DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL, GÉOLOGIQUE ET MINES

Nouvelle méthode d'analyse simplifiée pour le Code Canadien sur le Calcul des Ponts Routiers – CSA-S6-14

par :

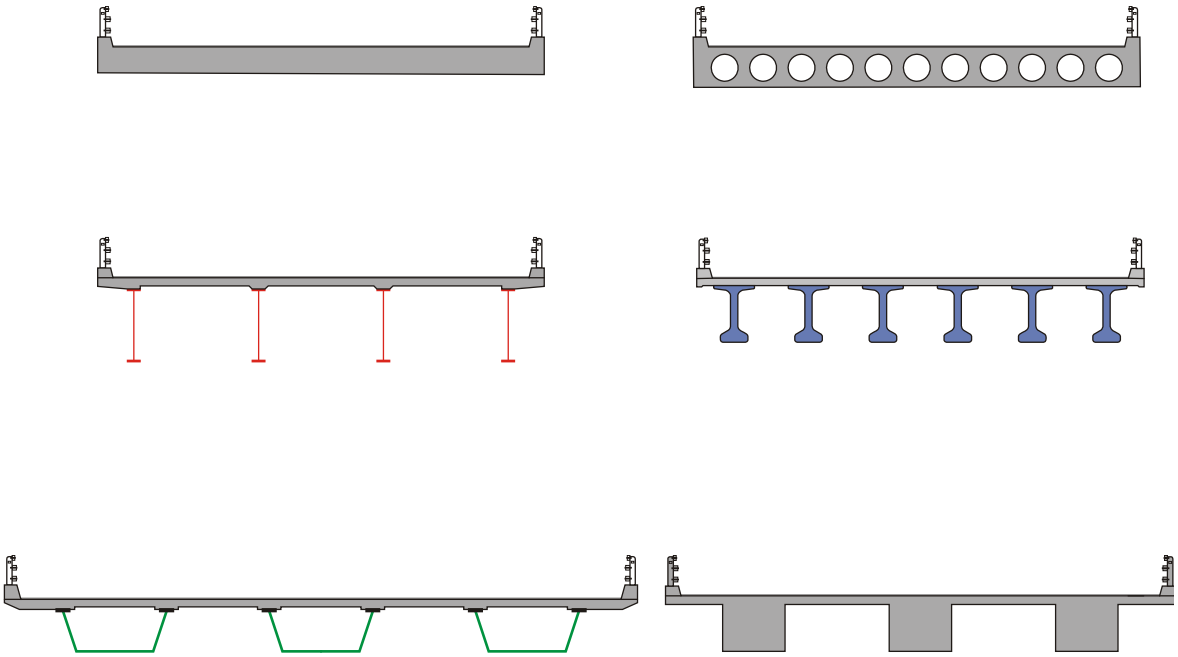
Massicotte, Théoret, Meerssman,
Forget, Conciatori, Lefour, Bascopé

Soumis à :

Direction des Structures
Ministère des Transports du Québec

SR16-05
Rapport final – Révisé

Nouvelle méthode d'analyse simplifiée pour le Code Canadien sur le Calcul des Ponts Routiers – CSA-S6-14



RAPPORT DE RECHERCHE

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
LE GÉNIE EN PREMIÈRE CLASSE

Décembre 2016
Rapport final – Révisé
N/R: SR16-05 / P4629
V/R: R748

Nouvelle méthode d'analyse simplifiée pour le Code Canadien sur le Calcul des Ponts Routiers – CSA-S6-14

Rapport de recherche

par :

Groupe de recherche en génie des structures (GRS)
Département des génies civil, géologique et des mines
École Polytechnique de Montréal

- **Bruno Massicotte, ing., Ph.D.**
  Professeur titulaire
- **Patrick Théoret, ing., M.Sc.A.**
  Ingénieur Cima+, Longueuil, anciennement étudiant à la maîtrise
- **Vincent Meerssman., M.Ing.**
  Anciennement étudiant à la maîtrise
- **Maxime Forget, M.Ing.**
  Anciennement étudiant à la maîtrise
- **David Conciatori, ing., Ph.D.**
  Professeur adjoint, université Laval, anciennement associé de recherche
- **Anthony Lefour**
  Étudiant à la maîtrise
- **Dennis Bascopé, ing., M.Ing.**
  Ingénieur Cima+, Laval

Soumis à

Direction des Structures
Ministère des Transports du Québec

Décembre 2016
Rapport final – Révisé
N/R: SR16-05 / P4629
V/R: R748

SOMMAIRE

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport ont été initiés à l'automne 2013 dans un effort concerté pour le développement de la nouvelle méthode simplifiée pour le Code CSA-S6-14. Ce rapport présente les résultats de plusieurs études, réalisées en amont de ce projet de recherche et dans le cadre de celui-ci, qui devaient permettre de canaliser les améliorations proposées vers l'édition 2014. Certaines modifications ont été implantées dans l'édition 2014 du Code CSA-S6 alors que d'autres pourraient éventuellement être intégrées dans la prochaine version.

Ce rapport contient les principaux résultats de ces études. Ceux-ci démontrent clairement que :

- les équations de l'édition 2014, dont le format a été grandement simplifié, conduisent aux mêmes résultats que les éditions précédentes;
- les efforts tranchants pour les dalles épaisses obtenus avec la méthode simplifiée ont été augmentés pour certains types d'ouvrages par rapport aux éditions précédentes mais demeurent toutefois inférieurs à ceux prédits par les méthodes raffinées ce qui constitue une anomalie préoccupante;
- les équations de la méthode simplifiée pour les ponts de type dalle sur poutres conduisent à des résultats éloignés des résultats des méthodes raffinées, avec une grande dispersion dans certains cas, et n'ont pu être améliorées malgré la disponibilité des résultats d'analyses qui n'ont pu être exploités;
- la méthode simplifiée pour les ponts de type poutres-caissons multiples améliorée dans l'édition 2014 donne des résultats très près de ceux obtenus avec les méthodes raffinées, sécuritaires et présentant peu de dispersion;
- les efforts calculés avec la méthode simplifiée pour des travées continues se sont avérés conservateurs pour les quelques ouvrages étudiés;
- la méthode du grillage est l'approche à privilégier pour l'analyse raffinée des tabliers de ponts.

Enfin, la présente étude devrait être poursuivie pour amener un éclairage additionnel au calcul des efforts pour les ponts de type dalle épaisse, pour améliorer la précision des ponts de type dalle sur poutres et pour mieux considérer l'effet de la continuité longitudinale et transversale.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE I

TABLE DES MATIÈRES II

1 INTRODUCTION 1

1.1 Contexte 1

1.2 Objectifs du projet de recherche 2

1.3 Méthodologie 2

1.4 Portée du présent document 2

1.5 Organisation du rapport 2

2 MÉTHODE SIMPLIFIÉE DU CODE CSA-S6 4

3 PONTS DE TYPE DALLE ÉPAISSE ET DALLE ÉVIDÉE 6

3.1 Généralité 6

3.2 Comparaison des éditions 2006 et 2014 du Code CSA-S6 6

3.3 Étude paramétrique 9

3.4 Études modèles raffinés 13

3.5 Sommaire des résultats 16

4 PONTS DE TYPE DALLE SUR POUTRES 17

4.1 Généralité 17

4.2 Comparaison des éditions 2006 et 2014 du Code CSA-S6 17

4.3 Étude paramétrique 20

4.4 Sommaire des analyses 25

4.5 Sommaire des résultats 30

5 PONTS DE TYPE CAISSONS MULTIPLES 31

5.1 Contexte et portée de l'étude 31

5.2 Étude paramétrique 31

5.3 Modifications de la méthode simplifiée 33

5.4 Résultats de l'analyse paramétrique 33

5.5 Sommaire des résultats 37

6 PONTS CONTINUS 38

6.1 Contexte et portée de l'étude 38

6.2 Modèles et méthodologie 40

6.3 Résultats de l'étude 46

6.4 Sommaire des résultats 49

7 CONCLUSIONS 50

7.1 Sommaire des résultats 50

7.2 Recommandations 50

REMERCIEMENTS 51

RÉFÉRENCES 52

ANNEXE 1 – PROPRIÉTÉS DES PONTS DE TYPE DALLE SUR POUTRES DE LA BASE DE DONNÉES 53

ANNEXE 2 – CAS DE CHARGEMENT CONSIDÉRÉS (GRILLAGE) 56

ANNEXE 3 – RÉSULTATS DE L'ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DES PONTS CONTINUS 65

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport ont été initiés à l'automne 2013 dans un effort concerté pour le développement de la nouvelle méthode simplifiée pour le Code CSA-S6 et devaient être finalisés au printemps 2014, en temps pour l'édition 2014 du Code. Tel qu'indiqué dans ce qui suit, l'agenda initialement proposé n'a pu être respecté dû à des objections soulevées au sein du comité Technique du Code CSA-S6.

Le format de la version 2006 du Code a été introduit en 2000 suite à des travaux de recherche réalisés entre 1992 et 1997 principalement par David Smith, président du sous-comité du chapitre 5 pour l'édition 2000 du CSA-S6. La forme des équations proposées pour la méthode simplifiée a été introduite pour corriger des erreurs d'interprétation des versions antérieures. De plus une étude paramétrique importante avait permis de formuler les équations du Code. Cependant, le format choisi s'est avéré lourd car il exigeait la multiplication de tableaux. À titre de président du sous-comité du chapitre 5 sur les méthodes d'analyse depuis 2001, le premier auteur de ce rapport a proposé en 2006 une refonte complète du chapitre 5, une simplification du format des équations de l'édition 2000 et une amélioration de la précision de ces équations. Un vaste projet de recherche a été initié autour de 2006 avec le support du CRSNG et de Cima+ dans un projet de recherche et développement collaboratif. Plusieurs étudiants gradués ont collaboré à ce développement à travers leur projet de maîtrise. La méthode simplifiée proposée suite à ces travaux a été discutée au sein du sous-comité du chapitre 5 du Code S6 dès 2009 et l'ensemble des membres de ce sous-comité ont contribué à sa validation. Malgré que la méthode simplifiée aurait pu être introduite dès l'édition intérimaire de 2011 du Code S6, le Comité technique du Code S6 a décidé de reporter son introduction pour l'édition 2014 afin de pouvoir valider davantage la nouvelle méthode.

En 2011 une bonne partie des analyses requises pour les changements proposés pour l'édition 2014 avait déjà été faite à travers les projets de recherche complétés. Toutefois, les changements proposés ont suscité un questionnement au sein du comité technique du Code CSA-S6. En particulier, les résultats des études réalisées avant le présent projet de recherche indiquaient que la méthode du Code CSA-S6-06 surestimait les efforts pour la flexion des ponts de type dalle sur poutres mais sous-estimait les efforts tranchant pour les dalles épaisses. De plus, une formulation plus compacte et plus claire des équations de la méthode simplifiée a été proposée pour l'édition 2014. La précision de cette nouvelle formulation a également suscitée un questionnement. Le projet de recherche initié en 2013 visait à clarifier la situation. Le questionnement du Comité technique du Code CSA-S6 sur les deux séries de changements proposés (format de la méthode et modification des équations de calcul) a fait que les travaux rattachés au présent projet de recherche ont pris une ampleur beaucoup plus considérable qu'anticipé. Plusieurs ouvrages ont été analysés dans le cadre ce de projet de recherche par des ingénieurs du ministère des Transports du Québec, de Polytechnique et du génie conseil. Malgré l'effort intense consenti, peu d'améliorations quant à la précision des équations de la méthode simplifiée ont pu être implantés.

En effet, au printemps 2014, il a été finalement convenu au sein du Comité technique du Code CSA-S6 de procéder par étapes : d'abord la modification du format des équations de la méthode simplifiée pour l'édition 2014 sans en changer le résultat par rapport à l'édition de référence de 2006 du Code S6, puis l'amélioration de la précision de la méthode simplifiée pour les éditions futures.

Néanmoins, comme les résultats des études réalisées dans des projets antérieurs demeurent toujours pertinents et que les informations sont disponibles pour l'amélioration des éditions futures du Code, les résultats de ces études sont présentés dans ce rapport. De plus, quelques équations du Code S6 ont toutefois été modifiées, notamment pour le calcul à l'effort tranchant des dalles épaisses et pour l'ensemble des équations pour les ponts à caissons multiples. Ces modifications sont décrites dans ce rapport.

1.2 OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE

L'objectif principal visé par ce projet de recherche consiste à valider, et au besoin à corriger, la méthode simplifiée proposée pour le code CSA-S6-14 pour les ponts de type dalle, dalle sur poutres et caissons multiples. Le projet vise aussi à établir la méthodologie pour réaliser les analyses raffinées pour les types de ponts considérés par la méthode simplifiée. Plus spécifiquement le projet vise à améliorer la méthode simplifiée pour les cas suivants :

- ponts de type dalle épaisse, dalle évidée et dalle sur poutres sans biais;
- ponts de type caissons multiples;
- ponts continus.

1.3 METHODOLOGIE

Des analyses raffinées ont été réalisées pour les types de ponts indiqués plus haut afin de valider et d'améliorer les équations de la méthode de calcul simplifiée du code CSA-S6. Les méthodes d'analyse de grillage et d'éléments finis ont été retenues.

1.4 PORTEE DU PRESENT DOCUMENT

Ce rapport final présente :

- un sommaire de la méthode simplifiée;
- les résultats des analyses raffinées et leur comparaison avec la méthode simplifiée retenue pour l'édition 2014;
- des indications pour la réalisation de modèles de grillage.

Les équations proposées en vue d'améliorer la méthode simplifiée et qui n'ont pas été retenues ne sont pas présentées. Ainsi seules les équations retenues pour l'édition 2014 sont présentées. Toutefois les outils de calcul ont été développés afin de pouvoir éventuellement compléter les analyses et proposer des améliorerions pour les éditions futures du code CSA-S6.

1.5 ORGANISATION DU RAPPORT

Le chapitre 2 introduit sommairement la méthode simplifiée et les modifications apportées pour l'édition 2014 en comparaison avec les éditions précédentes. Le rapport comporte ensuite trois chapitres principaux (3, 4 et 5) qui portent respectivement sur les ponts de type dalle, dalle sur

poutres et caissons multiple. Le chapitre 6 aborde la considération des ponts continus. Enfin le chapitre 7 présente les principales conclusions et recommandations. Trois annexes complètent le rapport.

2 MÉTHODE SIMPLIFIÉE DU CODE CSA-S6

2.1.1 ÉDITIONS 2000 À 2011

L'édition 2000 du code CSA-S6 remplaçait les éditions 1988 de la norme CSA-S6 (CSA, 1988) et l'édition 1993 du OHBDC (MTO, 1993). Ces deux éditions utilisaient l'approche dite S/D dans laquelle le facteur d'essieu F_E est égal à deux fois le facteur de roue égal à $F_R = S/D$.

Dans l'édition 2000, cette formulation a été changée pour des raisons d'interprétations erronées qui avaient été soulignées, notamment pour l'utilisation du facteur de simultanéité R_L. Certaines erreurs trouvées dans la norme OHBDC ont également nécessité la réalisation d'une étude paramétrique importante pour les moyens informatiques des années 1990. La formulation suivante a été obtenue, exprimée ici pour le moment dans une poutre (M_g) d'un pont de type dalle sur poutres en fonction des efforts de flexion causés pour une voie par le camion de calcul (M_T) pour un pont comportant N poutres et supportant n voies de circulation :

$$M_g = F_m \; M_{moyen} \tag{2.1}$$

La valeur de l'effort moyen incluait explicitement le facteur R_L alors que le facteur de majoration donnait une indication de la valeur critique de calcul pour un élément donné par rapport à la valeur moyenne :

$$M_g = \frac{SN}{F\left(1+\mu C_f\right)} \frac{nR_L}{N} M_T \geq 1.05 \frac{nR_L}{N} M_T \qquad \text{à l'ÉLU et à l'ÉLS} \tag{2.2}$$

$$M_g = \frac{SN}{F\left(1+\mu C_f + C_e\right)} \frac{1}{N} M_T \geq 1.05 \frac{1}{N} M_T \qquad \text{à l'ÉLF} \tag{2.3}$$

Cette approche, quoique très pédagogique, a nécessité l'introduction d'un nombre considérable d'équations pour déterminer F qui correspondait, à un facteur près, au ratio D/nR_L des normes 1988 et 1993. De plus, les équations étaient présentées en paires, pour des portées de 3 à 10 m et pour des portées de 10 m et plus.

