

DÉVELOPPEMENT DE LA NOUVELLE MÉTHODE SIMPLIFIÉE POUR LE CODE S6

Patrick Théoret
Étudiant à la maîtrise

Bruno Massicotte
Professeur titulaire

Groupe de recherche de génie des structures
École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succursale Centre-ville
Montréal (Québec), H3C 3A7

RÉSUMÉ : Dans le cadre d'un projet de recherche conduit à l'École Polytechnique de Montréal, une nouvelle formulation pour la méthode simplifiée actuelle du code CSA S6 a été développée. La puissance des logiciels d'analyse structurale récents a permis la programmation d'un outil de génération de modèles de grillage pour procéder à une vaste étude paramétrique où un grand nombre de ponts furent analysés. Cet article présente de nouvelles équations pour le calcul de facteurs de distribution de la charge vive pour les ponts de type dalle sur poutres de géométrie droite et biaise. Il a été possible de réduire significativement le nombre d'équations de la méthode tout en gardant ou améliorant la justesse de la méthode simplifiée et en étendant son application aux ponts de géométrie biaise.

INTRODUCTION

Objectifs généraux du projet de recherche

La méthode de la poutre équivalente est utilisée de manière satisfaisante depuis des décennies en Amérique du nord pour l'analyse de ponts à poutres mais aussi pour les dalles pleines. Selon Zokaie et al. (1991), sa première apparition remonte à 1931 dans la norme Standard Specifications for Highway Bridges de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Différentes variantes d'une méthode d'analyse simplifiée utilisant des facteurs de distribution des charges vives sont présentes dans les différentes normes nord américaines. Le Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC) contenait une telle méthode jusqu'à sa dernière édition en 1992, méthode qui a évolué pour se retrouver maintenant dans le code canadien de calcul des ponts routiers (Canadian Highway Bridge Design Code, ou CHBDC) (CSA, 2006). Cette méthode simplifiée vise à déterminer les effets les plus critiques des chargements en tenant compte de la distribution transverse des charges de roues au moyen de facteurs de distributions empiriques. Elle fournit un niveau de précision adéquat pour la majorité des cas retrouvés en pratique, et ses résultats sont généralement conservateurs. Avec cette méthode, les effets des chargements sont en premier lieu calculés en considérant la structure comme une poutre. La distribution des charges entre les membrures longitudinales de la structure est ensuite déterminée en utilisant des relations relativement simples qui constituent la spécificité de cette méthode.

La méthode d'analyse simplifiée telle que définie dans la version actuelle de le code CSA S6 (2006) est l'objet de critiques pour la complexité de sa formulation due en grande partie au nombre de tableaux présents dans le code se rapportant à des types de ponts non usuels, le grand nombre d'équations pour un type de pont donné, la complexité de la méthode pour des ponts à

travées continues et la nature non-intuitive des équations de certains paramètres. Une meilleure alternative serait d'avoir une méthode simplifiée impliquant moins d'équations et des calculs plus intuitifs. Il est de l'avis de certains qu'une forme plus simple de facteurs de distribution similaire à l'approche traditionnelle S/2D (CSA, 1988) serait préférable.

Dans cette perspective, un large programme de recherche a été réalisé à l'École Polytechnique de Montréal de 2006 à 2011 pour réviser la méthode d'analyse simplifiée du code actuel CSA-S6 pour les types de structures de ponts les plus communes (dalle pleines, dalle-sur-poutres, caissons multiples) avec des géométries en plan droites, biaises ou courbées horizontalement. Afin d'aider au montage de l'étude paramétrique de ce projet, des géométries de pont typiques furent obtenues de plans d'un grand nombre de ponts de types variés fournis par le Ministère des Transports du Québec et la Ville de Montréal.

Portée et méthodologie

Cet article présente la méthodologie utilisée visant à proposer une nouvelle formulation pour la méthode d'analyse simplifiée appliquée à la distribution des charges vives pour les ponts de type dalle sur poutres. Une large étude paramétrique a été menée sur un grand échantillon de ponts pour étudier les tendances de distribution de charges vives en fonction de la portée, du nombre de voies et du type de poutres. Ces équations seront éventuellement soumises pour discussion au comité technique du code CSA-S6. Elles ne peuvent donc pas être utilisées pour le calcul des ponts avant d'avoir été dûment approuvées.

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

Sélection des géométries types

Les plans de plusieurs ponts de type dalle sur poutres ont été obtenus du Ministère des Transports et de la Ville de Montréal. Une base de données de ces ponts est constituée afin de déterminer les caractéristiques géométriques. Au total 123 ponts sont considérés : 35 ponts mixtes en acier avec poutre en I, 31 ponts en béton avec poutres en I et 57 ponts avec des poutres monolithiques en T en béton.

De cette étude des tendances ont été obtenues pour les deux principales propriétés géométriques requises pour la détermination des propriétés géométriques des poutres longitudinales formant les grillages des modèles de l'étude paramétrique : la rigidité flexionnelle ($E I$) et la rigidité torsionnelle ($G J$). Les figures 1 à 3 illustrent la variation de ces propriétés en fonction de la portée des travées et du type de poutres.

