

Méthodes expérimentales et évaluation des structures



Marc Savard, Ph.D., ing.
Ministère des Transports
du Québec
Constantin Halchini, ing.
Ministère des Transports
du Québec

Le Québec compte plus de 3 000 ponts qui ont été construits il y a plus de 40 ans. Dimensionnés selon les normes en vigueur à cette époque, ces ponts doivent être soigneusement évalués de manière à s'assurer qu'ils répondent aux exigences d'aujourd'hui. Remplacer ou renforcer tous les anciens ponts jugés déficients constitue un effort financier qui dépasse de beaucoup les possibilités budgétaires de la province.

Conçu par les spécialistes du ministère des Transports du Québec et réalisé sous leur directe supervision, le laboratoire mobile d'analyse expérimentale des contraintes permet, depuis 1989, l'acquisition d'informations de premier plan pour la mise en valeur de la réserve de capacité réelle des structures.

Les mesures *in situ* effectuées avec des jauges de déformation reflètent le comportement réel de la structure en quelques endroits localisés. Des accéléromètres bien positionnés sur le pont permettent d'évaluer les propriétés dynamiques de la structure instrumentée. En plus d'être considéré pour l'évaluation de la structure, l'ensemble de ces résultats peut servir à calibrer un modèle mathématique raffiné, capable de simuler avec précision le comportement de la structure, en plus de fournir des estimations assez justes de paramètres difficiles, voire même impossibles à mesurer. La combinaison de ces approches numérique et expérimentale s'est avérée très performante pour l'évaluation de ponts dont les méthodes de calcul conventionnelles révélaient, à tort, des incapacités structurales majeures.

(suite à la page 3)

SOMMAIRE

- 2 Introduction
- 3 Mesures expérimentales
- 7 Interprétation des mesures dans le contexte de l'évaluation structurale
- 10 Conclusions
- 11 Références

Ce bulletin est produit par le Service de la documentation et de l'information scientifique, Direction de la coordination de la recherche et de l'information en transport, Ministère des Transports du Québec
700, boul. René-Lévesque Est, 21^e étage
Québec (Québec) G1R 5H1
Tél. : (418) 643-6039
Fax : (418) 646-2343

Recherche et coordination :

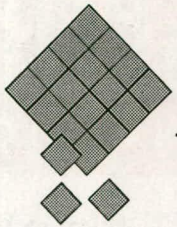
Richard Pagé

Conception et édition électronique :

Carole Robitaille

Dépôt légal -
Bibliothèque nationale
du Québec, 1995
ISSN 1198-1113

CANQ
TR
248
V.17



Introduction

La tendance vers une utilisation de véhicules plus lourds et plus rapides oblige l'ingénieur à porter une attention particulière au niveau réel des sollicitations dont font l'objet les structures existantes. Les ponts d'aujourd'hui sont sollicités par des véhicules de plus en plus lourds et de plus en plus nombreux, augmentant significativement le nombre et l'amplitude des cycles d'oscillations et donc des contraintes occasionnées. Il en résulte des sollicitations dynamiques augmentées, provoquant l'inconfort des usagers, la fatigue accélérée des pièces et éventuellement, une mise hors service prématurée de l'ouvrage.

La principale cause de la détérioration des ponts actuels est donc l'écart sans cesse grandissant entre les charges de dimensionnement retenues au moment de la conception de ces ponts et les charges réelles actuelles. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) estime que plus de 3 500 ponts ont été conçus pour supporter des charges inférieures à celles qu'on retrouve actuellement sur les routes. D'autres facteurs contribuent à la détérioration des structures existantes, comme le gel, la pluie, le vent, les tassements différentiels des appuis, les séismes, ainsi que des éléments extérieurs agressifs tels les sels de déglacage et la pollution. L'ensemble de ces sollicitations occasionne la corrosion de l'acier, la fissuration et la détérioration du béton et des appareils d'appui. De plus, des vices de construction et un entretien inadéquat contribuent à accélérer la dégradation structurale.

Parmi les quelques 8 500 ponts que compte le Québec, près de la moitié ont été construits il y a plus de 40 ans. Dimensionnés selon les normes en vigueur à cette époque, ces ponts se sont dégradés et doivent être soigneusement évalués de manière à s'assurer qu'ils répondent aux exigences d'aujourd'hui.

Lors d'une évaluation systématique de ces ponts suivant les recommandations de la norme canadienne CAN/CSA-S6-88, le Ministère a estimé que d'ici l'an 2 000, plus de 1 250 ponts devront être renforcés ou remplacés, au coût estimé de 300 millions de dollars. Cependant, le chapitre de la norme portant sur l'évaluation des structures présente une méthode de calcul simple, fondée sur des hypothèses simplificatrices souvent inadéquates parce que trop sécuritaires. Par souci de simplicité de l'analyse, cette méthode de calcul néglige certains phénomènes qui contribuent à augmenter significativement la résistance de la structure.