2.1.2 ÉDITION 2014

L'édition 2014 du code CSA-S6 (CSA, 2014) a remplacé l'édition 2011 (identique à l'édition 2006). La méthode de calcul du facteur d'essieu de type à S/D des normes antérieures à l'édition 2000 a été réintroduite avec trois principes de base :

- le facteur d'essieu, dénoté F_T, est égal au ratio S/D_e, où D_e représente la largeur effective du pont qui porte une voie de calcul (D_e vaut le double des valeurs de D des normes antérieures);
- les valeurs de F_T sont, sauf exception indiquées plus loin, égales à celles de l'édition 2006 du CSA-S6;
- les valeurs minimales moyennes indiquées aux équations précédentes ont été introduites explicitement.

On a ainsi :

$$M_L = \frac{S}{D\,\gamma_c\left(1+\mu\lambda\right)} M_T \geq 1.05\frac{nR_L}{N} M_T \qquad \text{à l'ÉLU et à l'ÉLS} \tag{2.4}$$

$$M_L = \frac{S}{D\,\gamma_c\left(1+\mu\lambda+\lambda_e\right)} M_T \geq 1.05\frac{1}{N} M_T \quad \text{à l'ÉLF} \tag{2.5}$$

Toutes choses étant égales, le lien entre les éditions antérieurs à celle de 2014 et cette dernière conduit au fait que, dans une très grande majorité de cas, on a :

$$D = \frac{F}{n\ R_L} \tag{2.6}$$

Enfin, tel qu'indiqué ultérieurement dans ce rapport, les résultats obtenus de la méthode simplifiée sont restés à toutes fins pratiques identiques pour les ponts de type dalle sur poutres. Pour les ponts de type dalle épaisse, l'effort tranchant a augmenté pour les ponts de trois voies et plus, alors que pour les ponts de type caissons multiples, les équations ont été modifiées afin d'améliorer la précision et d'éliminer certaines limitations géométriques prescrites dans les éditions précédentes. Il convient de souligner les ces équations pourraient être améliorées pour l'édition 2019. Des indications en ce sens seront soulignées dans les chapitres suivants.

3 PONTS DE TYPE DALLE ÉPAISSE ET DALLE ÉVIDÉE

3.1 GENERALITE

Ce chapitre est divisé en trois parties principales. Tout d'abord les valeurs de F_T obtenues des équations des versions des 2006 et 2014 du Code sont comparées. Ensuite, les équations du code CSA-S6-14 sont comparés avec les résultats de l'étude paramétrique réalisée principalement par Patrick Théoret dans le cadre de ses études de maîtrise et du projet RDC CRSNG-Cima+. La dernière section compare les résultats des analyses raffinées réalisées pour étayer le comportement des dalles épaisses. Une dernière section présente les conclusions et recommandations.

3.2 COMPARAISON DES EDITIONS 2006 ET 2014 DU CODE CSA-S6

3.2.1 FORMULATION

Les équations donnant les facteurs d'essieu F_T des normes 2006 et 2014 s'expriment comme suit :

$$F_{T_2006} = \frac{B}{F\left(1+\mu C_f/100\right)}\frac{nR_L}{B_e} \geq 1.05\frac{nR_L}{B_e} \qquad \text{à l'ÉLU et l'ÉLS} \qquad (3.1)$$

$$F_{T_2006} = \frac{B}{F\left(1+\mu C_f/100+C_e/100\right)}\frac{1}{B_e} \geq 1.05\frac{1}{B_e} \qquad \text{à l'ÉLF} \qquad (3.2)$$

$$F_{T_2014} = \frac{1}{D_T\,\gamma_c\left(1+\mu\lambda\right)}\frac{B}{B_e} \geq 1.05\frac{nR_L}{B_e} \qquad \text{à l'ÉLU et l'ÉLS} \qquad (3.3)$$

$$F_{T_2014} = \frac{1}{D_T\,\gamma_c\left(1+\mu\lambda+\lambda_e\right)}\frac{B}{B_e} \geq 1.05\frac{1}{B_e} \qquad \text{à l'ÉLF} \qquad (3.4)$$

Les paramètres C_f et λ ont la même définition mais diffèrent légèrement entre les deux normes. Le paramètre μ a la même définition dans les deux éditions alors que le paramètre γ_c est inclus dans le paramètre F de l'édition 2006. Les paramètres C_e et λ_e sont identiques.

3.2.2 COMPARAISONS AVEC LES NORMES ANTÉRIEURES

La Figure 3.1 et la Figure 3.2 comparent les valeurs de F_T pour le moment fléchissant pour les ponts de 1 à 4 voies à l'ELU et l'EFL pour des voies étroites ou larges des éditions 2006 et 2014. Les valeurs pour une voie étroite correspondent au cas de largeur minimale permise par le Code alors que le cas de voies larges est pour des voies de calcul de de 3.9 m de largeur. Les équations pour les dalles pleines et les dalles évidées sont les mêmes. On peut conclure que les nouvelles équations de la méthode simplifiée conduisent à des résultats pratiquement égaux à ceux de l'édition 2006 pour la flexion.

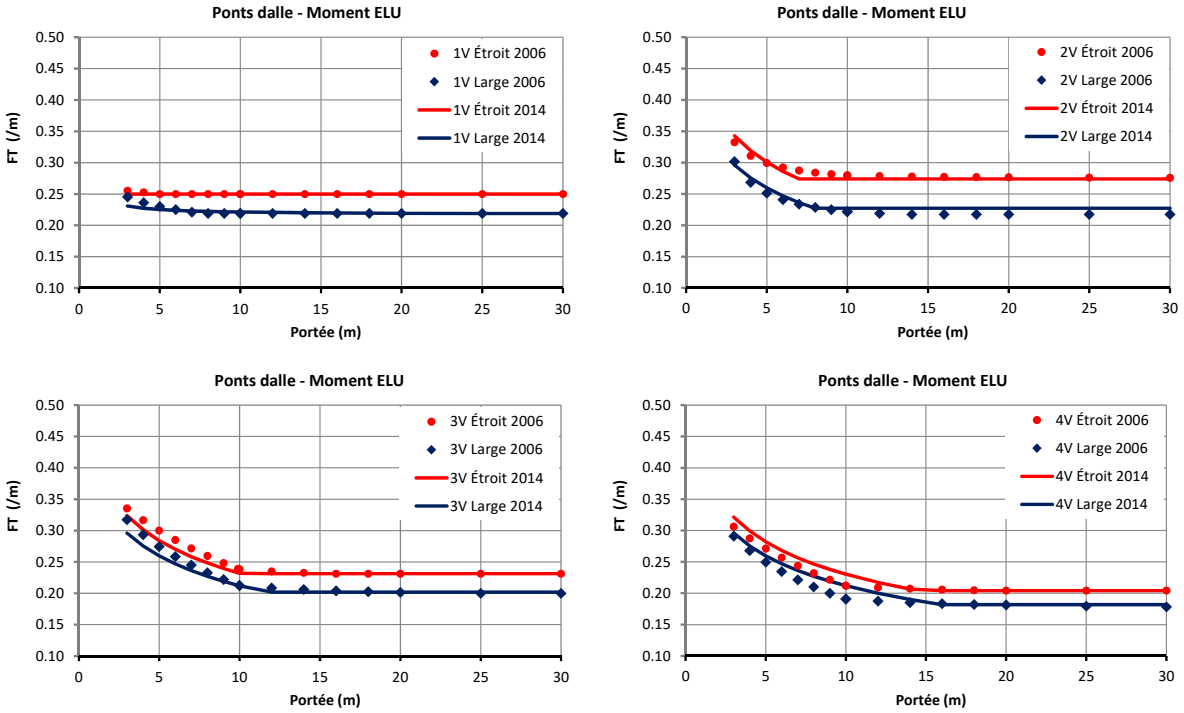


Figure 3.1 : Comparaison des ratios F_T pour les ponts de type dalle épaisse ou évidée Moment ÉLU – Pour 1, 2, 3 et 4 voies – Voies étroites et larges

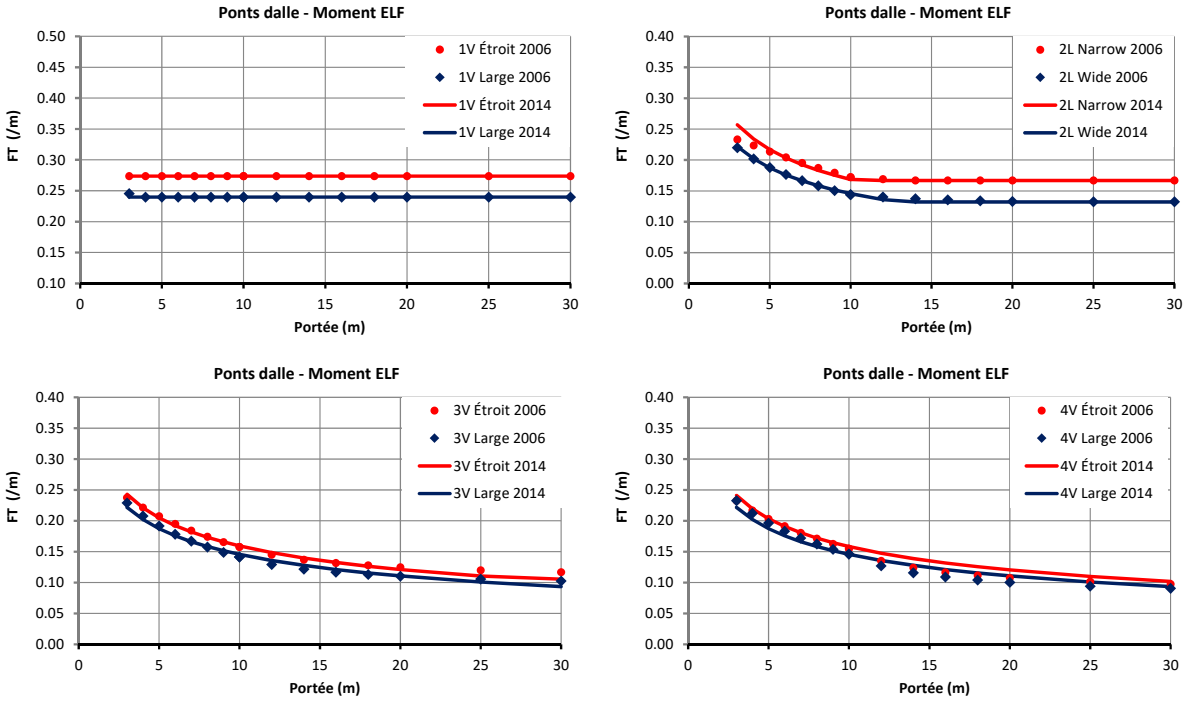


Figure 3.2 : Comparaison des ratios F_T pour les ponts de type dalle épaisse ou évidée Moment ÉLF – Pour 1, 2, 3 et 4 voies – Voies étroites et larges

Les graphes sur la Figure 3.3 comparent les valeurs de F_T pour l'effort tranchant pour les ponts de 1 à 4 voies à l'ELU pour voies étroites ou larges des éditions 2006 et 2014. Les valeurs pour une voie étroite correspondent au cas de largeur minimale permise par le Code alors que le cas de voies large est pour une voie de 3.9 m. Le cas des dalles évidées est présenté en parallèle. On peut constater qu'il n'y a pratiquement pas de changement pour les ponts de 1 et 2 voies mais que les valeurs sont augmentées pour les ponts à 3 et 4 voies. Ces modifications ont été rendues nécessaires par la découverte d'une erreur de calcul pour les cas de plus de deux voies qui a été introduite dans l'édition 2000 du Code. Les nouvelles équations correspondent la condition où c'est le cas de deux voies qui gouverne l'effort tranchant maximum pour les ponts plus larges, condition non considérée lors du développement de l'édition 2000. La Figure 3.4 illustre la condition généralement critique pour les ponts de deux voies ou plus pour obtenir l'effort tranchant maximum à l'appui, condition omise pour les éditions antérieures à celle de 2014.

On peut également constater que la valeur retenue pour les ponts de type dalle évidée, ouvrages généralement utilisés pour des portées excédant 20 m, donnent des valeurs supérieures à celles retenues pour les ponts de type dalle épaisse. Cette condition ne semble pas normale ou pas clairement justifiée : l'une ou l'autre condition devrait s'appliquer pour les deux types de tablier d'autant plus que les dalles évidées ont généralement des sections pleines près des appuis. Malgré ces améliorations pour l'édition 2014, il semble que l'effort tranchant devrait être augmenté davantage, comme illustré dans les sections suivantes.

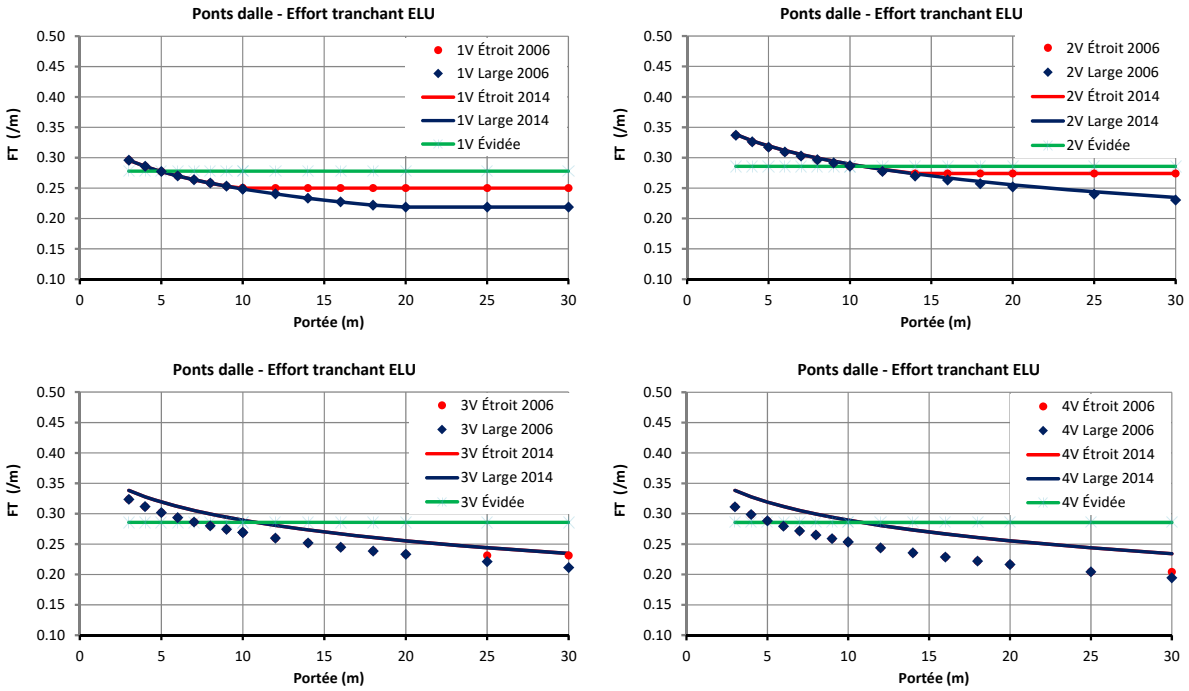


Figure 3.3 : Comparaison des ratios F_T pour les ponts de type dalle épaisse ou évidée
Effort tranchant ÉLU – Pour 1, 2, 3 et 4 voies – Voies étroites et larges

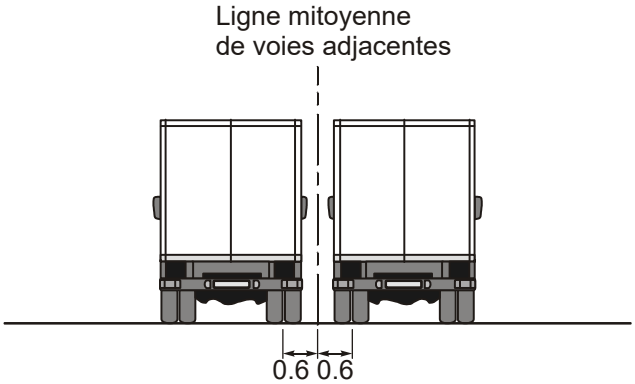


Figure 3.4 : Condition généralement critique à l'effort tranchant à l'ÉLU pour 2 voies et plus

3.3 ÉTUDE PARAMETRIQUE

3.3.1 PONTS SÉLECTIONNÉS

Les travaux présentés dans cette section ont été réalisés principalement par Patrick Théoret (Théoret 2010) dans le cadre de ses études de maîtrise supportées par le projet de recherche RDC CRSNG-Cima+. Ces résultats ont été publiés en partie dans le rapport final du projet R626.1 (Massicotte et al. 2012) portant sur les ponts biais. L'étude paramétrique réalisée par Théoret inclut l'analyse de 78 ponts droits.