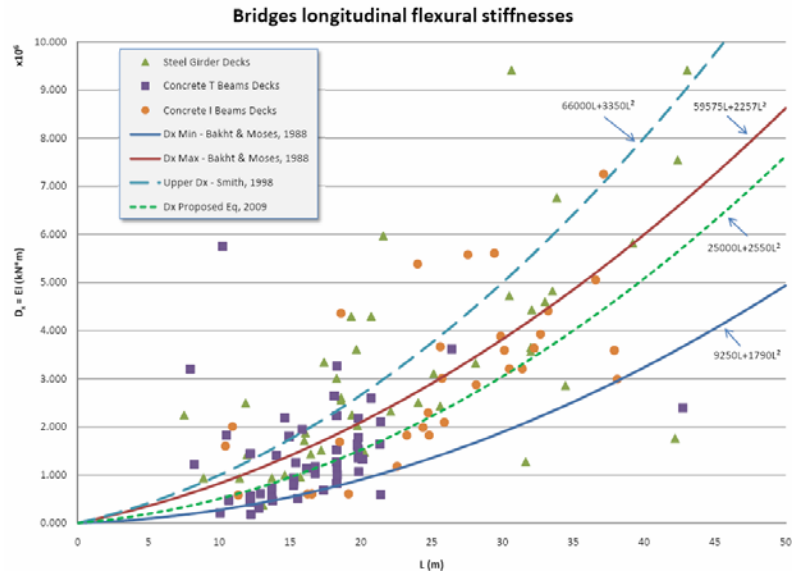


Figure 1 : Variation de la rigidité flexionnelle longitudinale selon le type de tablier.

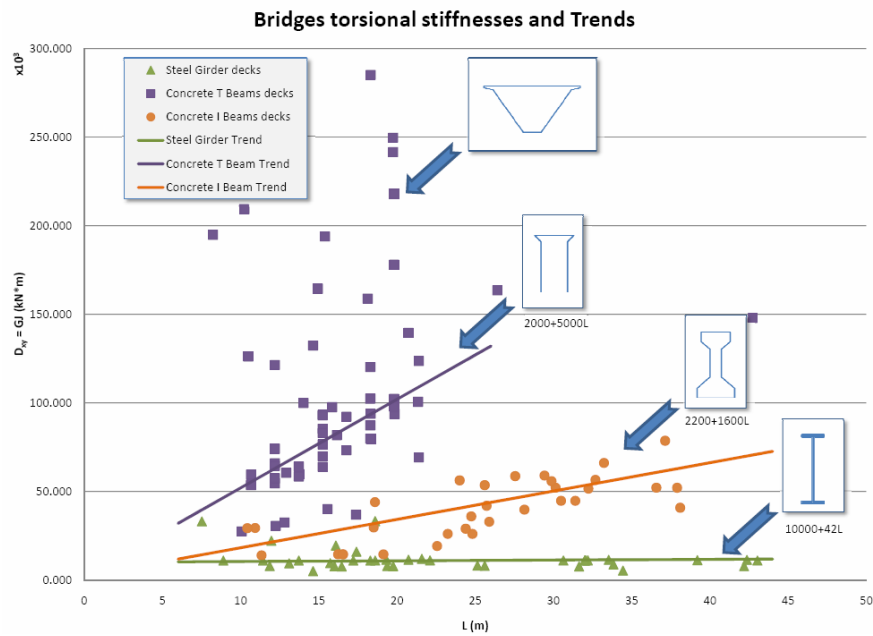


Figure 2 : Variation de la rigidité torsionnelle longitudinale selon le type de tablier.

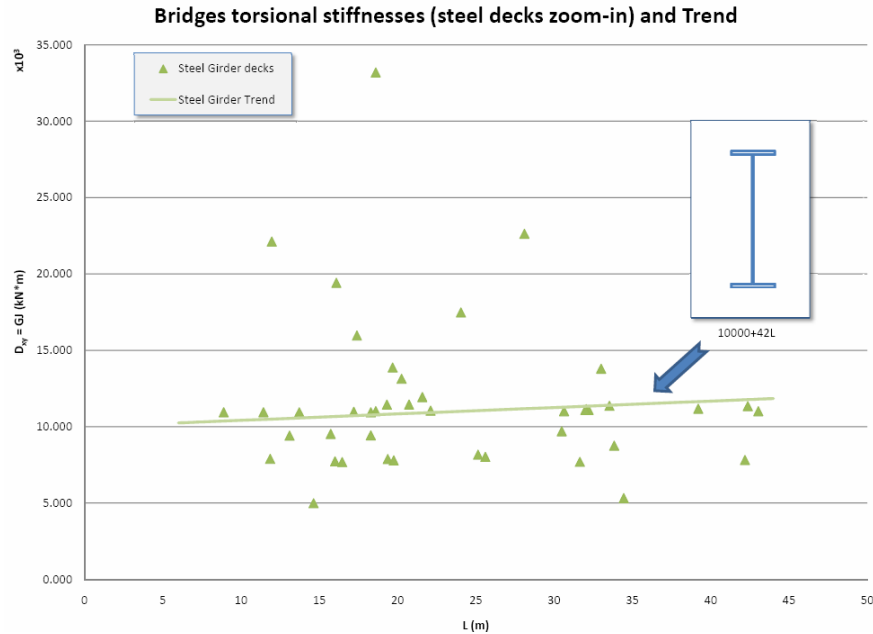


Figure 3 : Variation de la rigidité torsionnelle longitudinale pour les tabliers mixtes acier-béton