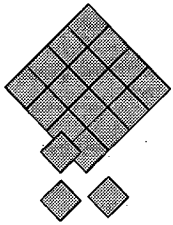
Pour répondre aux besoins de renforcement et réduire les coûts de réhabilitation, il apparaît donc nécessaire de développer un outil d'évaluation fiable permettant d'estimer le niveau réel des sollicitations et aider ainsi à une gestion judicieuse des interventions sur les structures existantes.

D'autre part, les méthodes de calcul utilisées dans la norme font abstraction de la nature dynamique des sollicitations et du comportement du pont. Dans le but de conserver

l'aspect statique et de simplifier l'analyse, on recommande l'utilisation d'un coefficient de majoration dynamique et quelques critères appropriés. En réalité, les véhicules se rapprochent davantage d'un train de charges mobiles d'intensité variable et le pont possède des caractéristiques vibratoires propres lui conférant une susceptibilité aux effets du trafic routier. La détermination d'un coefficient de majoration dynamique approprié pour une structure donnée n'est pas chose facile. On retrouve dans la littérature les résultats de nombreuses études expérimentales et numériques (Paultre *et al*, 1991; Savard, 1993; Talbot *et al*, 1992; Cantieni, 1983; Billing, 1984). Plusieurs centaines de ponts ont été testés à travers le monde et les résultats de ces tests sont à la base des réglementations de plusieurs pays. Cependant, aucun consensus international ne se dégage quant à l'approche à retenir pour quantifier les effets du trafic routier.

Dans ce contexte, il apparaît essentiel d'estimer la susceptibilité réelle de la structure étudiée aux effets dynamiques, afin de valider l'approche statique du problème, tel que souhaité dans les spécifications actuelles, et bénéficier de l'information nécessaire pour une évaluation juste et raisonnable de cette structure. ♦

Doc. 4-11 - 1100
CANIQ
TR
248
1.17



Mesures expérimentales

Pour l'étude du comportement et la mise en valeur de la réserve de capacité réelle des structures, le MTQ a choisi d'effectuer des essais de chargement sur certaines structures à évaluer. Pour ce faire, un laboratoire mobile d'auscultation des structures qui permet l'acquisition d'informations représentatives de l'état actuel de la structure a été conçu par les spécialistes du Ministère des Transports et réalisé sous leur directe supervision. Les mesures *in situ* effectuées avec des jauges de déformation, des accéléromètres et des capteurs de déplacement sous des charges connues, permettent l'estimation de propriétés structurales déterminantes. Afin de répondre adéquatement aux objectifs visés par ces tests, le choix, le nombre, la position et le type de capteurs et des charges d'essai sont des considérations que seul un personnel qualifié peut apprécier.

Deux types d'essais sont généralement réalisés pour répondre aux besoins de l'évaluation d'une structure existante, soit des tests en régime statique et en régime dynamique.

Les essais statiques sont effectués en immobilisant sur la chaussée du pont des véhicules routiers, dont la distribution de la charge sur les essieux et les dimensions sont établies avec précision au préalable. Successivement, les véhicules sont déplacés afin d'occuper différentes positions suivant un cheminement préétabli. Pour chacune des positions d'arrêt, le signal de chacun des capteurs installés sur la structure est lu et les données sont enregistrées sur un support informatique en corrélation avec la position de la charge qui l'a généré.

Parmi les capteurs utilisés le plus souvent, la jauge électrique est employée pour mesurer les déformations subies par une membrure sollicitée par un système de forces extérieures. Elle transforme une grandeur mécanique difficilement mesurable, la déformation, en signal électrique qui peut être facilement amplifié, filtré et enregistré selon les besoins. L'allongement occasionné par les sollicitations se traduit par une variation de résistance électrique de la jauge. Connaissant les caractéristiques de celle-ci, on peut exprimer cette variation de résistance en déformation. Ces jauges peuvent être collées ou soudées à la pièce instrumentée et peuvent être installées sur tous les matériaux utilisés pour la construction des ponts. Cependant, le cas du béton doit faire l'objet d'une attention particulière, compte tenu du fait que les mesures des jauges sont des mesures ponctuelles, représentatives de l'état local de déformation et que le béton est un matériau non-homogène et anisotrope. Des fissures, apparentes ou non en surface de la pièce, peuvent aussi fausser les mesures.



(suite de la page 1)

L'imprécision des méthodes d'évaluation conventionnelles est due aux hypothèses simplificatrices qui sous-tendent ces méthodes. L'analyse recommandée dans la norme est bidimensionnelle et une distribution des charges doit être admise, *a priori*, entre les éléments. De plus, dans les ponts en béton armé, on néglige la participation du béton à la reprise des efforts de cisaillement et au développement d'un effort de traction associé aux effets de flexion. On assume des appuis parfaitement rotulés et/ou parfaitement mobiles,

alors qu'en réalité, des frottements et des butées contribuent à créer des encastremements partiels. D'autre part, on admet que les membrures d'une structure métallique à treillis sont parfaitement rotulées à leurs extrémités, alors qu'en réalité, un certain degré de retenue à la rotation est offert par les assemblages. Tous ces facteurs peuvent avoir des répercussions importantes sur les mesures expérimentales et être la cause des écarts importants observés avec les calculs théoriques.