Pour les ponts de type dalle pleine en béton armé, le choix des géométries retenues pour l'analyse paramétrique a été fait pour que l'échantillon soit représentatif des largeurs et portées des ponts de type dalle épaisse présents sur les routes et qui sont couverts par le Code CSA-S6 (2006). Les ponts simplement supportés sélectionnés sont d'une portée (L) variant de 3 à 20 m. L'épaisseur de la dalle (h) est choisie égale à $L/20$. Un module élastique de 27000 MPa (représentant un béton de 35 MPa) et un coefficient de Poisson de 0.2 ont été retenus pour calculer les propriétés des membrures de grillage.

À partir de la largeur de voie W_e , déterminée selon le nombre de voies spécifiées pour une largeur carrossable donnée dans le Code CSA-S6 (2006), les différentes largeurs de pont ont été choisies pour couvrir les ponts étroits avec des voies de circulations d'une largeur W_e de 3.3 m, qui est la largeur de voie minimale normalisée, et les ponts plus larges avec des voies de 3.9 m de largeur. Des dimensions additionnelles sont ajoutées pour s'assurer de couvrir toutes les possibilités de largeur de voies suivant les directives du Code CSA-S6 pour les voies de conception. La voie de 3.3 m de largeur est prise comme référence pour dériver les tendances de distribution de charge. L'analyse de ponts avec des voies plus larges (ou moins larges pour les ponts de deux voies uniquement) est incluse pour étudier l'influence des largeurs de voie sur la distribution. Les largeurs des ponts sélectionnés tiennent également compte de chasse-roues de 450 mm de largeur de chaque côté du pont. Pour chaque géométrie de pont sélectionnée, le nombre de voies n est choisi égal au nombre maximal de voies tel que spécifié par le Code. Cependant, toutes les combinaisons de voies chargées ont été considérées, de 1 à n voies, avec le facteur de simultanéité R_L correspondant. Six portées de 3, 5, 7, 10, 15 et 20 m ont été retenues de sorte qu'avec les 13 largeurs indiquées au Tableau 3.1, 78 géométries de ponts droits ont été modélisées et analysées dans cette étude paramétrique.

Tableau 3.1 : Paramètres considérés dans l'étude paramétrique

Largeur carrossable – W_c (m)	Nombre de voies (n)	R_L	B_{min} (m)	$B_{étroit}$ (m)	B_{large} (m)	B_{max} (m)
$W_c \leq 6.0$	1	1.0		4.2	4.8	6.8
$6.0 < W_c \leq 10.0$	2	0.9	6.9	7.5	8.7	10.9
$10.0 < W_c \leq 13.5$	2* ou 3*	0.9 ou 0.8		11.0	12.6	14.4
$13.5 < W_c \leq 17.0$	4	0.7		14.4	16.5	17.9

* : les deux sont considérés

3.3.2 MODÈLES DE GRILLAGE

Pour les géométries de ponts sélectionnées, les lignes directrices proposées par Hambly (1991) ont été suivies pour établir le nombre et l'espacement des éléments longitudinaux du grillage requis pour modéliser adéquatement un pont de type dalle en béton. Selon Hambly, ce paramètre est important car un maillage trop grossier peut manquer en précision dans sa reproduction du comportement de la structure, alors qu'un maillage trop fin introduit des pics artificiels dans les valeurs des efforts. Pour cette raison, la largeur maximale associée à un élément longitudinal du grillage est déterminée suivant la largeur sur laquelle la charge d'une ligne de roues se disperse. L'espacement transversal S_G maximal des éléments de grillage longitudinaux est donc déterminé comme la moitié de la largeur du gabarit d'un camion pour les éléments à l'intérieur du grillage (ce qui correspond à 3.0/2 = 1.5 m), et cette valeur additionnée de la largeur d'un chasse roue pour les éléments de rive du grillage (ce qui correspond à 3.0/2+0.45 ≈ 2.0 m). Il est également recommandé que l'espacement des membrures longitudinales soit moindre que le quart de la portée du pont pour permettre une distribution adéquate des charges entre les membrures longitudinales du grillage. Hambly recommande de plus que l'élément de rive du grillage soit placé à une distance de 0.3 h de la rive, où h est l'épaisseur de la dalle. Cette dernière recommandation qui tient compte du flux de cisaillement aux extrémités de la section de dalle, a été suivie dans les modèles de grillage analysés dans le cadre de ce projet.

L'espacement entre les éléments transversaux du grillage doit être déterminé pour avoir un nombre suffisant de membrures transversales dans le modèle pour permettre la distribution des charges entre les éléments longitudinaux. Toujours selon Hambly, l'espacement des membrures dans les deux directions du grillage doit être similaire lorsque possible afin de reproduire adéquatement le comportement bidirectionnel d'une dalle en béton. Pour simplifier le processus de modélisation des différentes géométries de ponts, il a été décidé dans ce projet de recherche d'utiliser un espacement fixe de 1.0 m entre les éléments transversaux. Cette valeur est relativement proche et plus petite que l'espacement choisi pour les éléments longitudinaux. Cela permet également de simplifier l'automatisation de la génération de modèles de grillages.

3.3.3 APPLICATION DES CHARGES VIVES

Les analyses de grillage sous les charges vives ont été réalisées avec le logiciel SAP2000 (CSI, 2009). La charge CL-625 spécifiée par le code CSA-S6 (2006) a été utilisée. La portion de véhicule reprise par chaque membrure longitudinale du grillage est déterminée par une distribution isostatique comme illustrée sur la Figure 3.5 ou S_G est l'espacement transversal des éléments du grillage longitudinaux.

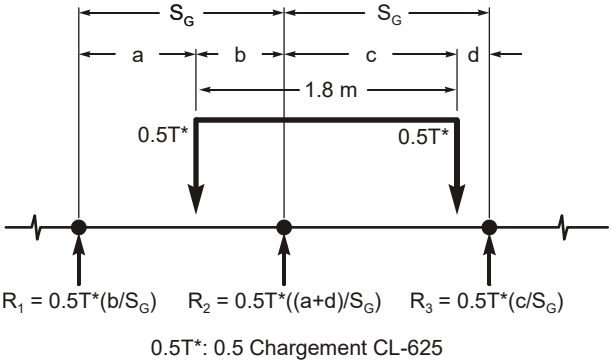


Figure 3.5 : Distribution transversale isostatique

Des cas de charges sont définis pour chaque combinaison de voies chargées et de positions transversales des camions à l'intérieur des voies. Afin de simplifier le processus pour éviter de considérer un nombre infini de possibilités de positions transversales des camions, il a été décidé de limiter les positions transversales de camions à l'intérieur de chaque voie à trois cas : extrême gauche, centre et extrême droite de la voie. Deux exemples de cas de charge pour un pont à 3 voies sont illustrés sur la Figure 3.6. Tous les cas de charges sont regroupés en différentes combinaisons et multipliés par leur facteur de simultanéité R_L respectif pour obtenir les enveloppes d'efforts maximaux pour tous les états limites et classes de routes prescrites dans le code CSA-S6 (2006).

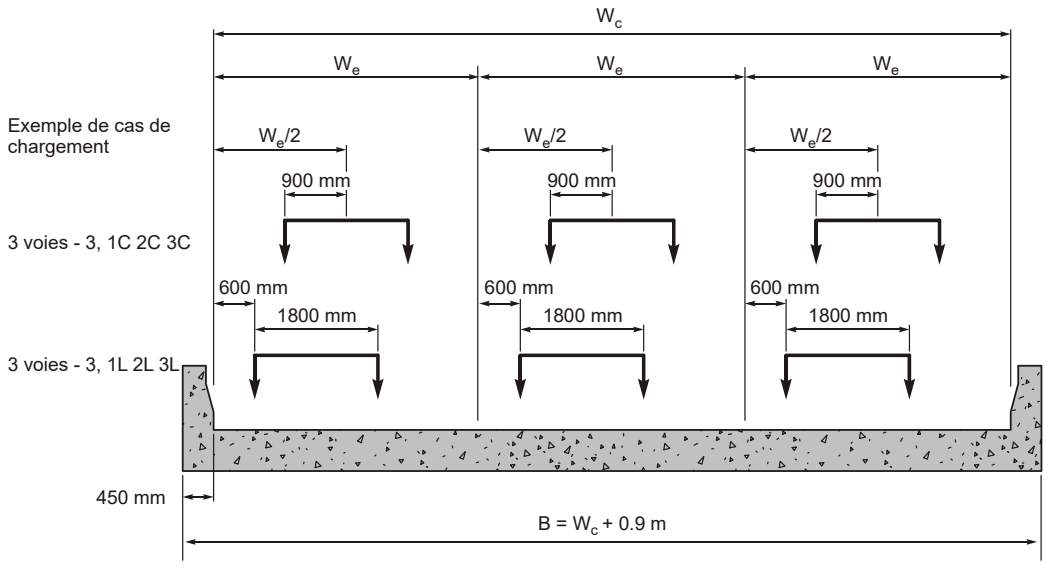


Figure 3.6 : Exemples de cas de charge pour un pont à 3 voies

3.3.4 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

Les résultats des analyses de Théoret sont comparés avec les équations retenues pour le code CSA-S6-14. La comparaison montrée sur la Figure 3.7 pour le moment fléchissant à l'état limite ultime (ÉLU), qui sont les mêmes pour l'état limite de service (ÉLS) et à l'état limite de fatigue (ÉLF), indique que les équations sont sécuritaire et pourraient être améliorées éventuellement. Toutefois la comparaison pour l'effort tranchant montrée sur la Figure 3.8 pour les ÉLU et ÉLF indique un large désaccord entre les valeurs du code et celles obtenues des analyses de grillage. Ce point sera revu à la section suivante.

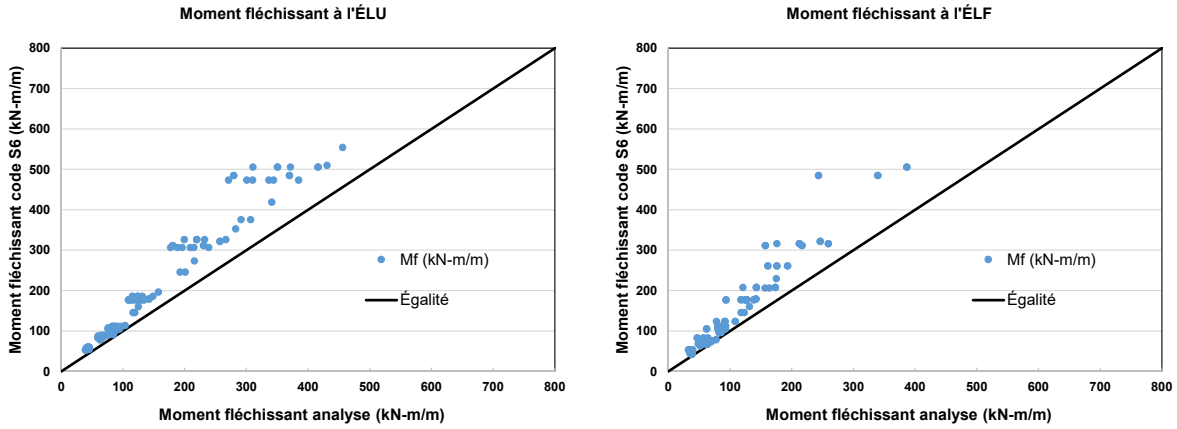


Figure 3.7 : Comparaison des ratios F_T pour les ponts de type dalle pleine
Moment l'ÉLU et à l'ÉLF – Pour 1, 2, 3 et 4 voies – Toutes largeurs de voies

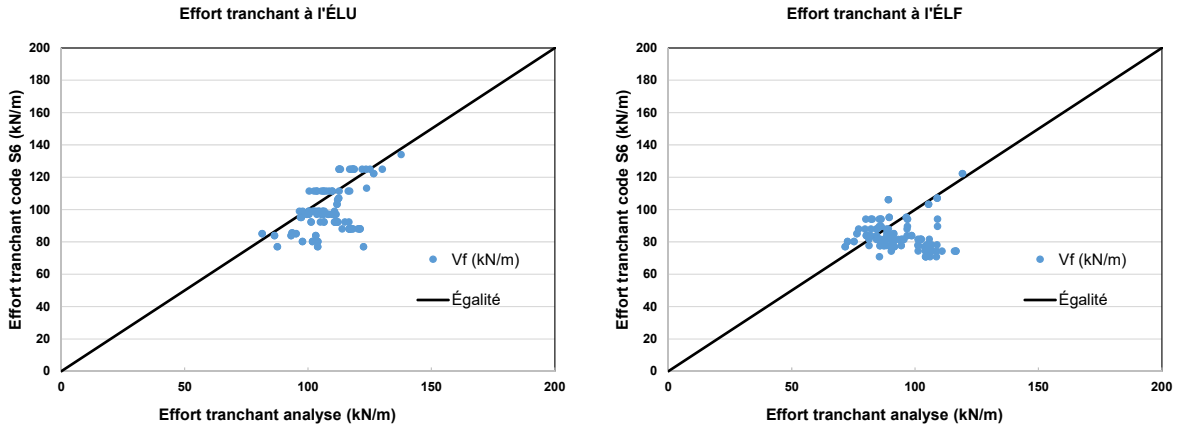


Figure 3.8 : Comparaison des ratios F_T pour les ponts de type dalle pleine
Effort tranchant l'ÉLU et à l'ÉLF – Pour 1, 2, 3 et 4 voies – Toutes largeurs de voies

3.4 ÉTUDES MODELES RAFFINES

3.4.1 CAS CONSIDÉRÉS

Deux séries d'analyses raffinées ont été réalisées dans le cadre de ce projet dans le but d'étayer les modifications préconisées pour la résistance à l'effort tranchant : des analyses de référence d'un pont type, afin de comparer les résultats obtenus de divers modèles raffinés, et des analyses de ponts réels sélectionnés par la direction des Structures. Dans ce dernier cas, les analyses raffinées (grillage, éléments finis plaques et éléments finis solides) ont été réalisées par plusieurs ingénieurs : Dennis Bascopé (Cima+), David Conciatori (Polytechnique), Jean Grenier (DS). Le

Tableau 3.2 présente les ponts analysés (avec une identification réduite).

Tableau 3.2 : Géométries des ponts considérés et méthodes d'analyse raffinée retenues

Identification	L (m)	B (m)	n	*Grillage grossier*	*Grillage raffiné*	*EF plaques*	*EF solides 3D*
P51	11	11	2	X	X	X	X
P51	11	11	3	X		X	
P51	5	11	2				X
P51	22	11	2		X		X
P51	22	11	3		X		
P51	11	4	1	X			
P51	11	7	2	X			
P77	6	11	2 et 3	X			
P77	6	4	1	X			
P77	6	7	2	X			
P77	8	11	2 et 3	X			
P49	7	13	2 et 3	X			
P63	34	13	2 et 3	X			
P99	14	11	2 et 3	X			

3.4.2 ANALYSES DE RÉFÉRENCE

Les résultats présentés dans cette section visent à comparer les résultats de différentes méthodes d'analyses raffinées. Les réactions d'appui et l'effort tranchant sont indiqués pour un pont de 11 m de largeur pouvant être considéré pour 2 ou 3 voies. La Figure 3.9 présente le cas d'une charge uniforme. La Figure 3.10 présente le cas des essieux 2, 3 et 4 du CL-625 avec l'essieu 2 positionné à 0.5 m de l'appui pour un seul camion situé dans la voie de gauche. La Figure 3.11 présente deux cas, un pont très court avec une voie chargée et un pont plus long avec deux voies au centre.