Détermination des propriétés

Bakht et Mooses (1988) ont proposé d'utiliser des relations géométriques pour définir les propriétés de poutres de grillage en fonction de la portée. Ils ont proposé une valeur minimale et maximale à la propriété D_x , qui est la rigidité flexionnelle par unité de largeur de tablier, exprimée kN et m :

$$D_{x-min} = 9250 L + 1790 L^2 \quad (1)$$

$$D_{x-max} = 59575 L + 2257 L^2 \quad (2)$$

Smith (1998) a utilisé la même approche pour dériver les équations du code CSA-S6 (2000). L'équation, qu'il propose, est une valeur moyenne des valeurs maximales des ponts répertoriés au Nouveau-Brunswick :

$$D_{x-Smith} = 66000 L + 3500 L^2 \quad (3)$$

Selon l'étude des différents ouvrages présentés précédemment dans ce rapport, l'équation suivante a été retenue dans la présente étude :

$$D_x = 25000 L + 2550 L^2 \quad (4)$$

L'inertie flexionnelle des poutres est ensuite obtenue de l'équation suivante où S est l'espacement des poutres longitudinales et E le module d'élasticité attribué au matériau des poutres considérées :

$$I_x = \frac{D_x S}{E} \quad (5)$$

Les différentes relations sont présentées sur la figure 1.

Dans les études antérieures citées plus haut, la rigidité torsionnelle était attribuée à la dalle. Toutefois, pour les ponts en béton ou les ponts caissons, la rigidité torsionnelle est nettement supérieure à la celle de la dalle seule. Cette distinction a été considérée dans les analyses. Les relations suivantes, présentées sur les figures 2 et 3 ont été utilisées dans la présente étude selon le type de poutre, où les unités sont les kN et les m :

$$D_{xy} = 10\,000 L + 42 L \quad \text{pont mixte, dalle de béton sur poutres d'acier en I} \quad (6)$$

$$D_{xy} = 2\,200 L + 1\,600 L \quad \text{pont mixte, dalle de béton sur poutres de béton en I} \quad (7)$$

$$D_{xy} = 2\,000 L + 5\,000 L \quad \text{pont avec poutre monolithique en T en béton} \quad (8)$$

L'inertie torsionnelle des poutres est ensuite obtenue de l'équation suivante où S est l'espacement des poutres longitudinales et G le module de cisaillement attribué au matériau des poutres considérées :

$$J_{xy} = \frac{D_{xy} S}{G} \quad (9)$$

Les différentes relations sont présentées sur les figures 2 et 3.

Dans tous les modèles une dalle de 200 mm est utilisée. Aucun contreventement ou diaphragme ne sont utilisés dans les analyses.

Génération des modèles

Au total 16 415 modèles de grillage ont été analysés répartis comme suit : 8115 ponts mixtes avec dalle de béton sur poutres d'acier en I, 4240 ponts mixtes, dalle de béton sur poutres de béton en I, et 4060 ponts avec poutre monolithique en T en béton. Les différentes combinaisons de géométries sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres considérés dans l'étude paramétrique

Nombre de voies (n)	Nombre de poutres (N)	W_e (m)	L (m)	ψ°
1	3 à 6	4.2 à 6.8	3 à 60	0 à 60
2	3 à 6	6.9 à 10.9	3 à 60	0 à 60
3	5 à 9	11.0 à 14.4	3 à 60	0 à 60
4	8 à 12	14.5 à 17.5	3 à 60	0 à 60

ÉQUATIONS PROPOSÉES POUR LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

L'étude paramétrique a permis de proposer de nouvelles équations pour la méthode simplifiée du code CSA-S6. Tout comme pour les équations des ponts de type dalle épaisse présentées précédemment, les équations proposées sont inspirées des formulations des méthodes simplifiées des éditions 1988 et 2006 de la norme CSA-S6.