L'essor extraordinaire de ces dernières années dans le domaine de l'électronique et des méthodes d'analyse de structures offre la possibilité d'ausculter et d'évaluer les ponts existants et d'identifier avec précision les solutions optimales aux problèmes associés au maintien du bon comportement des ouvrages d'art endommagés par la surexploitation dont ils sont l'objet actuellement et sur lesquels se fondent les bases de notre économie. ♦

De plus, les jauges doivent être judicieusement disposées de manière à être représentatives de l'état réel des sollicitations. Selon la géométrie de l'élément instrumenté, plus d'une jauge peut être nécessaire pour extraire des valeurs mesurées les contributions des différents efforts qui sollicitent l'élément. Dans le cas d'un treillis métallique, considérer des rotules parfaites aux extrémités des membrures conduit à l'utilisation d'une seule jauge de déformation pour mettre en relief la traction pure admise. Cette disposition a pourtant toutes les chances de fournir des valeurs distorsionnées à cause des sollicitations secondaires, comme les moments dus aux excentricités des attaches aux noeuds, que les calculs théoriques conventionnels ignorent. Pour quantifier les déformations dues à chaque sollicitation qui agit sur l'élément, trois jauges (et souvent davantage selon la géométrie de la section de la membrure) sont nécessaires.

Une fois bien isolées et protégées contre les intempéries, les jauges sont reliées à un module de conditionnement de signal intégré dans le laboratoire mobile stationné près du pont. La figure 1 montre deux

jauges installées, l'une soudée sur la face inférieure de l'aile supérieure d'une poutre d'acier et l'autre collée à la fibre inférieure de la dalle de béton.

Pour mesurer les flèches, un capteur de déplacement est utilisé, lequel est en général un potentiomètre actionné par une corde. Le capteur est attaché à un point fixe au sol et l'extrémité de la corde au pont. Quand le point d'attache de la corde se déplace à cause de la déformation de la structure, le potentiomètre génère un signal proportionnel à ce déplacement. Dans certains cas, le problème est de créer le repère fixe car souvent, sous le pont, il y a de l'eau profonde ou une route ouverte à la circulation. Pour contourner cette difficulté, Cantieni (1983) a utilisé avec succès un système de lecteur au laser. On présente à la figure 2 un capteur de déplacement installé sous une structure. Dans ce cas, l'échafaudage installé sous le pont a servi de repère fixe.

Les mesures des flèches, tout comme celles des jauges, sont d'un grand intérêt, puisqu'elles constituent des mesures ponctuelles représentatives de l'état global de déformation de la structure. La

comparaison des flèches mesurées, avec les valeurs indiquées dans les normes de calcul, fournit des renseignements importants concernant le comportement réel de la structure.

Pour les tests en régime dynamique, sont utilisés les jauges électriques et les capteurs de déplacements décrits ci-dessus. À ceux-ci s'ajoutent des accéléromètres qui permettent d'enregistrer les accélérations de certains points de la structure à la suite d'une excitation mécanique produite, par exemple, par le passage d'un véhicule. À partir de ces enregistrements sont calculés les fréquences et les modes de vibration de la structure étudiée. La figure 3 présente un accéléromètre installé sur le tablier d'un pont. Il est fixé avec un aimant sur une plaque d'acier munie de trois vis permettant la mise au niveau.

Dans la norme canadienne actuellement en vigueur, le coefficient de majoration dynamique à considérer pour l'évaluation d'une structure est donné en fonction de la fréquence de vibration du premier mode du pont. De plus, la connaissance des fréquences de vibration du pont permet d'apprécier le niveau d'interaction dynamique pont-véhicule. En effet, de nombreuses études (Billing, 1984) tendent à démontrer qu'un haut niveau de perturbation de la structure doit être envisagé lorsque les fréquences de vibration du pont et des véhicules s'apparentent.

Pour mesurer les flèches en régime dynamique, il est possible, dans certains cas, d'intégrer les signaux des accéléromètres pour estimer les déplacements qu'on ne peut mesurer directement avec les capteurs de déplacement. Cependant, cette solution est sensible, entre autres, à la digitalisation des signaux et à la stabilité de l'alimentation électrique des accéléromètres. Elle n'est envisageable qu'avec des accéléromètres de basse fréquence de qualité, insensibles aux effets des variations de température, et avec un taux d'échantillonnage élevé.

