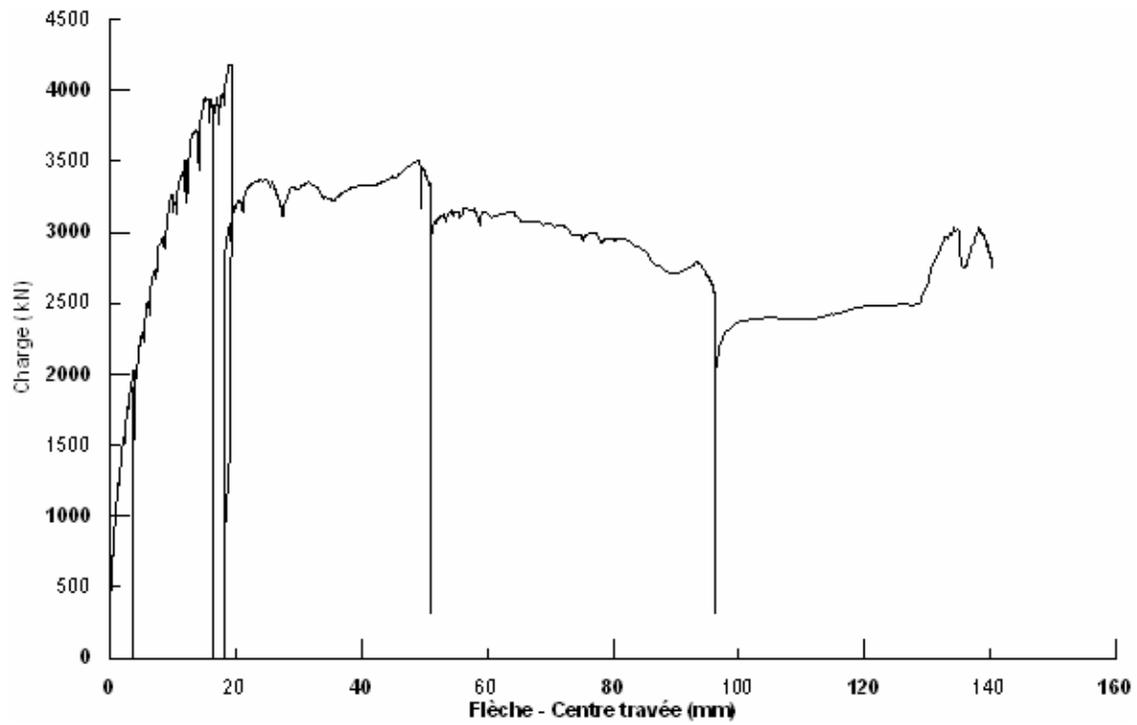


Figure 12 – Comportement de la travée nord

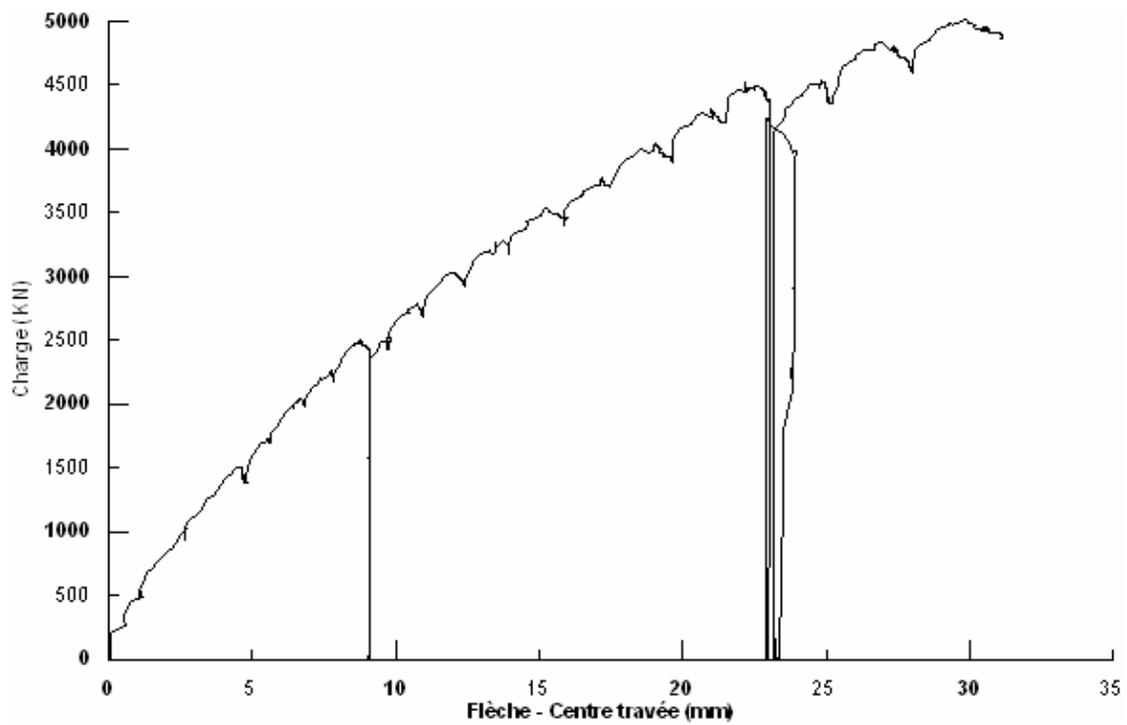


Figure 13 – Comportement de la travée sud

CONCLUSIONS

Le chargement à l'ultime des deux travées du pont de Irlande a permis d'illustrer que, lorsque certaines conditions sont réunies, la capacité des ponts de type dalle pleine peut être nettement supérieure à celle obtenue par calcul avec des hypothèses davantage propres à la conception. Les essais et la analyses en cours mettent en évidence de l'utilisation d'outils adaptés permet de mieux comprendre le comportement des ouvrages et pourrait permettre, lorsque les conditions se présentent, de garder en service des ouvrages qui, autrement, devraient être remplacés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner le travail et l'excellente collaboration de MM. Serge Létouneau et Erik Pépin de Génivar, Jimmy Fortier de Construction BSL, Jacques Boulay de la direction des structures du ministère des transports du Québec et Gilles Dussault de la direction territoriale de Chaudière-Appalaches du ministère des transports du Québec à ce projet.

RÉFÉRENCES

- ABAQUS, 2007. "Analysis User's Manual Version 6.6", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. USA.