Moment fléchissant à l'ÉLUL et l'ÉLUT

La formulation proposée pour le calcul des facteurs de distribution en flexion est la suivante :

$$M_g = F_M M_T \quad (10)$$

$$F_M = \frac{S}{D_M (1 + \mu\lambda)} \geq 1.05 \frac{n R_L}{N} \quad (11)$$

où M_g est le moment de conception par poutre, M_T est le moment maximal produit par le chargement CL-625 ou par la charge de voie sur une poutre équivalente, F_M est le facteur de distribution des efforts de flexion, S est l'espacement centre à centre (en mètres) des poutres, D_M est la largeur (en mètres) sur laquelle le chargement d'une voie est distribuée calculée à partir d'équations empiriques présentées plus bas, et $(1 + \mu\lambda)$ est un facteur de correction prenant en considération la variation de la largeur des voies de circulation tel que dans la présente formulation de la méthode simplifiée de la norme S6. Le terme de droite de l'équation 11 définit une limite inférieure pour F_M . La valeur minimale de F_M est identique à ce qui se retrouve dans le code CSA actuel, et cette limite est fixée à une valeur 5% supérieure à l'effort moyen réparti sur toutes les poutres du pont.

À partir des résultats de l'analyse paramétrique, les équations suivantes sont proposées pour les ponts de type dalle sur poutres. Comme pour les ponts de type dalle épaisse au chapitre précédent, les équations sont basées sur des voies de circulation étroites de largeur W_e de 3.3m ($\mu\lambda = 0$).

Pour les routes de classes A ou B :

$$D_{Mext} = \gamma_T \gamma_c \left(3.6 - \frac{1}{L} \right) \geq D_{Mint} \quad (13)$$

$$D_{Mint} = \left(4.1 - \frac{10}{L + 5} \right) \quad (14)$$

Pour les routes de classes C ou D :

$$D_{Mext} = \gamma_T \gamma_c \left(3.8 - \frac{1}{L} \right) \geq D_{Mint} \quad (15)$$

$$D_{Mint} = \left(4.3 - \frac{10}{L + 5} \right) \quad (16)$$

Dans ces équations :

$\gamma_T = 1.0$ pour les ponts à faible rigidité torsionnelle

$= 1.1$ pour les ponts à rigidité torsionnelle élevée

$\gamma_c = 1.25 - 0.5 S_c / S \geq 1.0$ pour les ponts avec $0.5S < S_c \leq 0.6S$

$=$ une autre équation pour le cas où $S_c \leq 0.5S$ ou en présence de trottoir

La figure 4 présente la comparaison des valeurs de D_M calculées à l'aide de l'équation présentée pour les poutres extérieures de ponts de routes de classes A ou B (3) et des valeurs critiques obtenues pour des analyses de grillages pour des ponts à 1, 2, 3 et 4 voies pour les états limites ultimes et d'utilisation pour des ponts soutenant des routes de classes A & B. Les valeurs correspondantes obtenues à l'aide des équations du code CSA-S6 (2006) sont également présentées. Ces résultats illustrent que les équations proposées collent de manière satisfaisante aux résultats analytiques, très près des équations actuelles du code qui sont généralement toutes deux du côté conservateur. Il est également possible de voir sur ces résultats l'impact du porte-à-faux et de la rigidité torsionnelle qui sont ajustés à l'aide des coefficients cités ci-haut.