On constate que les méthodes raffinées, sauf les grillages, conduisent à une concentration des efforts près des bords. L'étude de l'effet de bord a été présentée dans une étude précédente (Massicotte et al. 2012). Il faut retenir, pour le pont de 11 m de portée, que la condition de deux voies conduit à un effort tranchant de 90 kN/m (facteur d'amplification dynamique et coefficient de simultanéité inclus), ce qui correspond à un facteur d'essieu de 0.26 pour les charges appliquées alors que la méthode simplifiée donne une valeur de 0.28. Il convient de noter qu'il s'agit d'un pont suffisamment large pour contenir trois voies. Un pont plus étroit aurait conduit à un facteur d'essieu plus élevé, comme illustré à la section suivante.

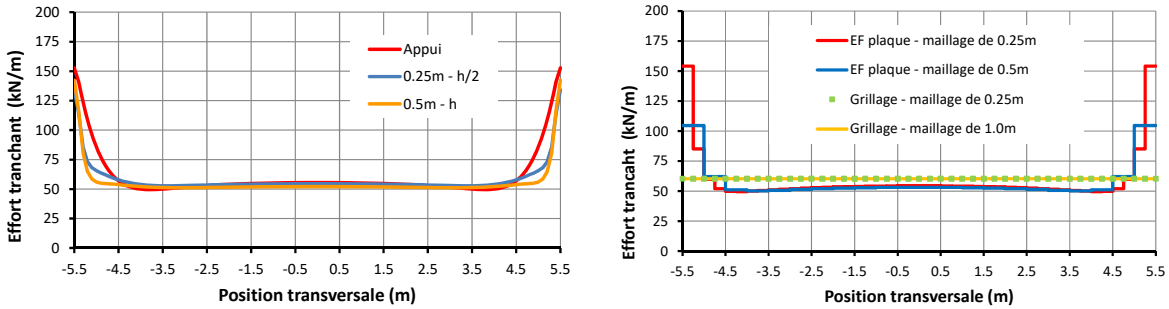


Figure 3.9 : Pont P-51 L = 11 m et B = 11m – Charge uniforme

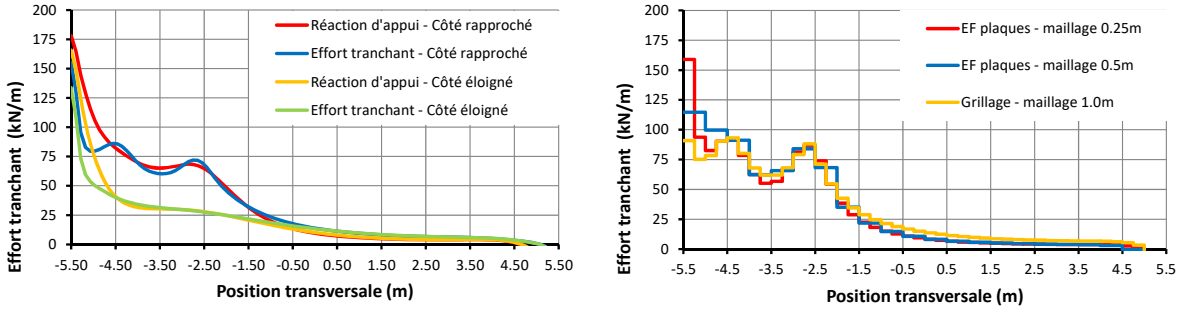
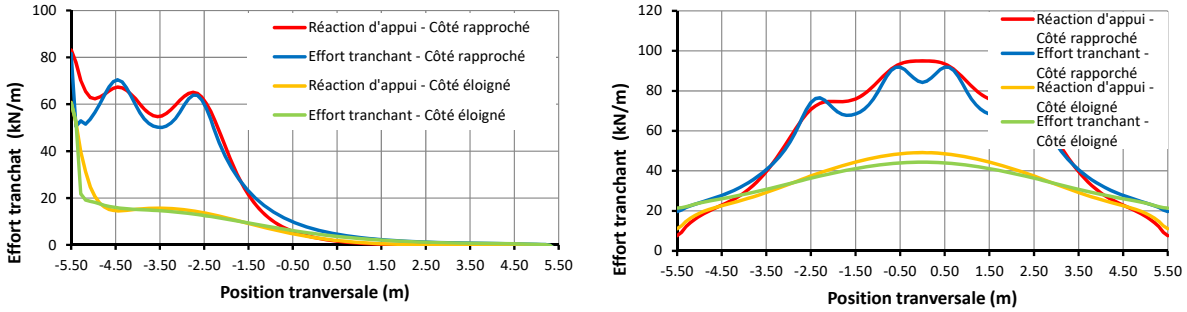


Figure 3.10 : Pont P-51 L = 11 m et B = 11m – Charge vive dans la voie de gauche – I_D inclus



a) Pont L = 5 m et B = 11m
Voie de gauche

b) Pont L = 11 m et B = 11m
2 voies au centre

Figure 3.11 : Pont P-51 – EF plaques – Charges vives

3.4.3 ANALYSES DE PONTS SPÉCIFIQUES

Les résultats des analyses des ponts indiqués au Tableau 3.2 sont présentés sur la Figure 3.12 où sont également présentés les résultats obtenus de l'étude de Théoret (2010) pour les valeurs les plus critiques ainsi que les valeurs retenues pour le CSA-S6-14.

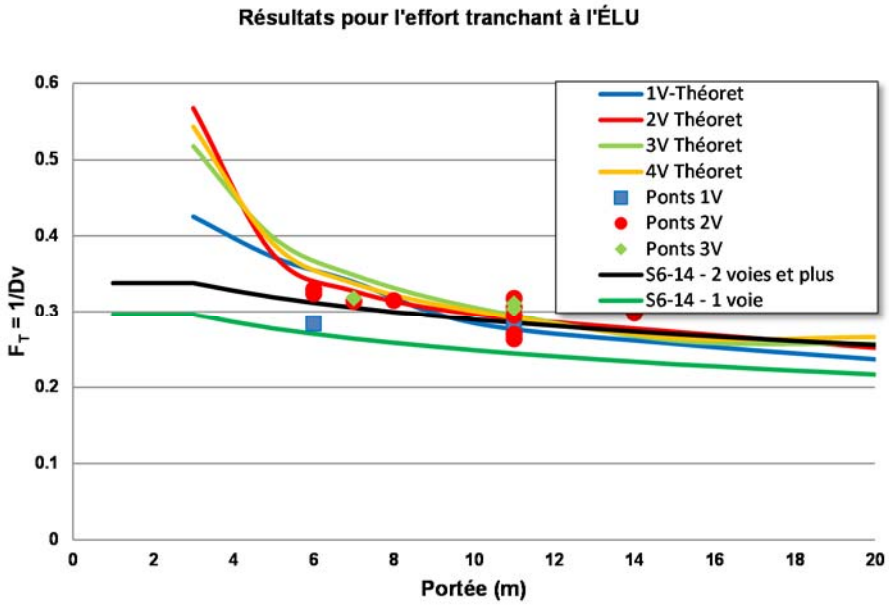


Figure 3.12 : Sommaire des résultats d'analyse à l'ÉLU

Le premier auteur de ce rapport est d'avis que les équations sélectionnées, développées par Smith à partir de la norme AASHTO, devraient être modifiées. Les principes suivants pourraient être considérés :

- des calculs pour une portée de 3 m indiquent que les valeurs de Théoret sont probablement un trop élevées, la valeur 0.45 étant plus réaliste;
- par contre les mêmes analyses permettent d'arriver à la conclusion que pour une portée de 5 m, une valeur de 0.40 serait appropriée, ce qui est assez près des résultats de Théoret;
- un facteur tenant compte de la largeur du tablier pourrait être considéré car cela affecte différemment les essieux éloignés de l'appui;
- la valeur minimale pour des longues portées devrait tendre vers les valeurs des dalles évidées;
- la longueur considérée dans les équations devrait être celle de la travée considérée et non de la travée équivalente car les facteurs sont calculés pour la condition où les essieux critiques sont près des appuis, aspect qui reste à être validé.

La Figure 3.13 compare les résultats des analyses raffinées à deux relations suggérées dans cette étude pour le calcul de D pour des ponts étroits (voies de 3.3 m). Des études

additionnelles, incluant des analyses non linéaires devraient être réalisées pour valider les équations du code CSA-S6 pour l'effort tranchant.

$$D = 4.0 - \frac{6.0}{L_e} \geq 2.8 \text{ et} \leq 3.60 \qquad \text{pour } n = 1 \qquad (3.5)$$

$$D = 4.0 - \frac{7.3}{L_e} \geq 2.25 \text{ et} \leq 3.50 \qquad \text{pour } n \geq 2 \qquad (3.6)$$

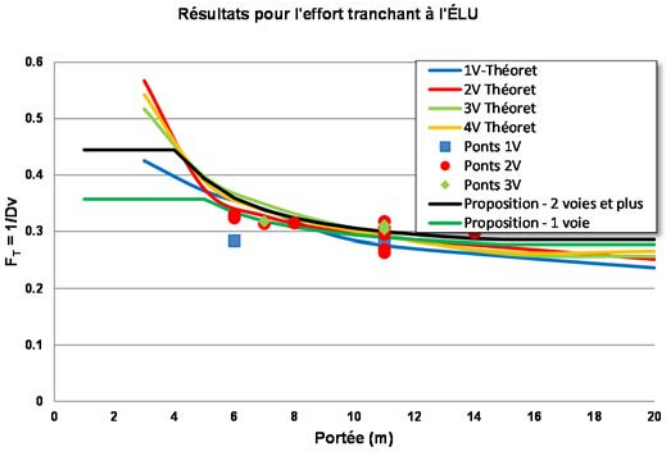


Figure 3.13 : Solution alternative à l'ÉLU

3.5 SOMMAIRE DES RESULTATS

Les analyses raffinées élastiques des ponts de type dalle épaisses conduisent à des résultats qui excèdent de manière importante les valeurs obtenues de méthodes simplifiées pour l'effort tranchant pour les portées de moins de 10m. Pour les portées de plus de 15 m, les valeurs obtenues de l'étude de Théoret (2010) pour les dalles épaisses correspondes à celles de la méthode simplifiée pour les dalles évidées. Cependant les équations retenues dans le Code pour les dalles épaisses sont inférieures à celles des dalles évidées pour les portées de plus de 15 m.

Il est anormal que la méthode simplifiée conduise à des résultats moindres que ce qu'indiquent les méthodes raffinées. Ainsi l'étude de la répartition des efforts de service ainsi que de la résistance à l'effort tranchant des dalles épaisse devrait se poursuivre en étudiant des conditions réelles d'appui et les effets de la fissuration.

La détermination de L_e pour les portées continues devrait également faire l'objet d'études car il est probable qu'une seule valeur par travée soit suffisante, fort probablement égale à la portée.

4 PONTS DE TYPE DALLE SUR POUTRES

4.1 GENERALITE

Ce chapitre est divisé en trois parties principales. Tout d'abord les équations des versions des 2006 et 2014 du Code sont comparées. Ensuite, la section suivante présente la détermination des paramètres de l'étude paramétrique réalisée principalement par Patrick Théoret dans le cadre de ses études de maîtrise et du projet RDC CRSNG-Cima+. La dernière section compare les résultats de l'étude de Théoret à la méthode simplifiée du code CSA-S6-14. Une dernière section présente les conclusions et recommandations.

4.2 COMPARAISON DES EDITIONS 2006 ET 2014 DU CODE CSA-S6

4.2.1 FORMULATION

Les équations donnant les facteurs d'essieu F_T des normes 2006 et 2014 s'expriment comme suit :

$$F_{T_2006} = \frac{SN}{F\left(1+\mu C_f/100\right)}\frac{nR_L}{N} \geq 1.05\,\frac{nR_L}{N} \qquad \text{à l'ÉLU et à l'ÉLS} \qquad (4.1)$$

$$F_{T_2006} = \frac{SN}{F\left(1+\mu C_f/100+C_e/100\right)}\frac{1}{N} \geq 1.05\,\frac{1}{N} \qquad \text{à l'ÉLF} \qquad (4.2)$$

$$F_{T_2014} = \frac{S}{D_T\,\gamma_c\left(1+\mu\lambda\right)} \geq 1.05\,\frac{nR_L}{N} \qquad \text{à l'ÉLU et à l'ÉLS} \qquad (4.3)$$

$$F_{T_2014} = \frac{S}{D_T\,\gamma_c\left(1+\mu\lambda+\lambda_e\right)} \geq 1.05\,\frac{1}{N} \qquad \text{à l'ÉLF} \qquad (4.4)$$

Les paramètres C_f et λ ont la même définition mais diffèrent légèrement entre les deux normes. Le paramètre μ a la même définition dans les deux éditions. Les paramètres C_e et λ_e sont identiques.

4.2.2 COMPARAISONS AVEC LES NORMES ANTÉRIEURES

La Figure 4.1 compare les valeurs de D obtenues de diverses normes canadiennes en vigueur depuis les 30 dernières années pour les poutres intérieures à l'ÉLU. Ces valeurs sont comparées aux valeurs critiques obtenues des analyses de Théoret (2010). On peut constater les valeurs de D des normes CSA-S6 2006 et 2014 sont comparables et nettement du côté sécuritaire par rapport aux analyses. Par contre les équations de la norme de l'Ontario (MTO, 1993) et de la norme S6-88 (CSA, 1988) donnent des valeurs de D moins conservatrices.

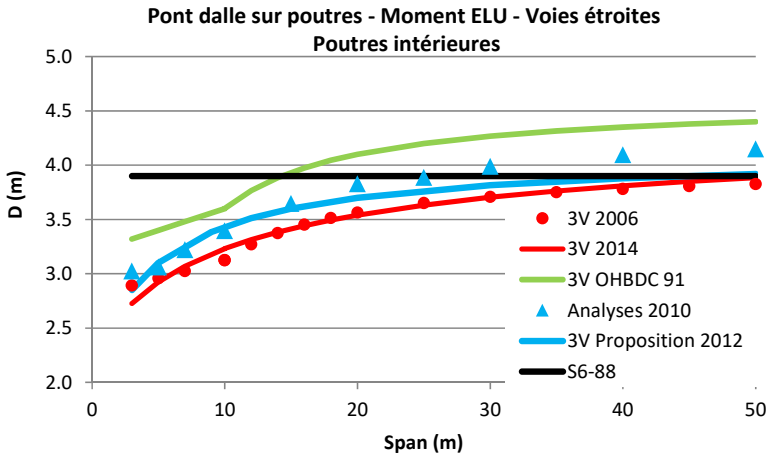


Figure 4.1 : Valeurs de D ou D_T selon diverses normes canadiennes

Les figures suivantes comparent les valeurs de F_T/S pour le moment fléchissant pour les ponts de 1 à 4 voies à l'ELU et l'EFL pour voies étroites ou larges des éditions 2006 et 2014. On peut conclure que les nouvelles équations de la méthode simplifiée conduisent à des résultats pratiquement égaux à deux de la norme 2006 pour la flexion.