- CSA 2006. "Code Canadien sur le calcul des ponts routiers – CAN/CSA-S6-06". Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario.
- DIRECTION DES STRUCTURES. 2007. "Rapport photo P-04662". Direction des structures, Ministère des Transports, 8p.
- HOVINGTON, A., CLAVEAU, A., RENAUD, M., LAMONTAGNE, S. ET LECLERC, G. 2007. "Caractérisation du béton utilisé dans une structure à dalle épaisse (structure # 04662)", Secteur béton de ciment/Métallurgie, Laboratoire des chaussées, Ministère des Transports, 23p.
- MASSICOTTE, B., NOUR, A., BENFTIMA, M. ET YILDIZ, E. 2007. "EPM3D – A user-supplied constitutive model for the nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures", Rapport SR07-10, École Polytechnique de Montréal.
- MASSICOTTE, B. ET YILDIZ, E. 2008. "Étude comparative des méthodes d'évaluation traditionnelles et non-linéaires pour les ponts à dalle épaisse", Rapport SR08-01, Groupe de recherche en génie des structures, École Polytechnique de Montréal.
- MASSICOTTE, B., CHAREST, N. ET YILDIZ, E. 2008. "Développement d'un banc d'essai dans le cadre des essais de chargement sur les dalles épaisses sans armature de cisaillement", Rapport SR08-02, Groupe de recherche en génie des structures, École Polytechnique de Montréal.