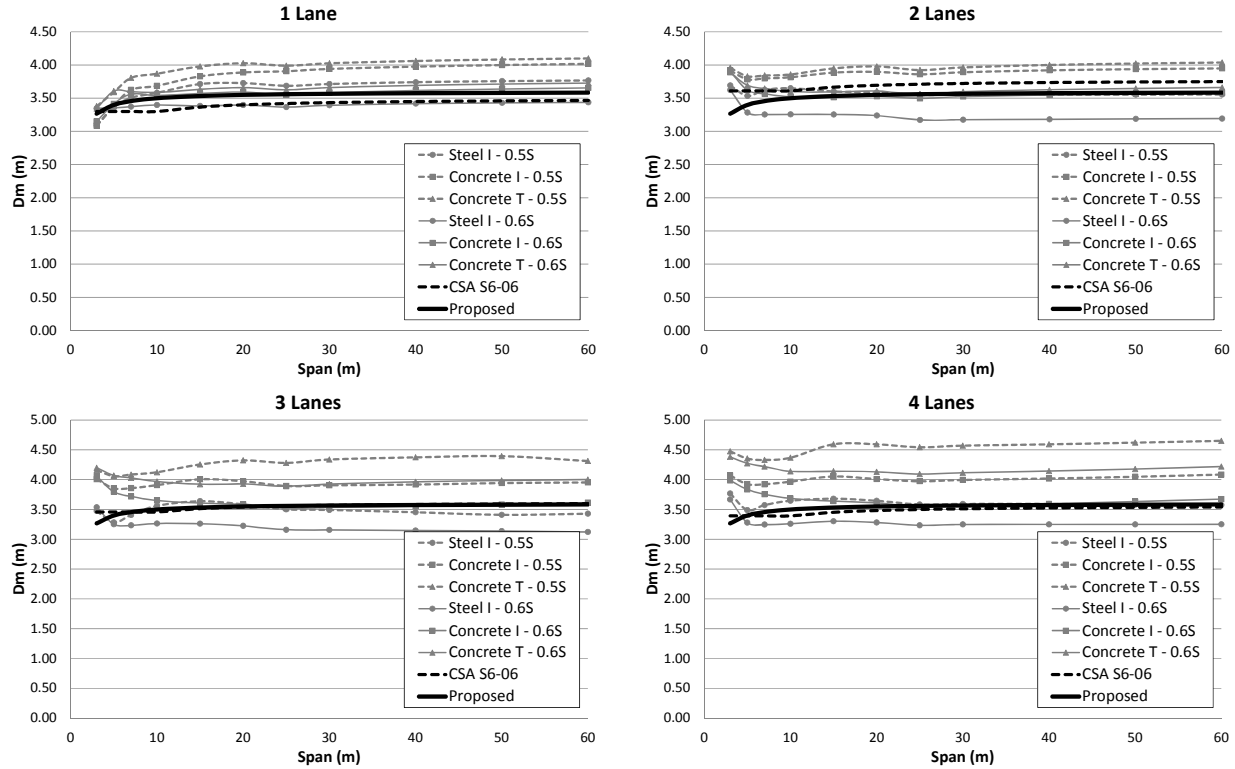


Figure 4 : Facteurs D en moment fléchissant calculés pour ponts étroits, à l'ÉLUL et ÉLUT-2, de classes A & B

Les modèles de géométries de pont avec des largeurs de voie différente de 3.3 m analysés dans cette étude paramétrique ont été utilisés pour re-calibrer la correction pour la largeur de voie, tout en gardant un format similaire à celui de la norme existante.

Le facteur de correction pour la largeur de voie est donné par :

$$\mu = \frac{W_c}{3.3 n} - 1 \leq 1.0 \quad (17)$$

$$\lambda_{ext} = (L - 3) / 100 \leq (n - 1) / 10 \quad (18)$$

$$\lambda_{int} = (L - 3) / 80 \leq 0.4 \quad (19)$$

Les figures 5 et 6 comparent les valeurs du paramètre λ obtenues du traitement des résultats de l'analyse paramétrique à la courbe des équations proposées. Les équations proposées ont été calibrées pour obtenir un intervalle de confiance de 95%. L'équation pour les poutres extérieures est en fonction du nombre de voies, mais pour une poutre intérieure, une seule équation peut être utilisée pour décrire le comportement des tabliers peu importe le nombre de voies.

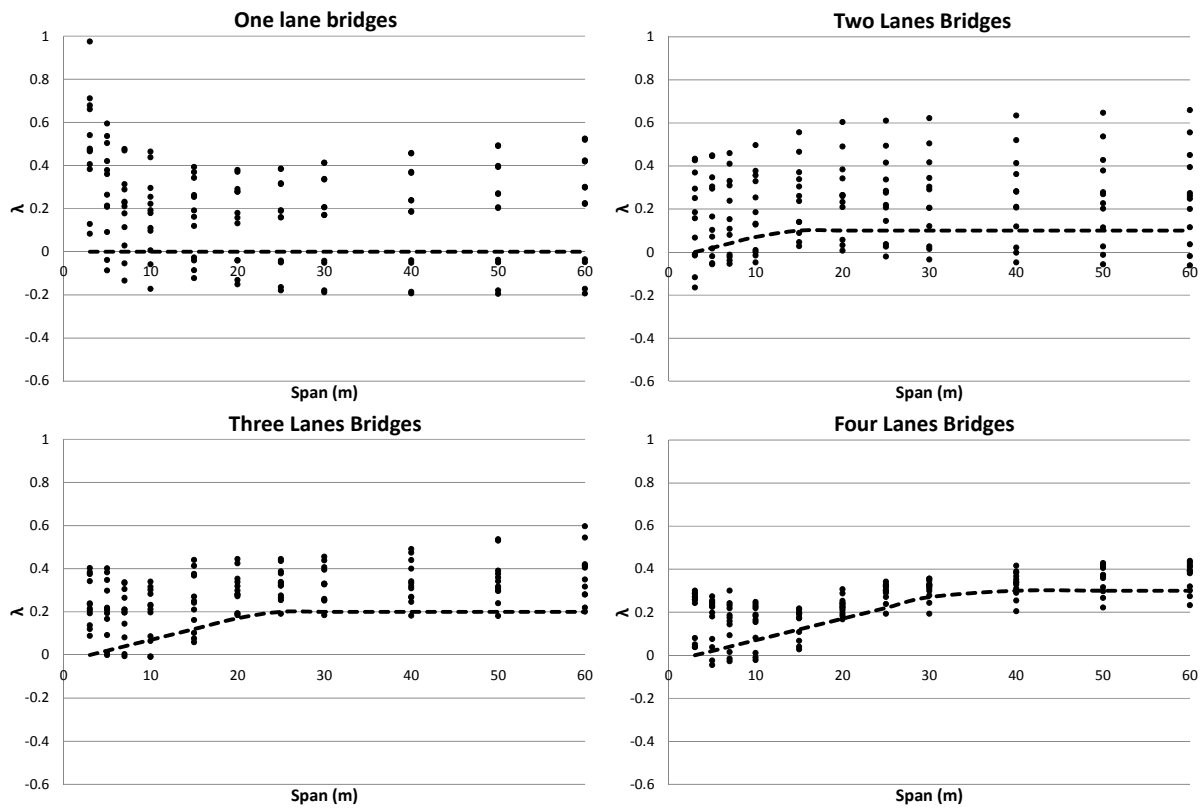


Figure 5 : Valeurs calculées de λ vs équation proposée (poutres extérieures) - ÉLUL et ÉLUT-2