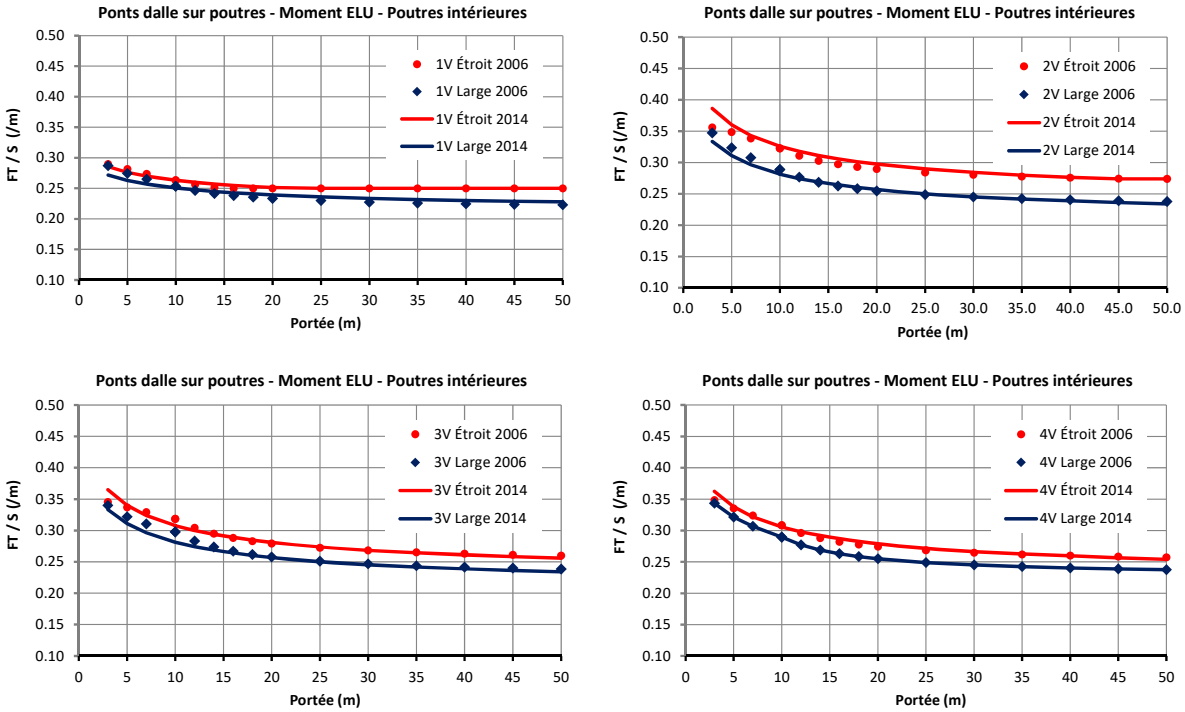


Figure 4.2 : Comparaison des ratios F_T/S pour les ponts de type dalle sur poutres Moment ÉLU – Poutres intérieures pour 1, 2, 3 et 4 voies – Voies étroites et larges

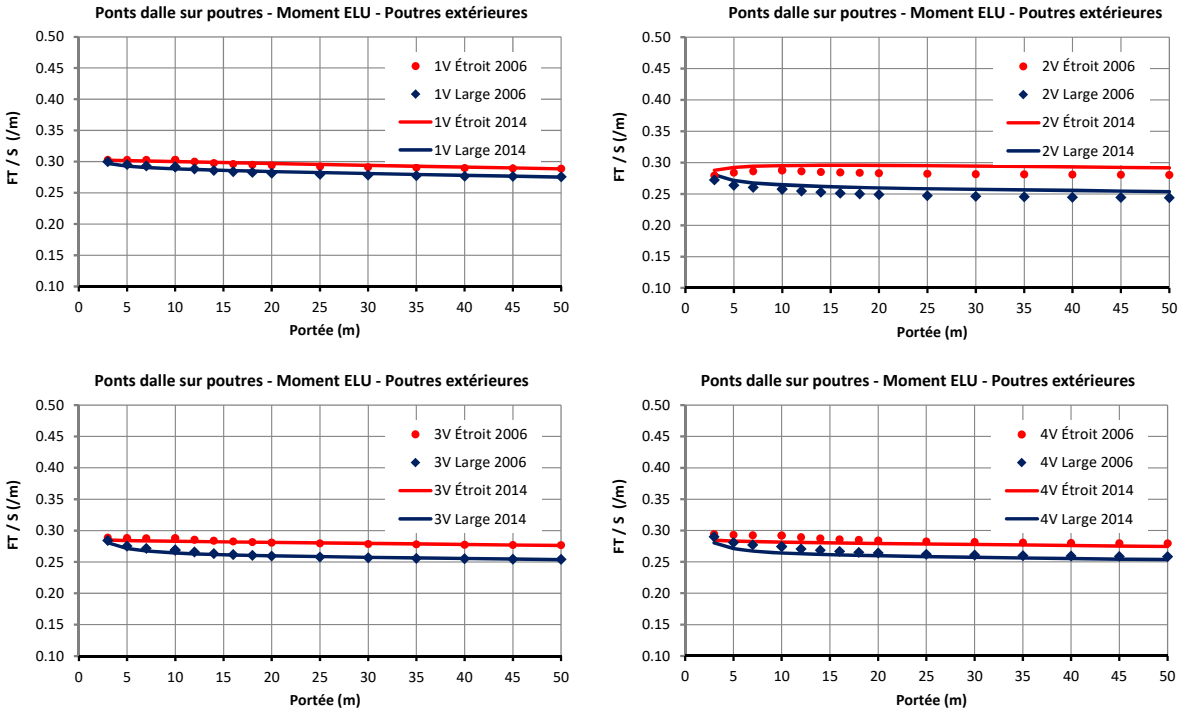


Figure 4.3 : Comparaison des ratios F_T/S pour les ponts de type dalle sur poutres Moment ÉLU – Poutres extérieures pour 1, 2, 3 et 4 voies – Voies étroites et larges

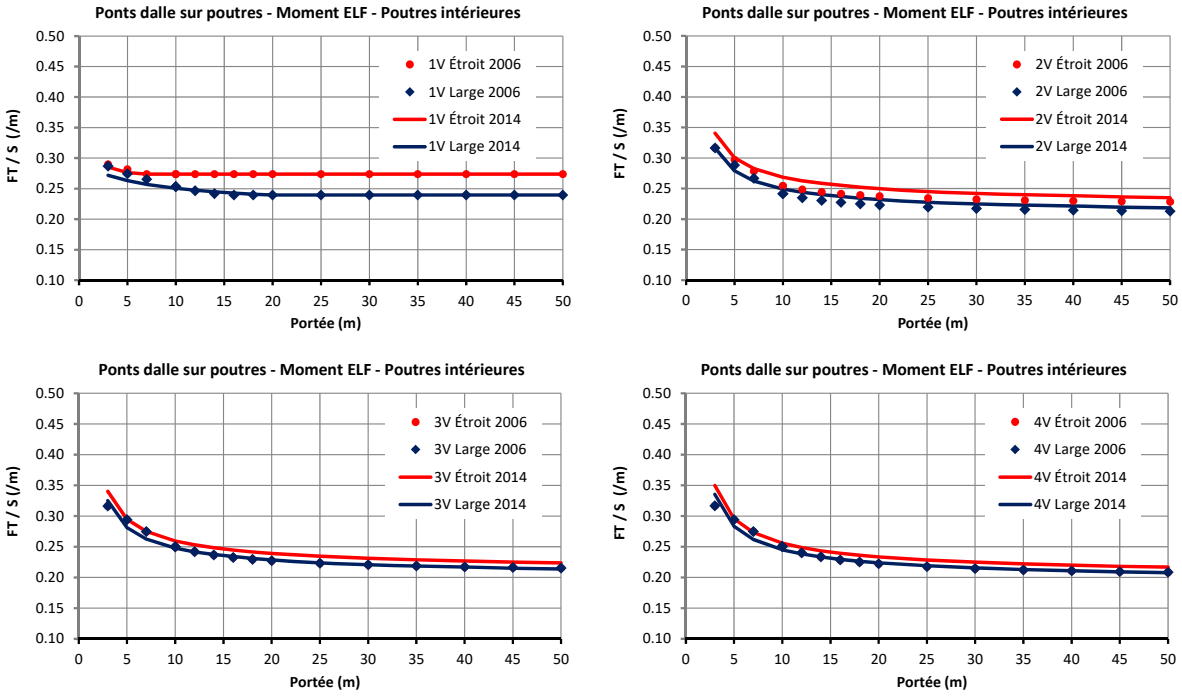


Figure 4.4 : Comparaison des ratios F_T/S pour les ponts de type dalle sur poutres Moment ÉLF – Poutres intérieures pour 1, 2, 3 et 4 voies – Voies étroites et larges

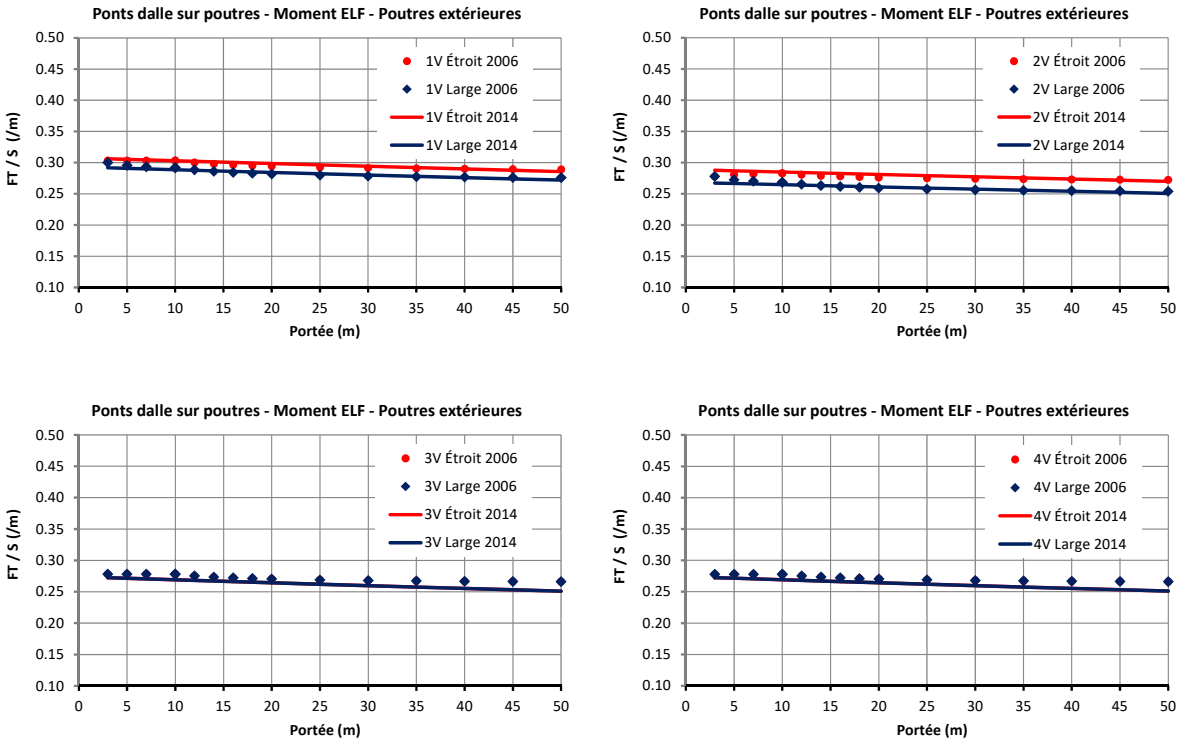


Figure 4.5 : Comparaison des ratios F_T/S pour les ponts de type dalle sur poutres Moment ÉLF – Poutres extérieures pour 1, 2, 3 et 4 voies – Voies étroites et larges

Pour l'effort tranchant, la valeur de D_T ne varie pas avec la portée. Les valeurs retenues pour l'édition 2014 sont identiques à celles de l'édition 2016.

4.3 ÉTUDE PARAMETRIQUE

4.3.1 GÉNÉRALITÉS

Les travaux présentés dans cette section ont été réalisés principalement par Patrick Théoret (Théoret, 2010) dans le cadre de ses études de maîtrise et du projet RDC CRSNG-Cima+. Ces résultats n'ont jamais été publiés car ils n'ont pas été inclus dans son mémoire de maîtrise. La portée de l'étude a toutefois été mentionnée dans le rapport final du projet R626.1 (Massicotte et al. 2012) sans toutefois que cette étude n'y soit été reliée (le Ministère n'avait pas contribué financièrement à l'étude des ponts de type dalle sur poutres).

L'étude paramétrique réalisée par Théoret inclut l'analyse de 3283 ponts droits synthétiques dont les propriétés ont été élaborées à partir d'une base de données de ponts existants.

4.3.2 BASE DE DONNÉES

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 a été constituée afin de déterminer les caractéristiques géométriques types de ponts. Au total 123 ponts ont été considérés : 35 ponts mixtes en acier avec poutres en I, 31 ponts en béton avec poutres en I et 57 ponts avec des poutres monolithiques en T en béton. Les informations relatives à ces ponts sont données à l'Annexe 1.

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: la rigidité flexionnelle (EI) et la rigidité torsionnelle (GJ). La Figure 4.6, la Figure 4.7 et la Figure 4.8 illustrent la variation de ces propriétés en fonction de la portée des travées et du type de poutres.

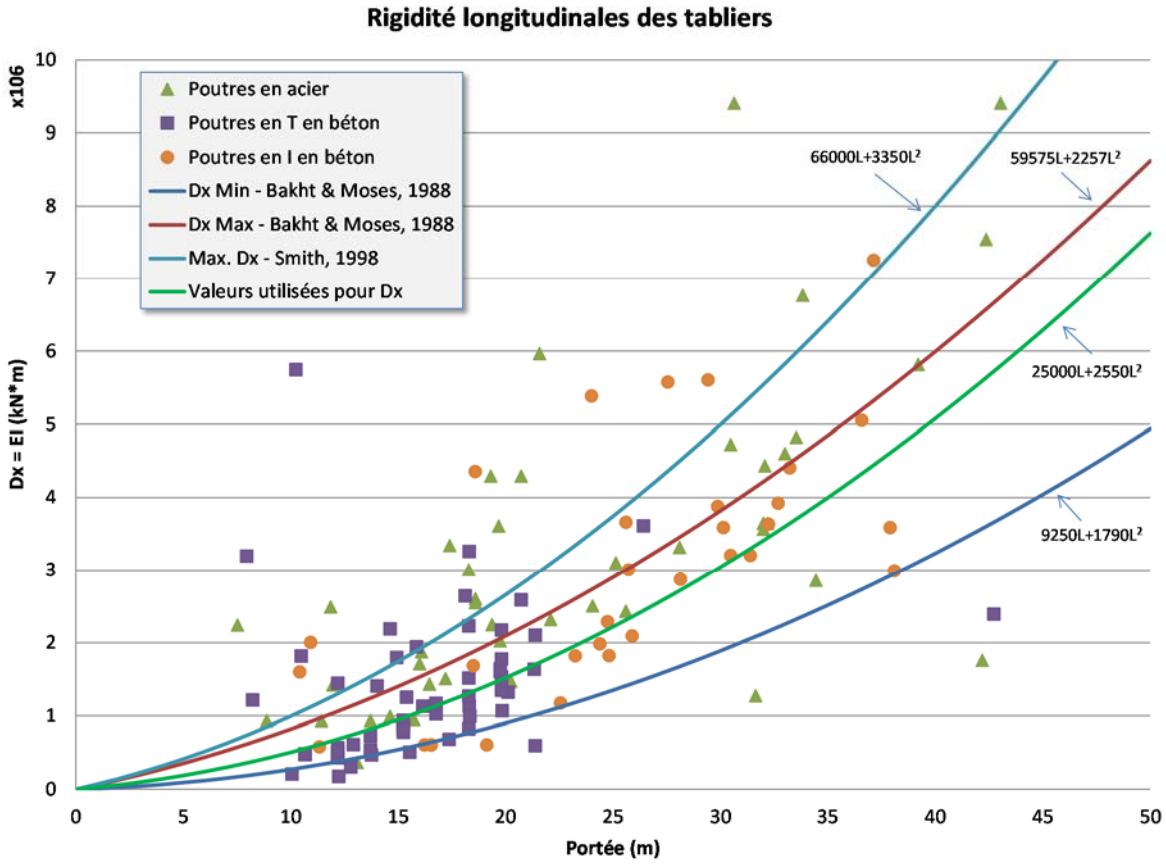


Figure 4.6 : Variation de la rigidité flexionnelle longitudinale selon le type de tablier