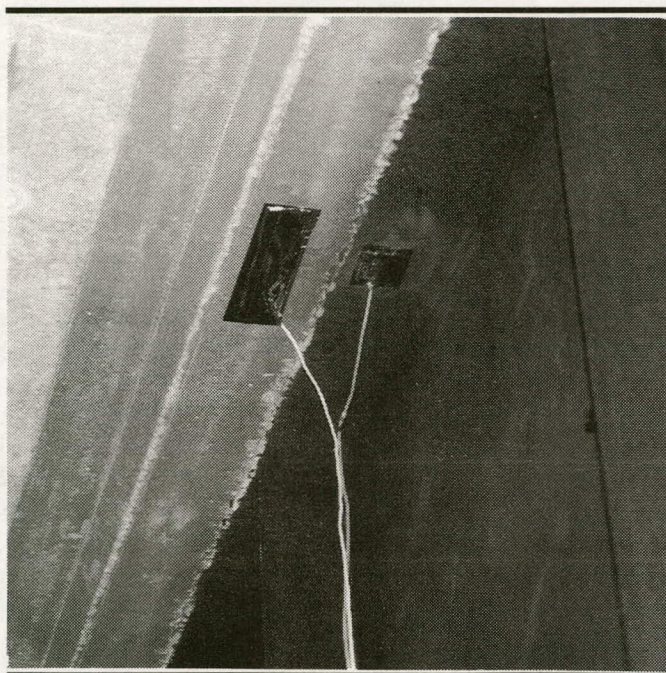


Figure 1
Jauges installées
sur une poutre
d'acier et une dalle
de béton.

Généralement, les essais dynamiques sont réalisés soit avec des véhicules de masse connue, soit sous le trafic routier normal. Dans le premier cas, si des essais statiques ont été réalisés avec les mêmes véhicules, on peut comparer les valeurs obtenues par des mesures statiques et dynamiques des différents capteurs pour estimer un niveau d'amplification dynamique.

· Seulement la compilation statistique
· de très nombreux essais dynamiques
· peut conduire à une valeur du
· coefficient de majoration dynamique
· utilisable pour l'évaluation de la
· structure étudiée.
·
· Avec un trafic routier normal, les
· enregistrements peuvent se faire sur
· de grandes périodes de temps et
· servir ainsi aux fins d'une évaluation

· des dommages dus à la fatigue des
· éléments d'une structure métallique.
· La durée de vie d'une structure et les
· endommagements dus à la fatigue
· dépendent, en majeure partie, de
· l'histoire du chargement de la
· structure. En particulier, l'amplitude
· des contraintes causées par les
· charges vives et le nombre de cycles
· de sollicitations sont des facteurs
· fondamentaux dont on doit tenir

Figure 2
Capteur de déplacement
monté sur un échafaudage

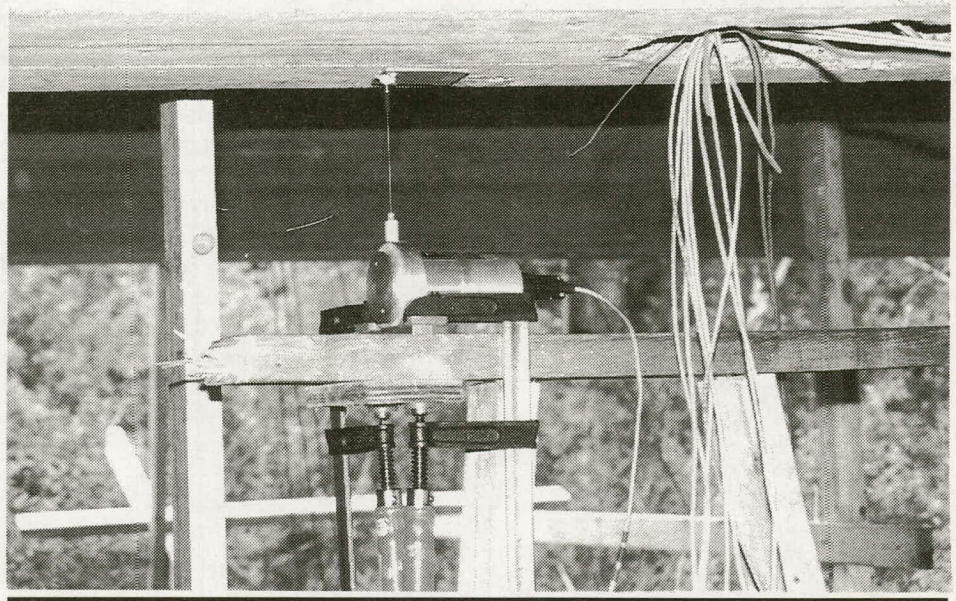


Figure 3
Accéléromètres aimantés
installés sur des plaques
de mise au niveau.



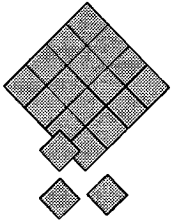
compte dans une analyse des effets relatifs à la fatigue. Dans ce contexte, le problème est d'évaluer dans quelle mesure les effets de la circulation routière normale contribuent à accroître de façon significative les risques de rupture par fatigue.

D'autre part, pour les besoins d'essais dynamiques spéciaux, des excitateurs mécaniques, électromagnétiques ou hydrauliques et des marteaux instrumentés peuvent servir pour perturber l'équilibre de la structure. Ces appareils sont munis d'un capteur de force qu'on peut relier au système d'acquisition de données pour enregistrer l'amplitude de la force appliquée en fonction du temps. De cette façon, on peut relier l'excitation à la réponse du pont (les signaux des accéléromètres). Dans le domaine des fréquences, la *fonction de transfert* définie par le rapport entre le signal de la réponse de la structure et le signal de l'excitation est une propriété de la struc-

ture étudiée et elle décrit complètement l'état actuel de la structure. Si des essais dynamiques sont répétés périodiquement avec une excitation connue sur une structure donnée, on peut apprécier le taux de dégradation de celle-ci par la variation de la fonction de transfert en fonction du temps. Cet indice est complémentaire aux inspections traditionnelles. Cette approche fait actuellement l'objet de différents programmes de recherche (Biswas *et al.*, 1992; Green *et al.*, 1992; Fafard *et al.*, 1992).