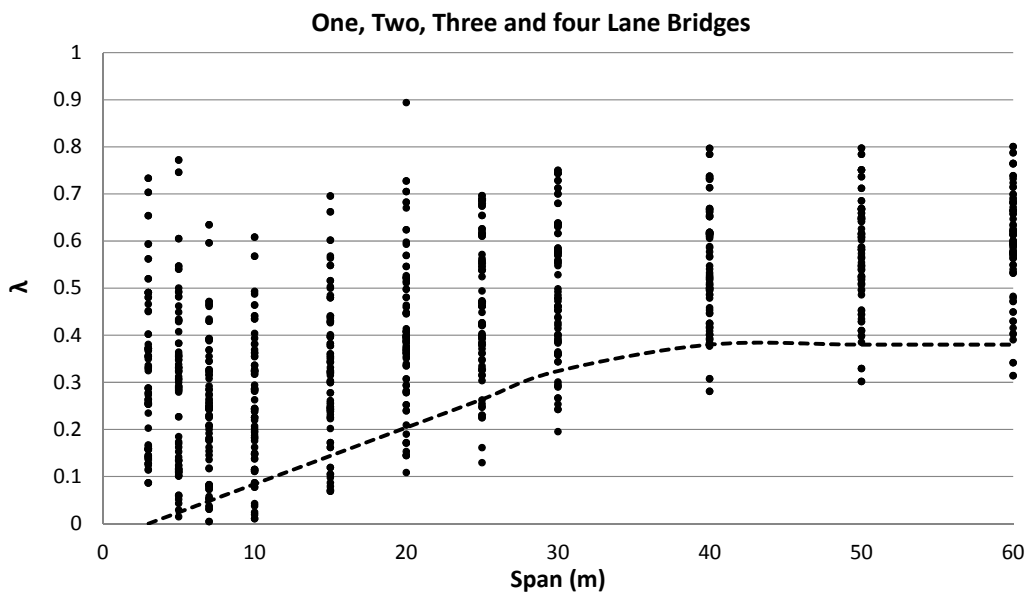


Figure 6 : Valeurs calculées de λ vs équation proposée (poutres intérieures) - ÉLUL et ÉLUT-2

Effort tranchant à l'ÉLUL et l'ÉLUT

La nouvelle équation générale proposée pour le calcul des facteurs de distribution en cisaillement est la suivante :

$$V_g = F_V V_T \quad (20)$$

avec

$$F_V = \frac{S}{D_V} \geq 1.05 \frac{n R_L}{N} \quad (21)$$

où V_g est le cisaillement de conception par poutre, V_T est la valeur maximale de cisaillement produite par le chargement CL-625 ou par la charge de voie sur une poutre équivalente, F_V est le facteur de distribution des efforts de cisaillement, S est l'espacement centre à centre (en mètres) des poutres et D_V est la largeur (en mètres) sur laquelle le chargement d'une voie est distribuée. Le terme de droite de l'équation 21 définit une limite inférieure pour F_V de la même manière que pour la valeur minimale de F_M .

À partir des résultats de l'analyse paramétrique, les équations suivantes sont proposées pour les ponts de type dalle sur poutre :

Pour les routes de classes A ou B :

$$D_{V_{ext}} = 2.8 + L/40 \leq 3.4 \gamma_c \quad (22)$$

$$D_{V_{int}} = 2.3 + L/25 \leq 3.4 \quad (23)$$

Pour les routes de classes C ou D :

$$D_{V_{ext}} = 2.8 + L/25 \leq 3.6 \gamma_c \quad (24)$$

$$D_{V_{int}} = 2.5 + L/25 \leq 3.6 \quad (25)$$

Dans ces équations :

$$\begin{aligned} \gamma_c &= 1.25 - 0.5 S_c / S \geq 1.0 \text{ pour les ponts avec } 0.5S < S_c \leq 0.6S \\ &= \text{une autre équation pour le cas où } S_c \leq 0.5S \text{ ou en présence de trottoir} \end{aligned}$$

La figure 7 présente la comparaison des valeurs de D_V calculées à l'aide de l'équation présentée pour les poutres extérieures de ponts de routes de classes A ou B (6.12) et des valeurs critiques obtenues pour des analyses de grillages pour des ponts à 1, 2, 3 et 4 voies pour les états limites ultimes et d'utilisation pour des ponts soutenant des routes de classes A & B. Les valeurs correspondantes obtenues à l'aide des équations du code CSA-S6 (2006) sont également

présentés. Ces résultats illustrent que les équations proposées collent de manière satisfaisante aux résultats analytiques, légèrement mieux que les équations actuelles du code qui sont parfois du côté non conservateur des résultats pour les ponts des plus courtes portées. Contrairement aux équations de moment fléchissant, on peut constater la distribution des efforts de cisaillement n'est pas affectée par le nombre de voies de circulation, L'équation proposée des facteurs de distribution n'est donc pas en fonction du nombre de voie. Il est également possible de voir sur ces résultats l'impact du porte-à-faux variant de 0.5S à 0.6S, qui est pris en compte par le coefficient γ_c cité ci-haut. Les résultats des poutres intérieures et pour les classes de route C et D sont traités de la même manière.