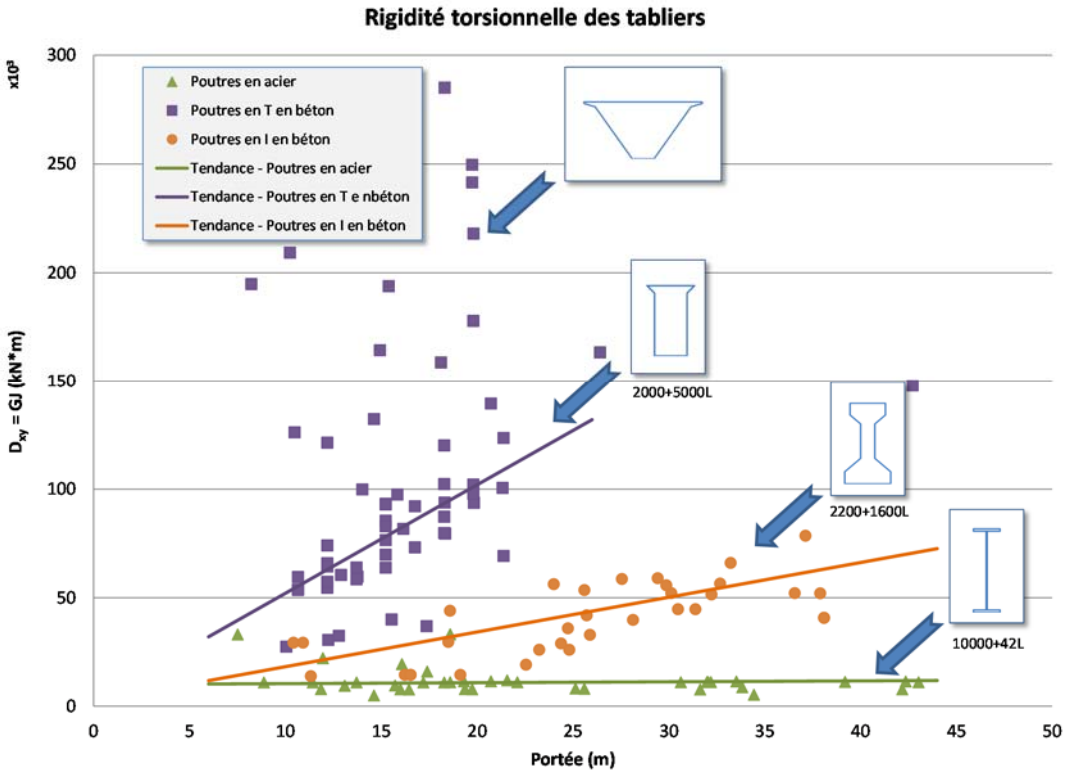


Figure 4.7 : Variation de la rigidité torsionnelle longitudinale selon le type de tablier

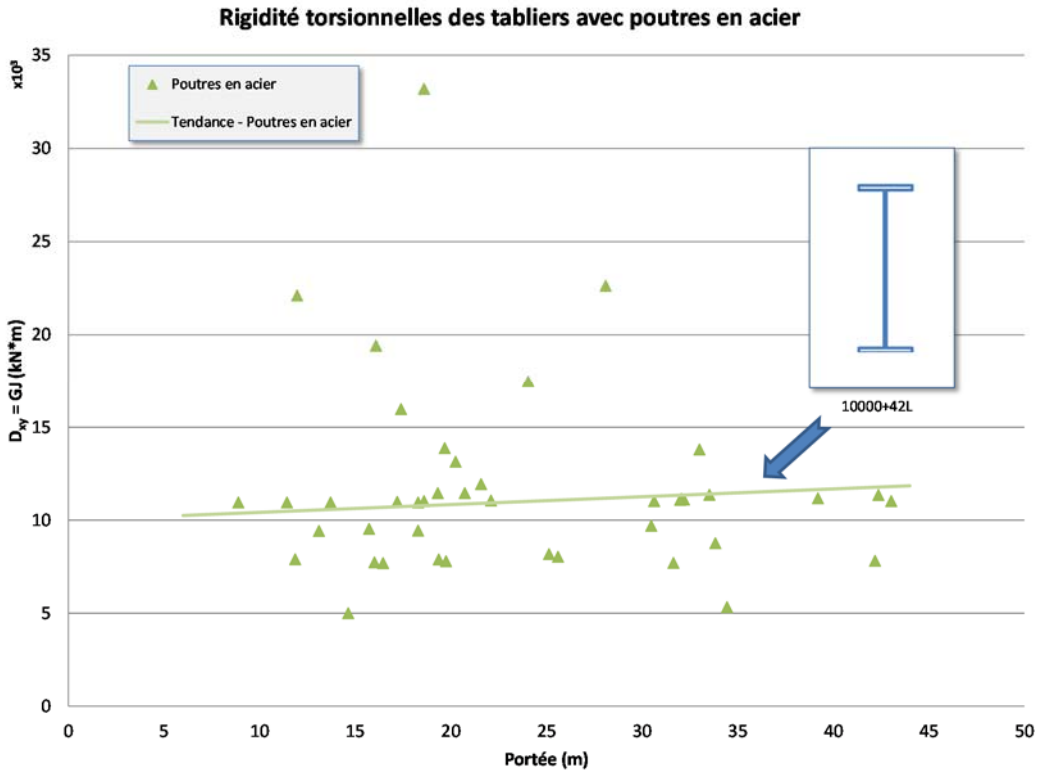


Figure 4.8 : Variation de la rigidité torsionnelle longitudinale pour les tabliers mixtes acier-béton

4.3.3 DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DES PONTS SYNTHÉTIQUES

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 :

$$D_{x-min} = 9250\,L + 1790\,L^2 \tag{4.5}$$

$$D_{x-max} = 59575\,L + 2257\,L^2 \tag{4.6}$$

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 :

$$D_{x-Smith} = 66000\,L + 3500\,L^2 \tag{4.7}$$

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

$$D_{x-Retenu} = 25000\,L + 2550\,L^2 \tag{4.8}$$

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. Les différentes relations sont présentées sur la Figure 4.6.

$$I_x = \frac{D_x\,S}{E} \tag{4.9}$$

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 la Figure 4.7 et la Figure 4.8 ont été utilisées dans la présente étude selon le type de poutre, où les unités sont les kN et les m :

$D_{xy} = 10\ 000\ + 42\,L$ pont mixte, dalle de béton sur poutres d'acier en I (4.10)

$D_{xy} = 2200\ + 1600\,L$ pont mixte, dalle de béton sur poutres de béton en I (4.11)

$D_{xy} = 2000 + 5000\,L$ pont avec poutre monolithique en T en béton (4.12)

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. Les différentes relations sont présentées sur la Figure 4.7 et la Figure 4.8.

$$J_{xy} = \frac{D_{xy}\,S}{G} \tag{4.13}$$

Dans tous les modèles une dalle de 200 mm a été utilisée. Aucun contreventement ou diaphragme n'ont été utilisés dans les analyses.

4.3.4 GÉNÉRATION DES MODÈLES ET CAS DE CHARGE CONSIDÉRÉS

À l'aide des équations précédentes, 3283 ponts droits synthétiques ont été créés, répartis comme suit : 1623 ponts mixtes avec dalle de béton sur poutres d'acier en I, 848 ponts mixtes, dalle de béton sur poutres de béton en I, et 812 ponts avec poutre monolithique en T en béton. Pour chaque pont, 4 géométries avec biais ont été analysées. Les résultats pour les ponts biais ont été présentés dans une étude antérieure (Massicotte, et. al, 2012). Les différentes combinaisons de géométries sont données dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Paramètres considérés dans l'étude paramétrique

Nombre de voies (n)	Nombre de poutres (N)	W_e (m)	L (m)	$\psi°$
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

La description de la méthodologie est la même que celle adoptée pour les ponts de type dalle épaisse présentée au chapitre 3. Les différents cas de charge considérés sont présentés à l'Annexe 2.

4.4 SOMMAIRE DES ANALYSES

4.4.1 PARAMÈTRES CONSIDÉRÉS

Les résultats présentés dans les graphes des deux sections suivantes donnent une idée des possibilités de traitement des données. En effet les résultats sont contenus dans une base de données qui considère les paramètres suivants :

- la portée L, de 3 à 60 m;
- le nombre de voies n, de 1 à 4;
- le nombre de poutres N, de 3 à 12;
- l'espacement des poutres S, de 0.7 à 6.0 m;
- le type de poutres, en I en acier, en I en béton et en T en béton;
- la largeur de voie W_e, de 3.0 à 5.9 m (selon le nombre de voies);
- la longueur du porte-à-faux S_c , 0.5S ou 0.6S;
- la position des poutres, intérieures ou extérieures;
- l'état limite, ultime (ÉLU) ou fatigue (ÉLF);
- la classe de la route, A&B ou C&D.

Les résultats est la base de données permettent d'identifier le degré de précision des équations du Code S6-14, calquées sur l'édition 2006. Cet outil pourra permettre d'améliorer les équations pour l'édition 2019, en supposant que les paramètres de simultanéité de chargement (facteur R_L) demeureront inchangés. De plus, ces résultats ne sont que pour des portées simples. Seuls quelques paramètres seront considérés ici pour fins d'illustration. Un outil de post-traitement des résultats de l'étude de Théoret (2010) a été développé par Vincent Lefour dans le cadre de son projet de maîtrise (Lefour 2017).

4.4.2 MOMENT FLÉCHISSANT

L'ensemble de résultats à l'ÉLU est présenté sur la Figure 4.9. Les résultats sont présentés selon le nombre de voies sur la Figure 4.10, pour les poutres en acier sur la Figure 4.11 et pour les poutres en béton sur la Figure 4.12. La Figure 4.13 compare l'ensemble des résultats à l'état limite de fatigue.

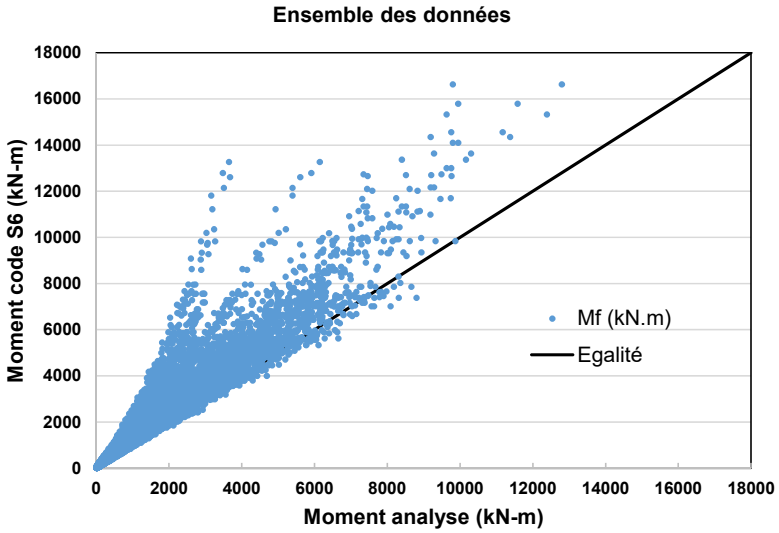


Figure 4.9 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU – Ensemble des données

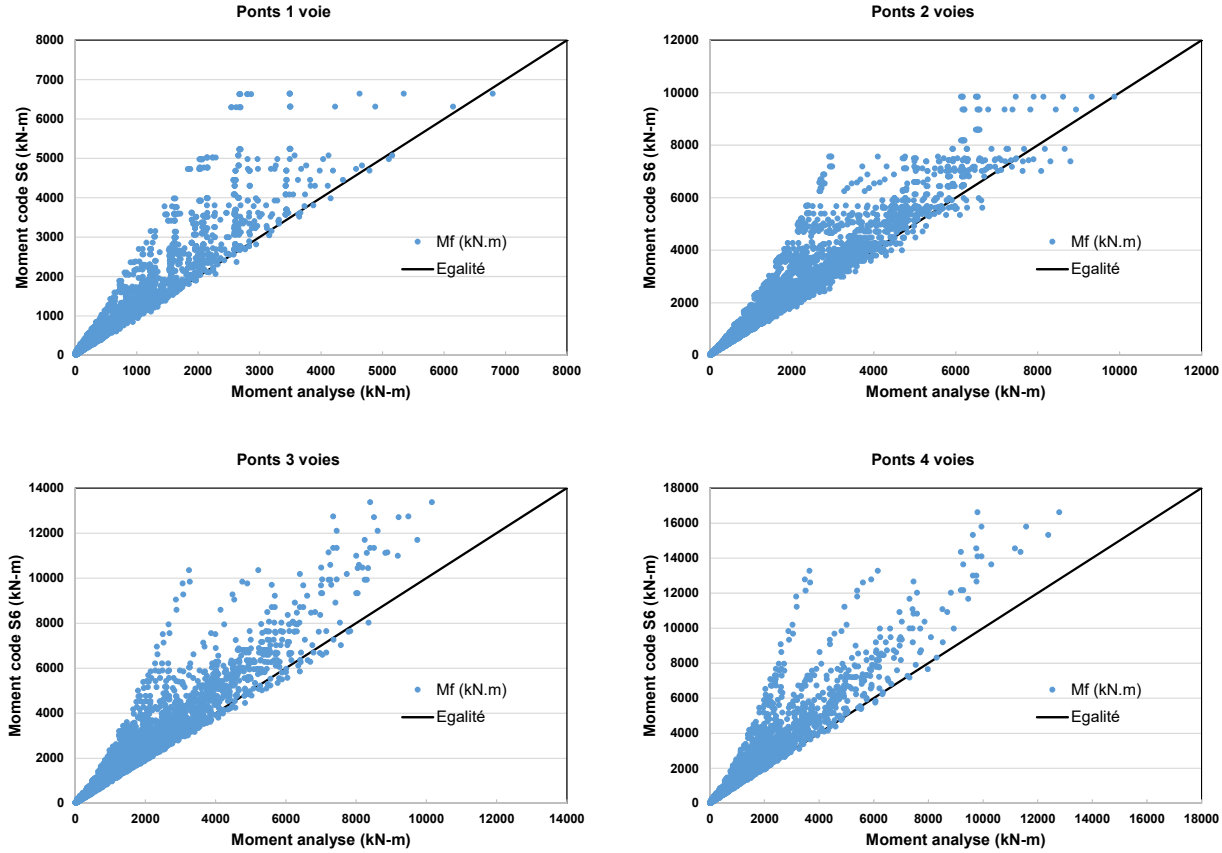


Figure 4.10 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU – Selon le nombre de voies

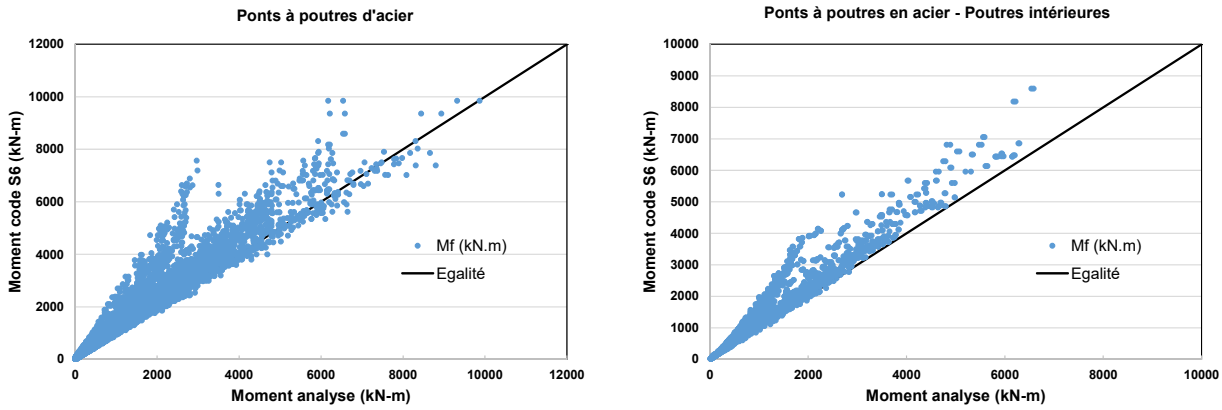


Figure 4.11 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU – Poutre en acier