Tous les capteurs de mesures décrits ci-dessus peuvent être reliés au laboratoire mobile du ministère des Transports. L'équipement du laboratoire mobile comporte deux systèmes électroniques indépendants d'acquisition de données. Le premier système, utilisé pour mesurer en régime statique les flèches de 10 capteurs de déplacement et les déformations d'un maximum de 60 jauges, peut

effectuer 60 lectures par seconde en tenant compte de différents paramètres comme les constantes de calibration, la résistance électrique des câbles de connexion et les effets de variations de température. Le deuxième système est utilisé pour les mesures en régime dynamique. Ce système peut capter les informations simultanément de 16 canaux disponibles pour des jauges, des capteurs de déplacement ou autre et de 12 autres canaux pour des accéléromètres, à un rythme pouvant atteindre 50 000 lectures par seconde. Les signaux de ces canaux peuvent être filtrés à l'aide de filtres analogues de type Bessel avec fréquence de coupure programmable. De plus, un dispositif ingénieux, conçu et réalisé par le personnel du laboratoire, permet le déclenchement automatique du système dynamique d'acquisition de données par les véhicules d'essai et la détermination de la vitesse de passage sur le pont. ♦



Interprétation des mesures dans le contexte de l'évaluation structurale

Tel que mentionné auparavant, la méthode de calcul de la norme canadienne pour l'évaluation des structures existantes est fondée sur des hypothèses simplificatrices souvent non représentatives des conditions réelles d'exploitation des ponts. Des essais sur ces structures montrent, dans la majorité des cas, que les sollicitations dans les éléments structuraux principaux sont bien inférieures à celles calculées suivant la méthode simplifiée de la norme. Dans pareil cas, avant de conclure sur l'état de la structure étudiée, il importe à l'ingénieur responsable de l'évaluation de tenter d'expliquer les écarts entre les résultats expérimentaux et ceux prévus par la théorie.

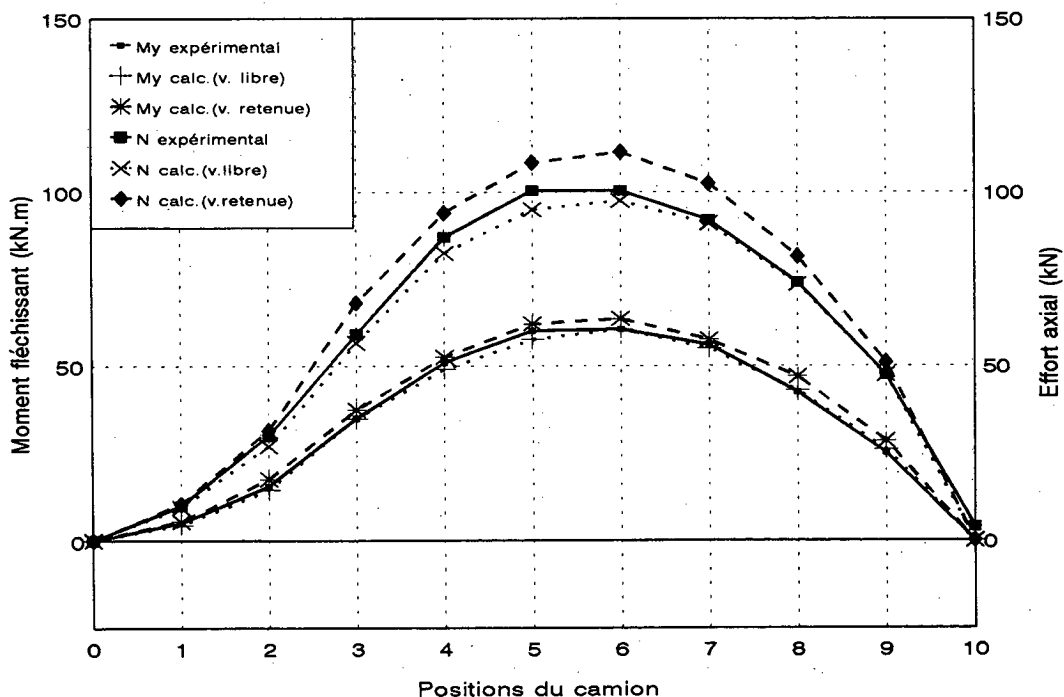
Pour simplifier les calculs, l'analyse recommandée dans la norme est bidimensionnelle et une distribution des charges doit être admise, à priori, entre les éléments. On ne