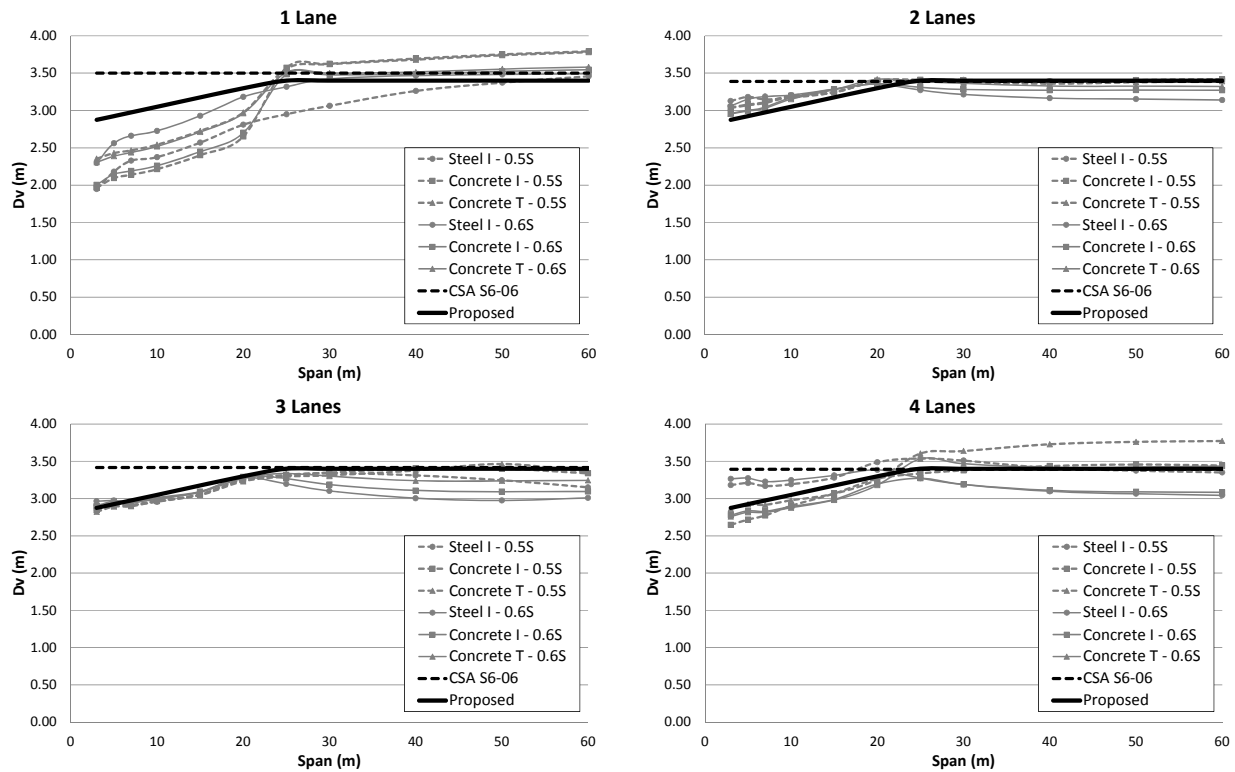


Figure 7 : Facteurs D en cisaillement calculés pour ponts étroits, à l'ÉLUL et ÉLUT-2, de classes A & B

Moment fléchissant à l'ÉLF

Pour les facteurs de distribution en moment fléchissant aux états limites de fatigue, le même exercice a été réalisé. La nouvelle équation générale proposée pour le calcul des facteurs de distribution en moment fléchissant aux états limites de fatigue est la suivante :

$$M_g = F_M M_T \quad (11)$$

avec

$$F_M = \frac{S}{D_M F_e (1 + \mu \lambda)} \geq 1.05 \frac{1}{N} \quad (26)$$

où F_e est utilisé pour corriger la distribution de moment fléchissant pour prendre en considération la position transversale de la ligne de roue extérieure des voies de circulation prévues sur le pont. La distance de rive à la roue (D_{VE}) est définie à la figure 8 et demeure inchangée par rapport à la norme CSA S6-06 D'après les résultats de l'analyse paramétrique, les équations suivantes sont proposées pour les ponts à voies étroites avec $W_e = 3.3$ m ($\mu\lambda = 0$) et un chasse roue de 450 mm afin d'obtenir une distance de rive à la roue (D_{VE}) de 1.0m ($F_e = 1$):