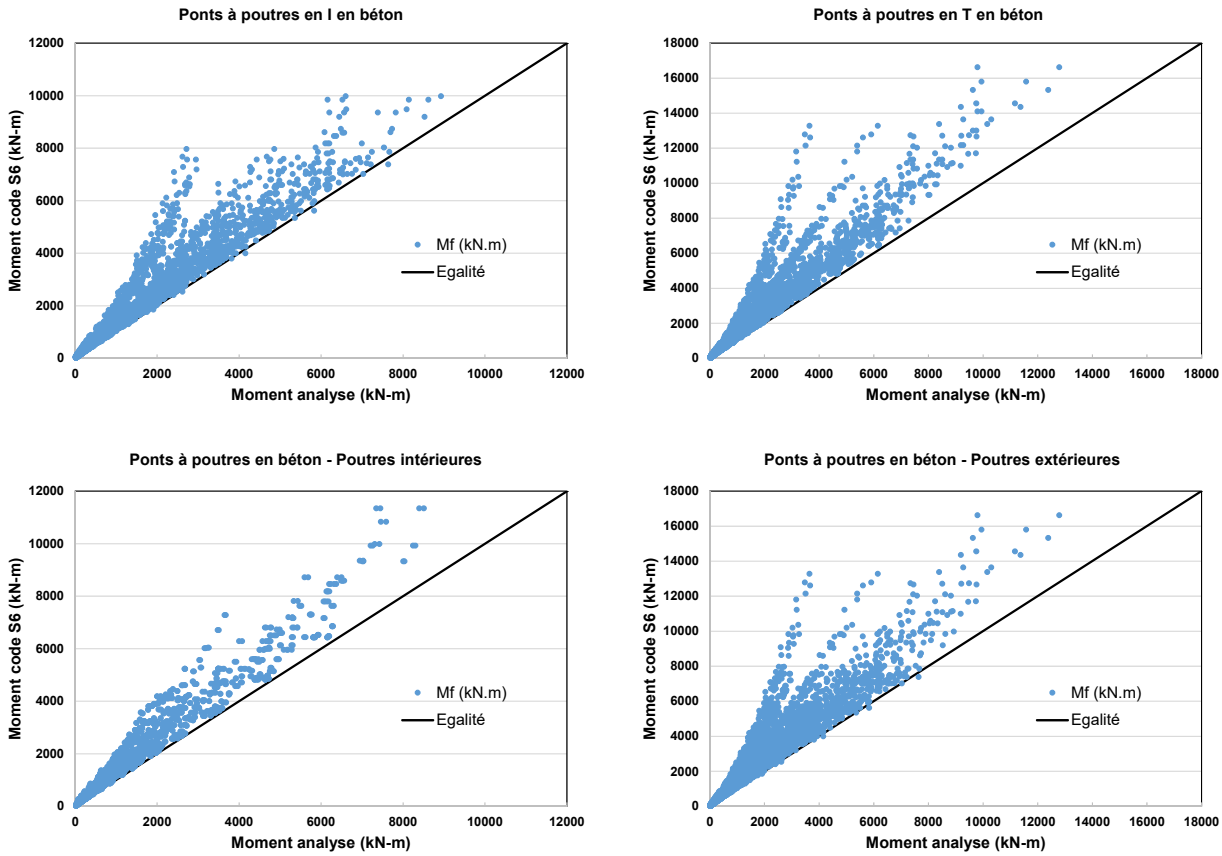


Figure 4.12 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU – Poutre en béton

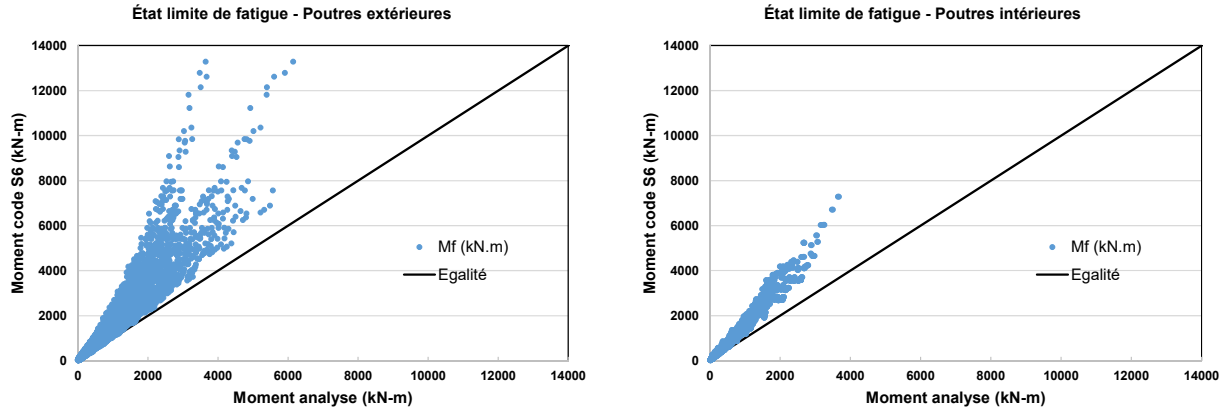


Figure 4.13 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLF – Ensemble des données

4.4.3 EFFORT TRANCHANT

L'ensemble des résultats à l'ÉLU est présenté sur la Figure 4.14. Les résultats à l'ÉLU sont présentés pour les poutres intérieures ou extérieures sur la Figure 4.15 à l'ÉLU alors que Figure 4.16 compare les résultats à l'ELF pour les poutres intérieures ou extérieures.

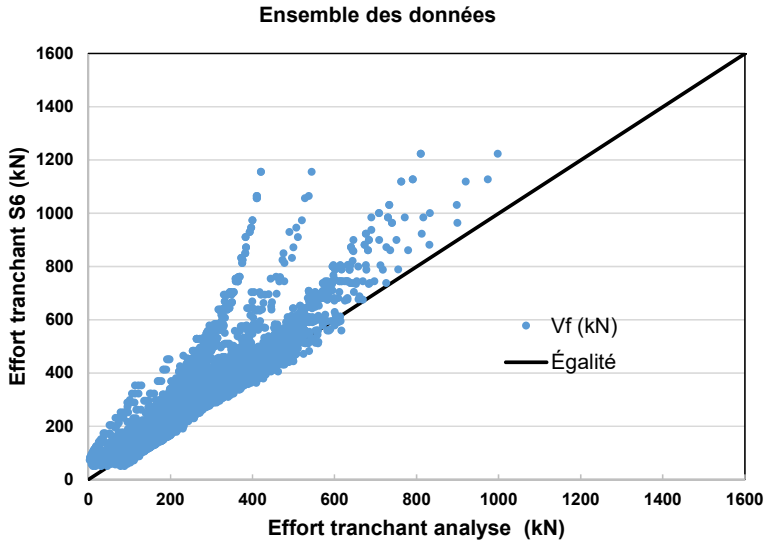


Figure 4.14 : Comparaison des valeurs de l'effort tranchant – Ensemble des données

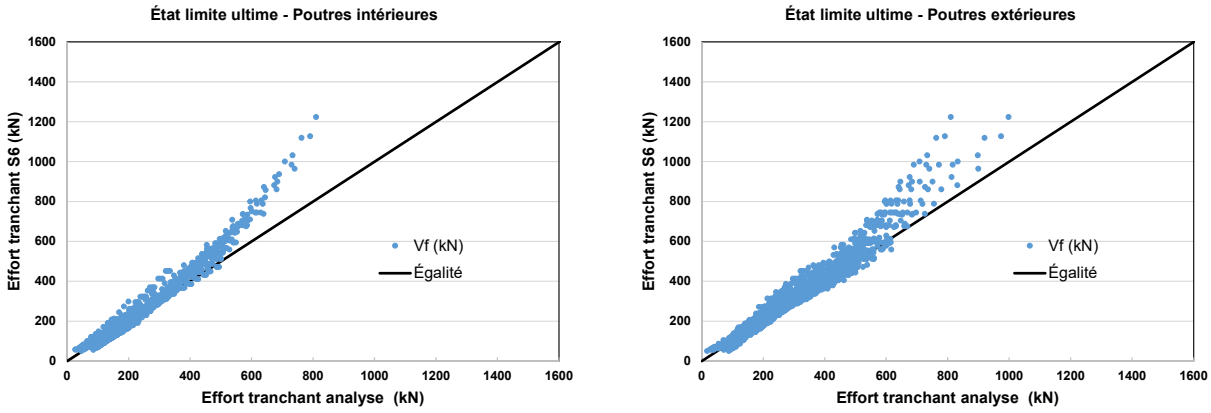


Figure 4.15 : Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU

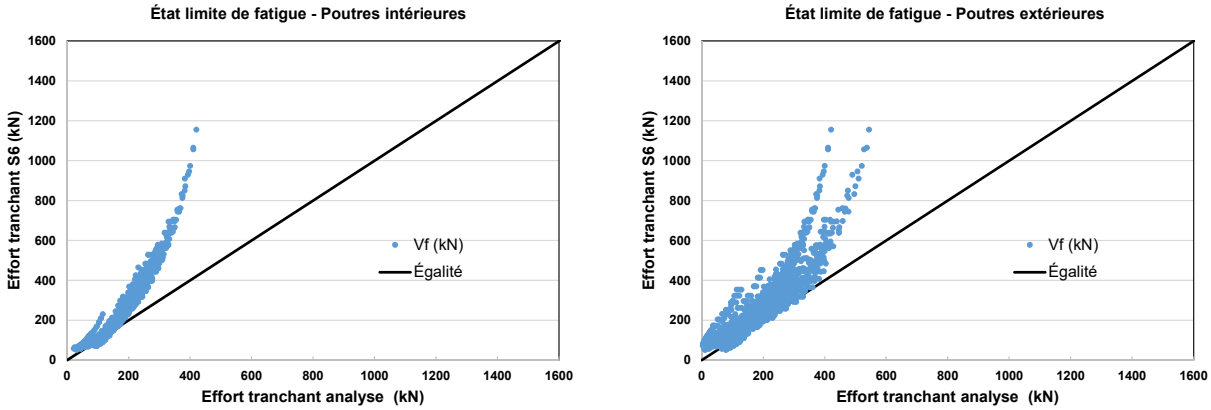


Figure 4.16 : Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF

4.5 SOMMAIRE DES RESULTATS

Les analyses de grillages de plusieurs ponts simplement supportés indiquent que la méthode simplifiée conduit à des résultats sécuritaires. Plusieurs aspects de la méthode pourraient être améliorés. Une proposition à cet effet avait été proposée (Massicotte et al, 2010) mais n'a pu être introduite en temps pour l'édition 2014. La grande dispersion des résultats et la présence de certains résultats du côté non conservateur indiquent que des améliorations importantes pourraient être faites. En particulier les paramètres suivants pourraient être considérés :

- la largeur de voie : le facteur m actuellement considéré est trop conservateur;
- le type de poutres : les valeurs de F_T des poutres en béton sont moindres que celles des poutres en acier avec lesquelles les équations actuelles ont été déterminées;
- le nombre de poutres : le ratio S/F_T varie en fonction du nombre N des poutres.

5 PONTS DE TYPE CAISSONS MULTIPLES

5.1 CONTEXTE ET PORTEE DE L'ETUDE

Les analyses raffinées de ponts caissons multiples présentées dans cette section ont été réalisées principalement par Vincent Meerssman, et en partie par Patrice Normandin et Monika Rybarova dans le cadre de leurs études de maîtrise.

5.2 ÉTUDE PARAMETRIQUE

5.2.1 PARAMÈTRES CONSIDÉRÉS

Les paramètres géométriques suivants ont été considérés :

- la portée L, de 20 à 100 m;
- le nombre de voies n, de 2 à 7;
- le nombre de poutres N, de 2 à 10;
- l'espacement des poutres S, de 3.6 à 7.3 m;
- caissons rectangulaires en acier avec dalle en béton;
- la largeur de voie W_e, 3.37 m à 5.15 m;
- la longueur du porte-à-faux S_c , 0.5S;
- l'état limite, ultime (ÉLU) ou fatigue (ÉLF);
- la classe de la route, A&B.

5.2.2 SÉLECTION DES DIMENSIONS

Tous les ponts ont d'abord été conçus avec la méthode simplifiée existante, pour tous les états limites. Les analyses raffinées ont été réalisées par la suite. La vérification de la conception des ponts avec les résultats obtenus des analyses raffinées n'a pas été réalisées.

Au total, 46 ponts simplement supportés et 14 ponts continus de deux travées ont été analysés par éléments finis et grillage. Le détail des paramètres géométriques est donné au Tableau 5.1 et au Tableau 5.2.

Tableau 5.1 : Paramètres géométriques des ponts simplement supportés

Identification	n	N	S (m)	L (m)	B (m)
2c-3l-20	3	2	5.6	20	11.0
2c-3l-40	3	2	5.6	40	11.0
2c-3l-60	3	2	5.6	60	11.2
2c-3l-80	3	2	5.6	80	11.0
2c-3l-100	3	2	5.6	100	11.0
2c-4l-20	4	2	7.3	20	14.5
2c-4l-40	4	2	7.3	40	14.5
2c-4l-60	4	2	7.3	60	14.5
2c-4l-80	4	2	7.3	80	14.5
2c-4l-100	4	2	7.3	100	14.5
3c-4l-20	4	3	4.8	20	14.5
3c-4l-40	4	3	4.8	40	14.5
3c-4l-60	4	3	4.8	60	14.5
3c-4l-80	4	3	4.8	80	14.5
3c-4l-100	4	3	4.8	100	14.5
3c-6l-20	6	3	7.2	20	21.5
3c-6l-40	6	3	7.2	40	21.5
3c-6l-60	6	3	7.2	60	21.5
3c-6l-80	6	3	7.2	80	21.5
3c-6l-100	6	3	7.2	100	21.5
4c-4l-20	4	4	3.6	20	14.5
4c-6l-20	6	4	5.6	20	21.5
4c-6l-40	6	4	5.6	40	21.5
4c-6l-60	6	4	5.6	60	21.5
4c-6l-80	6	4	5.6	80	21.5
4c-6l-100	6	4	5.6	100	21.5
2c-2l-18	2	2	5.5	18	11.0
2c-3l-18	3	2	5.5	18	11.0
2c-2l-36	2	2	5.5	36	11.0
2c-3l-36	3	2	5.5	36	11.0
2c-2l-72	2	2	5.6	72	11.0
2c-3l-72	3	2	5.6	72	11.0
2c-2l-50	2	2	5.6	50	11.2
2c-2l-50	3	2	5.6	50	11.2
3c-3l-18	3	3	4.8	18	14.5
3c-4l-18	4	3	4.8	18	14.5
3c-3l-36	3	3	4.8	36	14.5
3c-4l-36	4	3	4.8	36	14.5
3c-3l-60	3	3	4.8	60	14.5
3c-4l-60	4	3	4.8	60	14.5
3c-3l-72	3	3	4.8	72	14.5
3c-4l-72	4	3	4.8	72	14.5
5c-7l-36	7	5	5.6	36	28.0
5c-7l-48	7	5	5.6	48	28.0
5c-7l-72	7	5	5.6	72	28.0
10c-7l-18	7	10	2.8	18	28.0

Tableau 5.2 : Paramètres géométriques des ponts continus à deux travées

Identification	n	N	S (m)	L (m)	B (m)
2c-3l-20	3	2	5.6	20	11.0
2c-3l-40	3	2	5.6	40	11.0
2c-3l-60	3	2	5.6	60	11.2
2c-3l-80	3	2	5.6	80	11.0
2c-3l-100	3	2	5.6	100	11.0
3c-4l-20	4	3	4.8	20	14.5
3c-4l-40	4	3	4.8	40	14.5
3c-4l-60	4	3	4.8	60	14.5
3c-4l-80	4	3	4.8	80	14.5
3c-4l-100	4	3	4.8	100	14.5
4c-4l-20	4	4	3.6	20	14.5
4c-6l-40	6	4	5.6	40	21.5
4c-6l-60	6	4	5.6	60	21.5
4c-6l-80	6	4	5.6	80	21.5

5.3 MODIFICATIONS DE LA METHODE SIMPLIFIEE

La méthode simplifiée introduite de l'édition 2000 provient du Code de l'Ontario (MTO, 1993). Toutefois les équations ont été améliorées suite à l'analyse de vingt ponts (Normandin, 1995; Rybarova, 1996). Vu le spectre réduit des géométries sélectionnées, des limitations géométriques ont été imposées, notamment : le nombre de voies doit être égal ou supérieur au nombre de caissons et le rapport B/L doit être inférieur ou égal à 1.0. Les nouvelles équations de l'édition 2014, basée sur l'étude de Meerssman (2010), ont permis d'améliorer la précision des calculs et d'éliminer ces deux restrictions.

5.4 RESULTATS DE L'ANALYSE PARAMETRIQUE

5.4.1 MOMENT FLÉCHISSANT

La comparaison des efforts de flexion pour les travées simples et les ponts continus obtenus par les analyses raffinées avec les efforts obtenus avec les méthodes simplifiées des versions 2006 et 2014 du CSA-S6 sont respectivement présentées sur la Figure 5.1 et la Figure 5.2 à l'ÉLU et sur la Figure 5.3 et la Figure 5.4 à l'ÉFL.