tient pas compte explicitement des longerons, des contreventements ou des entretoises qui influencent la distribution transversale des charges et la rigidité de la structure dans son ensemble. Sans qu'une liaison ne les relie explicitement, une action composite partielle significative peut se développer par friction entre la dalle, les longerons et les entretoises. Quant aux conditions d'appui, on assume des appuis parfaitement rotulés et/ou parfaitement mobiles, alors qu'en réalité, des blocages (corrosion des appareils d'appuis), des frottements et des butées causés par le basculement des culées et des piles contribuent à créer des encastremements partiels et un effet d'arche qui rigidifient la structure. De plus, on admet que les membrures d'une structure métallique à treillis sont parfaitement rotulées à leurs extrémités, alors qu'en réalité, un certain degré de retenue à la rotation est créé par les assemblages. D'autre

part, pour les ponts en béton armé, on néglige la participation du béton à la reprise des efforts de cisaillement et au développement d'un effort de traction associé aux effets de flexion. Tous ces facteurs peuvent avoir des influences importantes sur les valeurs des mesures expérimentales et être la cause des écarts importants avec les calculs théoriques. Il importe donc d'identifier les particularités dominantes du comportement d'une structure et en tenir compte dans une perspective d'évaluation à long terme.

Le nombre limité de points de mesure rend souvent difficile l'identification de ces particularités dominantes. Pour étendre la portée des résultats expérimentaux, l'exploitation d'un modèle mathématique raffiné, capable de simuler en trois dimensions le comportement d'une structure, s'est avéré très utile

Figure 4
Efforts internes statiques dans la poutre 1, cheminement C



pour une analyse en profondeur de son comportement et pour mieux définir le niveau réel des sollicitations dans ses éléments. Le ministère des Transports dispose d'un tel modèle numérique, basé sur la méthode des éléments finis, assez souple pour représenter adéquatement la géométrie et le comportement d'une structure quelconque. Cependant, certains paramètres nécessaires pour la simulation ne peuvent être estimés explicitement et rendent obligatoire le processus de calibration sur des résultats expérimentaux. L'ensemble des mesures *in situ* peut alors servir à ces fins. Les figures 4 à 7 illustrent une comparaison des résultats expérimentaux et ceux obtenus numériquement après calibration du modèle d'un pont poutre-dalle simplement appuyée avec action composite. Les figures 4 et 5 rassemblent les résultats d'un essai statique alors que les figures 6 et 7 montrent les résultats d'un essai en régime dynamique.

Une fois calibré, le modèle rend accessible une masse supplémentaire

d'informations permettant à l'ingénieur responsable de l'évaluation du pont de porter un jugement plus éclairé sur la capacité portante de la structure à l'étude. L'identification des membrures les plus sollicitées peut guider la démarche visant à définir les charges maximales admises sur la structure. De plus, le modèle peut fournir des estimations assez justes de paramètres difficiles, voire même impossibles à mesurer, comme les déformations et les flèches à certains endroits inaccessibles. Pour bien apprécier la susceptibilité d'une structure aux effets dynamiques du trafic routier, des études paramétriques peuvent être réalisées avec ce modèle. La combinaison de ces approches numérique et expérimentale s'est avérée très performante pour l'évaluation de ponts dont les méthodes de calcul conventionnelles révélaient, à tort, des incapacités structurales majeures.

D'autre part, les mesures expérimentales sont le reflet de l'état du pont au moment des tests et ne constituent pas des valeurs définitives

ou permanentes. Les propriétés mécaniques des matériaux sont sujets à des réductions causées par les éléments agressifs du milieu et de l'endommagement par fatigue qui s'accumule sans cesse au cours de la vie utile de la structure. Dans ce contexte, on doit évaluer si le comportement de la structure peut être altéré significativement dans le temps et recommander, au besoin, un suivi régulier et des inspections plus fréquentes de la structure ou de certains éléments susceptibles à l'apparition prématurée des endommagements.

La connaissance des particularités du comportement de la structure est nécessaire afin de porter un jugement à long terme sur la capacité de la structure à remplir son rôle adéquatement. Elle peut aussi donner des indications pour l'établissement d'un échéancier et d'une liste de priorités dans un programme de remplacements ou d'opérations importantes de réhabilitation des ponts existants. ♦