$$D_{Mext} = \gamma_T \gamma_c \left(3.4 - \frac{n}{100L} \right) \geq D_{Mint} \quad (27)$$

$$D_{Mint} = \left(4.6 - \frac{10}{L+5} \right) + \frac{L n^{1.25}}{100} \quad (28)$$

$$F_e = 1 + 0.28(D_{VE} - 1) \left(1 + C_e [D_{VE} - 1]^2 \right) \quad (29)$$

$$C_e = \frac{180}{L^2} \leq 0.34 \quad (30)$$

$\gamma_T = 1.0$ pour les ponts avec des rigidités torsionnelles faibles

= 1.1 pour les ponts avec rigidité torsionnelle élevée

$\gamma_c = 1.25 - 0.5 S_c / S \geq 1.0$ pour les ponts avec $0.5S < S_c \leq 0.6S$

= une autre équation pour $S_c \leq 0.5S$ et en présence de trottoir

$$\lambda_{ext} = 0 \quad (31)$$

$$\lambda_{int} = (5 - n) L / 160 \leq 0.7 - n / 10 \quad (32)$$

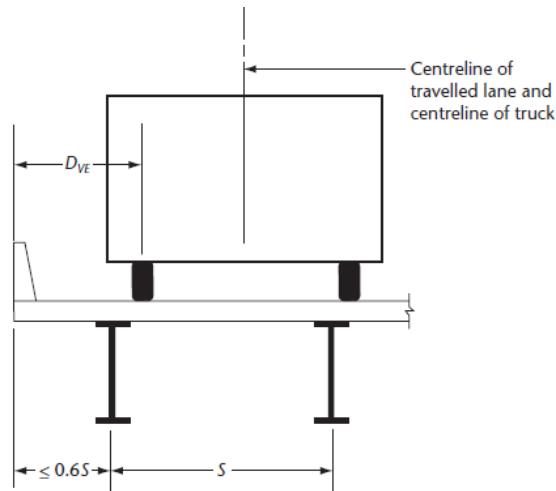


Figure 8 : Définition de la distance D_{VE}

Effort tranchant à l'ÉLF

L'équation générale proposée pour le calcul des facteurs de distribution en cisaillement aux états limites de fatigue est la suivante :

$$V_g = F_V V_T \quad (18)$$

où

$$F_V = \frac{S}{D_V} \geq 1.05 \frac{1}{N} \quad (33)$$

avec, pour toute classes de routes;

$$D_{V_{ext}} = D_{V_{int}} 2.6 + L/20 \leq 3.6 \quad (34)$$

CONCLUSIONS

Cet article a présenté les résultats d'une analyse paramétrique effectuée sur plus de 16000 modèles de grillages représentant des ponts de type dalle sur poutres en acier et en béton, de largeurs correspondant à des ponts portant de 1 à 4 voies de circulation.

De ces analyses, une nouvelle formulation plus simple d'une méthode d'analyse simplifiée pour les ponts de type dalle sur poutres est proposée pour la norme CSA-S6. Le nombre d'équations requises par la méthode a été abaissé de manière significative et les tableaux d'équations éliminés. Ces équations pour la distribution des efforts de flexion et de cisaillement sous charge vive sont présentées, ainsi qu'une révision du facteur de correction pour la largeur de voies.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée grâce à une subvention RDC CRSNG/Cima+. La collaboration du Ministère des Transports du Québec et de la Ville de Montréal au montage de la base de données sur les géométries de ponts typiques est également soulignée.

RÉFÉRENCES

AASHTO, 2007. *LRFD design specifications*, 4th Ed, Washington, D.C.

BAKHT, B & MOSES, F. 1988. *Lateral distribution factors for highway bridges*. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 114, No 8.

CSA 1988. *CAN/CSA-S6-88 Design of Highway Bridges*. Canadian Standards Association, Toronto.

CSA 2006. *CAN/CSA-S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code*. Canadian Standards Association, Toronto.

CSA 2006. *CAN/CSA-S6.1-06, Commentary on Canadian Highway Bridge Design Code*. Canadian Standards Association, Toronto.

MTO 1992. *Ontario Highway Bridge Design Code and Commentary*, 3rd Edition. Ministry of Transportation and Communication, Ontario, Canada.

SMITH, D.S. 1998. *Force effects in slab and voided slab bridges types at ultimate and serviceability limit states and recommendations for live load distribution factors for the Canadian Highway Bridge Design Code*. Report to CSA-S6 Subcommittee on Methods of Analysis.

THÉORET, P., MASSICOTTE, B. AND CONCIATORI, D. 2011. *Analysis and design of straight and skewed solid slab bridges*, Paper submitted for possible publication in the ASCE Journal of Bridge Engineering, (Accepté pour publication).

ZOKAIE, T., IMBSEN, R.A., AND OSTERKAMP, T.A. 1991. *Distribution of Wheel Loads on Highway Bridges*, Transportation Research Record 1290, Transportation Research Board, USA.