Figure 5
Efforts internes statiques dans la poutre 2, cheminement C

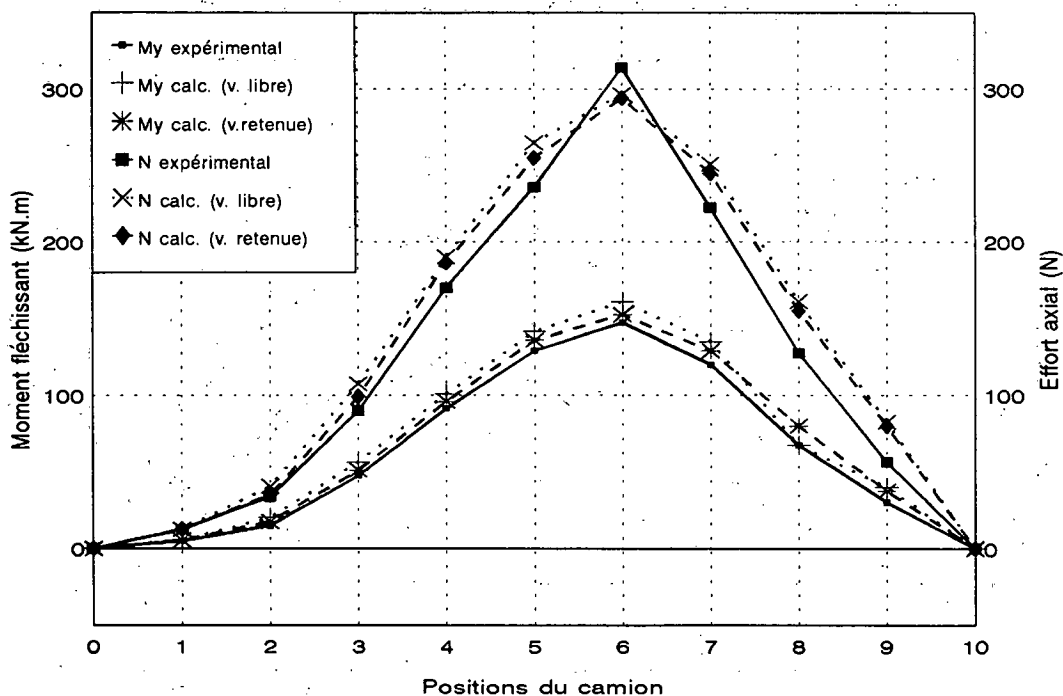


Figure 6
Moment fléchissant dans la section mixte de la poutre 1 à mi-travée, cheminement B

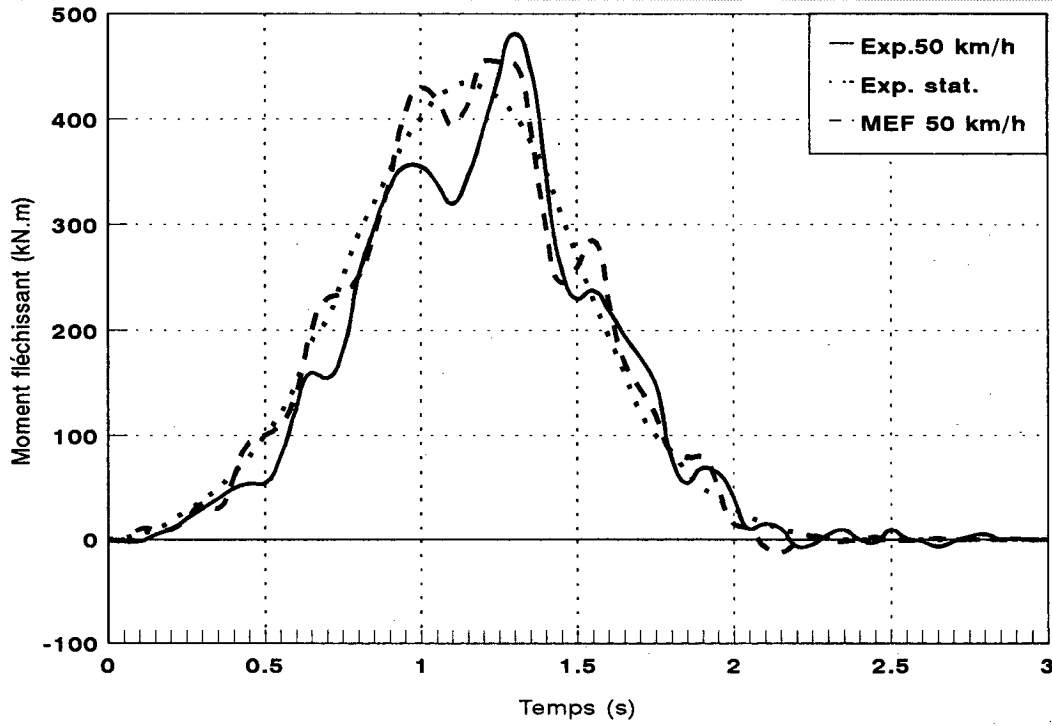
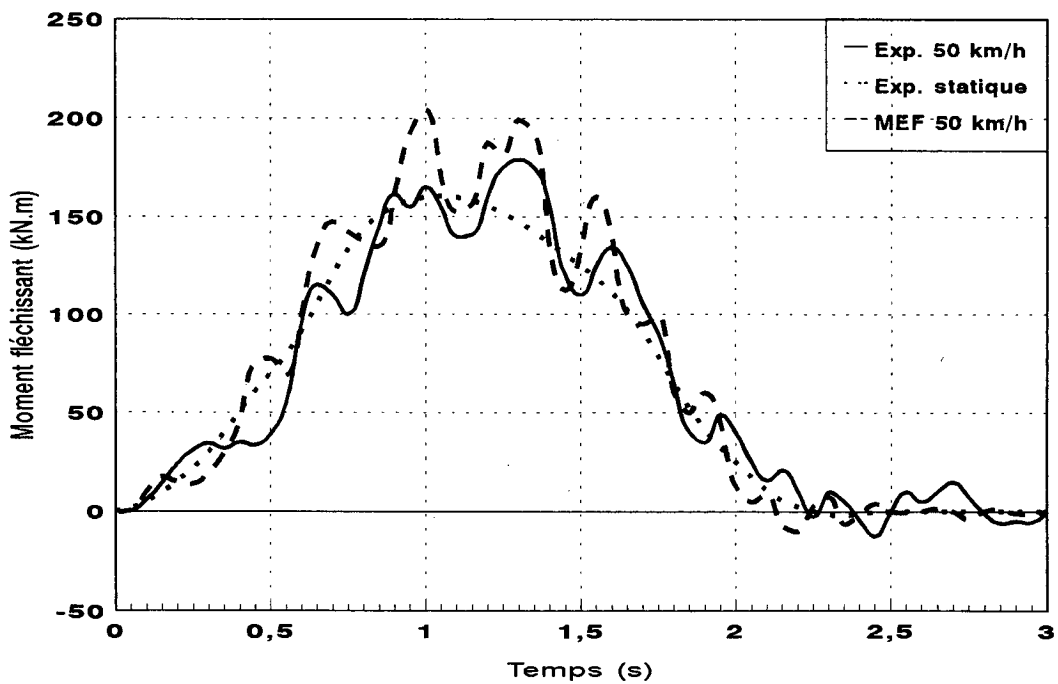
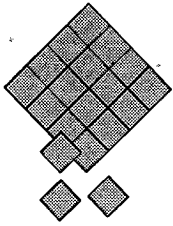


Figure 7
Moment fléchissant dans la section mixte de la poutre 2 à mi-travée, cheminement B





Conclusions

Le Québec compte plus de 3 000 ponts qui ont été construits il y a plus de 40 ans. Ces ponts sont déjà vieux et parfois dégradés et doivent être soigneusement évalués de manière à s'assurer qu'ils répondent encore aux exigences du trafic routier d'aujourd'hui.

La réalisation de tests sur une structure peut mettre en évidence une réserve de résistance négligée par les méthodes d'analyse simplifiées et suffisantes pour conduire à une réduction des coûts des travaux

de réhabilitation initialement envisagés. Pour répondre aux besoins de renforcement et réduire les coûts de réhabilitation, les résultats de ces tests sont des indicateurs fiables de l'état réel de la structure et peuvent aider à une gestion adéquate des interventions à faire sur les structures existantes.

L'exploitation d'un modèle mathématique raffiné, capable de simuler en trois dimensions le comportement d'une structure, s'est avéré très utile pour une analyse en profondeur

de son comportement et mieux définir le niveau réel des sollicitations dans ses éléments. Le ministère des Transports dispose d'un tel modèle numérique, basé sur la méthode des éléments finis.

La combinaison de ces approches numérique et expérimentale est très performante pour l'évaluation de ponts dont les méthodes de calcul conventionnelles révélaient, à tort, des incapacités structurales majeures. ♦

RÉFÉRENCES

1. ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION, 1988. *Calcul des ponts routes*, CAN/CSA-S6-88. Association canadienne de normalisation, Willowdale, Ontario.
2. BILLING, J.R. 1984. *Dynamic Loading and Testing of Bridges in Ontario*, Revue Canadienne de Génie Civil. 11: 833-843.
3. BISWAS, M., PANDEY, A.K. and SAMMAN, M.M. 1992. *Detecting Incipient Failures in Bridges*. Research report 86-10, Transportation and Infrastructure Research Center, Duke University, Durham, North Carolina.
4. CANTIENI, R. 1983. *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland - 60 Years Experience of EMPA*. EMPA-Report No. 211, Dübendorf, Switzerland.
5. FAFARD, M., SAVARD, M., BEAULIEU, D. et BOUDJELAL, T. 1992. *Évaluation du facteur d'amplification dynamique des charges par une approche expérimentale et numérique*. Rapport GCT-92-06, Dép. de Génie civil, Université Laval, Québec.
6. GREEN, M.F., CEBON, D. 1990. *Prediction of Vehicle-Induced Bridge Vibration: Application for Design*. Proceedings of the Engineering Materials Symposium of the Canadian Society for Civil Engineers, Québec.
7. HALCHINI, C., GRENON, P. et MASSICOTTE, B. 1991. *Auscultation électronique des ponts existants*. Compte rendu du congrès de l'AQTR, Québec.
8. MASSICOTTE, B., HALCHINI, C. and LABBÉ, J. 1993. *Evaluation of the Capacity of an Existing steel Truss Bridge*. Proceedings of Colloquium "Remaining Structural Capacity", International Association for Bridge and Structural Engineering, Copenhagen, Denmark.
9. PAULTRE, P., CHALLAL, O. et PROULX, J. 1991. *Essais dynamiques des ponts - État des connaissances*. Rapport de recherche SMS-91/02, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
10. SAVARD, M. 1993. *Étude par éléments finis du facteur d'amplification dynamique des charges dans les ponts sollicités par des véhicules routiers*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
11. TALBOT, M., SAVARD, M. and HALCHINI, C. 1992. *Load Testing and Numerical Modelling of some Quebec Bridges*. Proceedings of Colloquium "Remaining Structural Capacity", International Association for Bridge and Structural Engineering, Copenhagen, Denmark.