On peut observer que les efforts obtenus avec la méthode simplifiée de l'édition 2014 sont très près de ceux des analyses raffinées et que la nouvelle méthode présente une amélioration notable par rapport à la précédente.

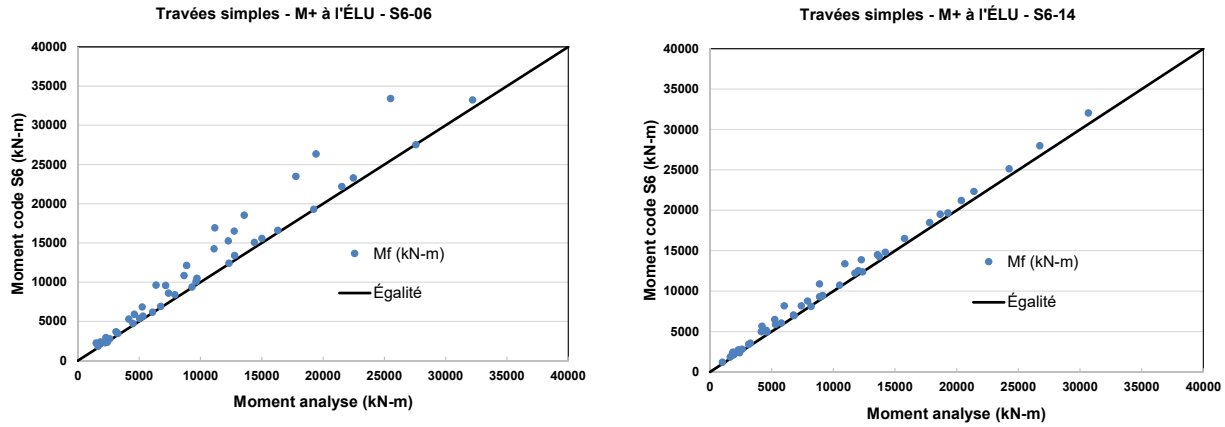


Figure 5.1 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU – Travées simples

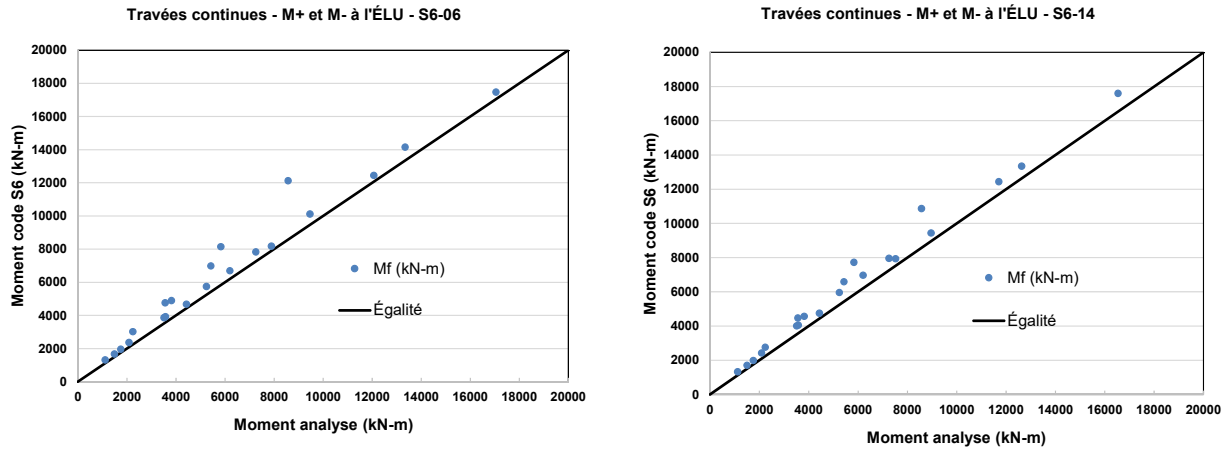


Figure 5.2 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU – Travées continues

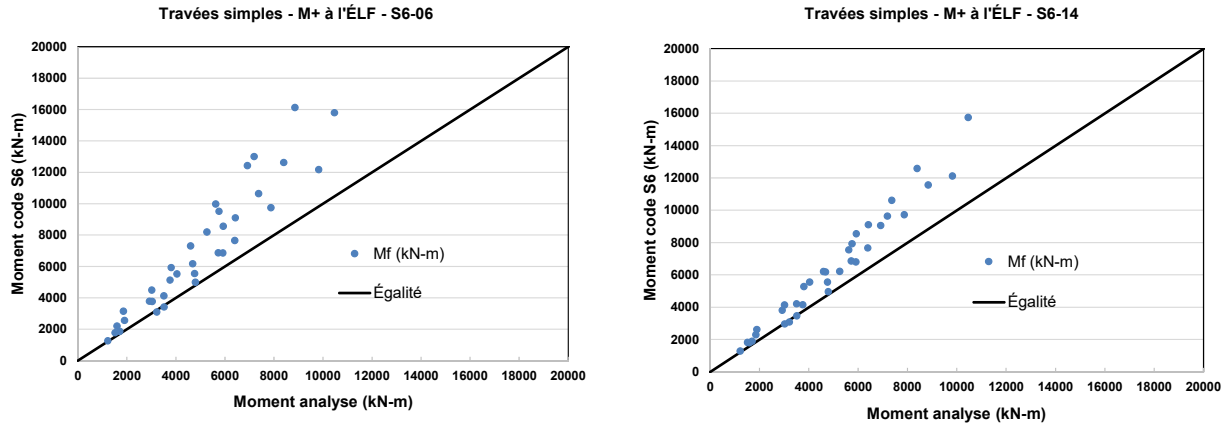


Figure 5.3 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLF – Travées simples

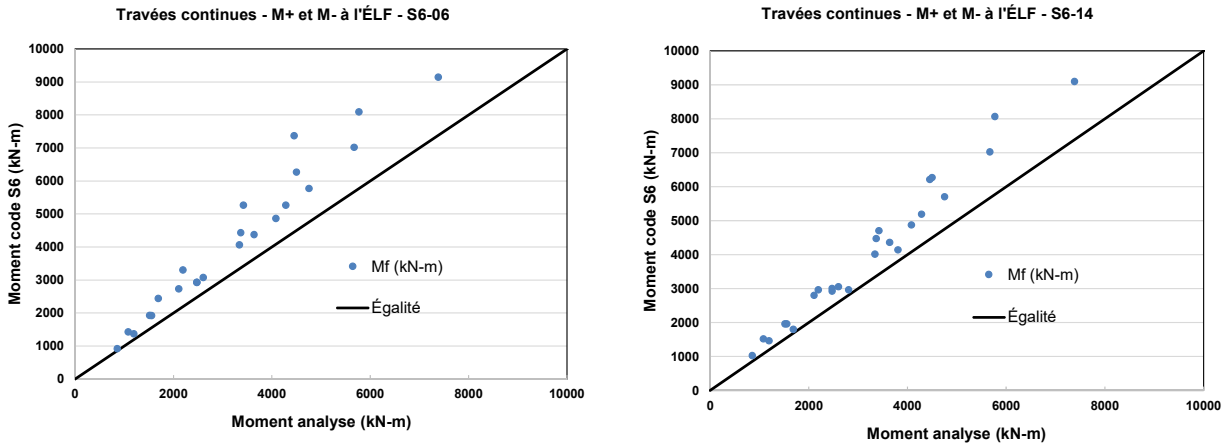


Figure 5.4 : Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLF – Travées continues

5.4.2 EFFORT TRANCHANT

La comparaison des efforts tranchants pour les travées simples et les ponts continus obtenus par les analyses raffinées avec les efforts obtenus avec les méthodes simplifiées des versions 2006 et 2014 du CSA-S6 sont respectivement présentées sur la Figure 5.5 et la Figure 5.6 à l'ÉLU et sur la Figure 5.7 et la Figure 5.8 à l'ÉFL.

On peut observer que les efforts obtenus avec la méthode simplifiée de l'édition 2014 sont très près de ceux des analyses raffinées et que la nouvelle méthode présente une amélioration notable par rapport à la précédente qui s'est avérée être non conservatrice dans un nombre appréciable de cas.

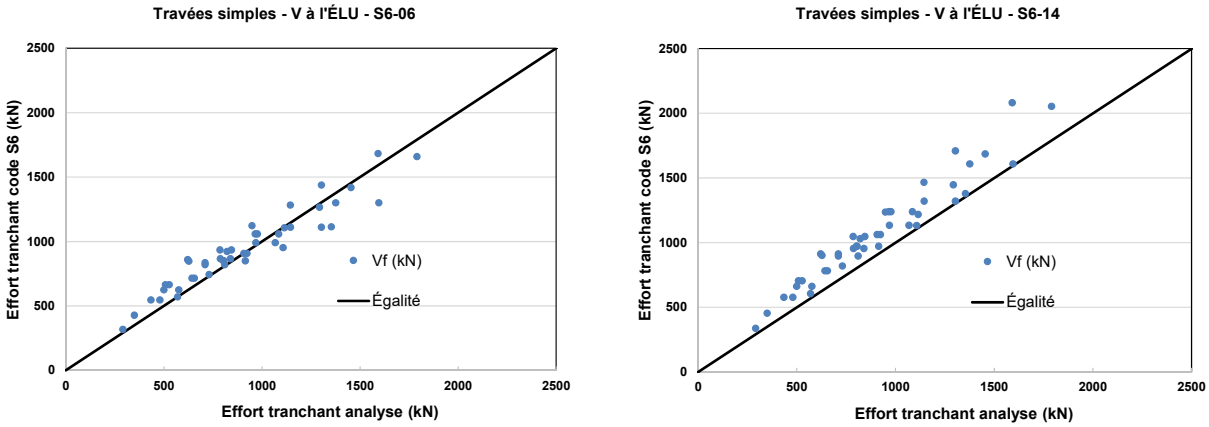


Figure 5.5 : Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU – Travées simples

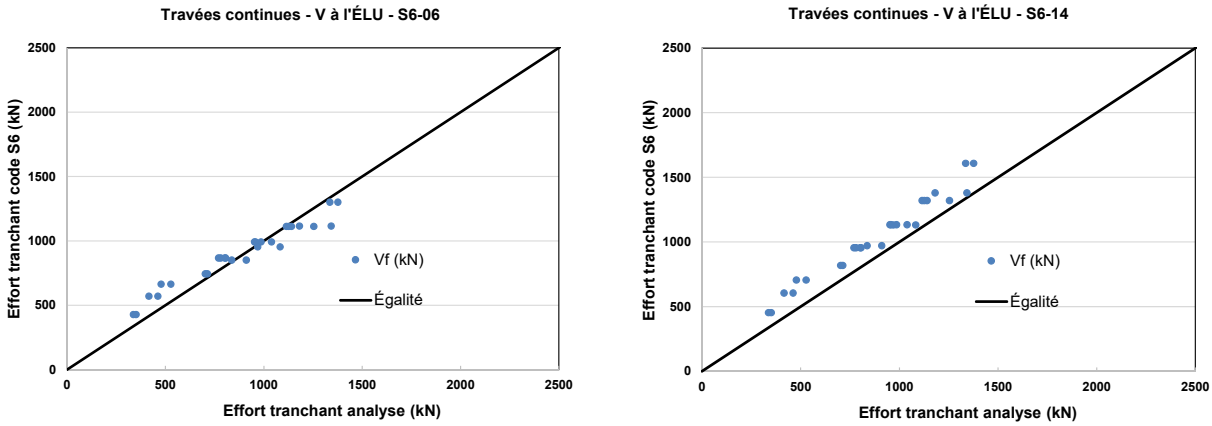


Figure 5.6 : Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU – Travées continues

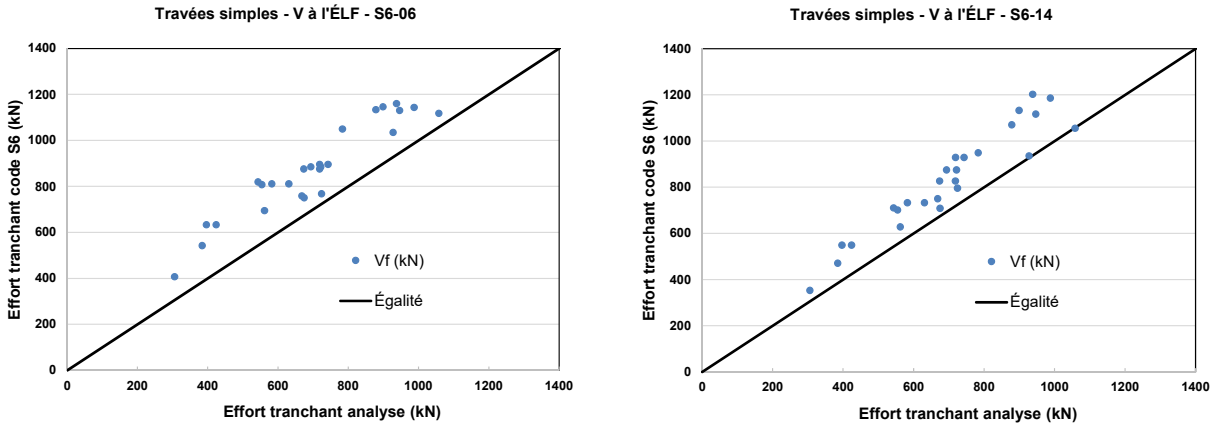


Figure 5.7 : Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF – Travées simples

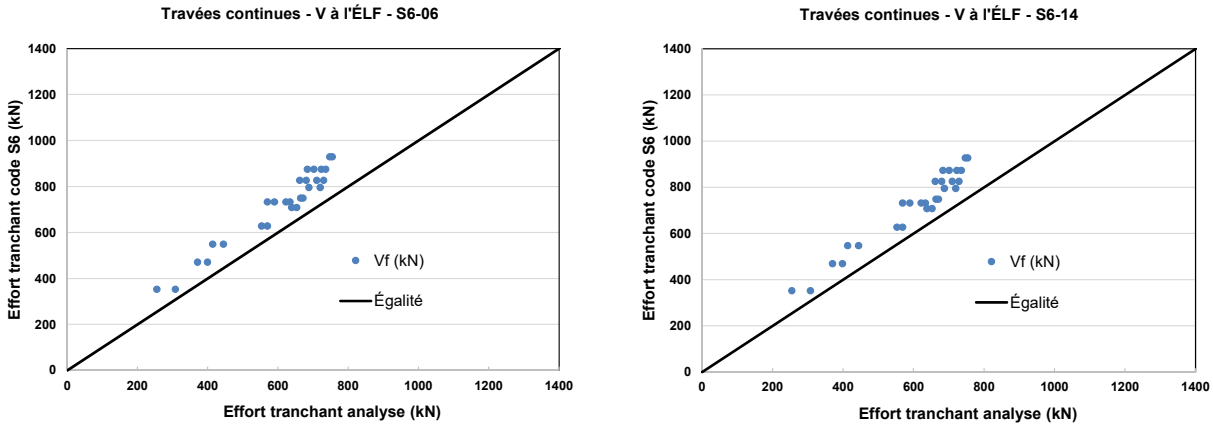


Figure 5.8 : Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF – Travées continues

5.5 SOMMAIRE DES RESULTATS

La méthode simplifiée de l'édition 2014 conduit à des résultats plus précis que l'édition précédente et l'ensemble des résultats obtenus se situe du côté sécuritaire. La base de données devrait toutefois être élargie afin de considérer un spectre plus large de géométries.

6 PONTS CONTINUS

6.1 CONTEXTE ET PORTEE DE L'ETUDE

Les travaux présentés dans cette section ont été réalisés principalement par Maxime Forget dans le cadre de ses études de maîtrise. L'étude comprend des analyses de grillages de ponts de type dalle sur poutres continus et dalles sur poutres avec béquilles pour le développement de la méthode simplifiée du code CSA-S6-14.

L'étude a été faite en effectuant plusieurs analyses de grillage pour un certain nombre de géométries afin de comparer avec les résultats avec les valeurs proposées par les nouvelles équations de la méthode simplifiée. Ainsi, 18 analyses de grillage ont été réalisées. Celles-ci englobent plusieurs cas de géométries continues, que ce soit les ponts à travées continues ou les ponts avec béquilles. De plus, quelques analyses ont étés réalisées avec les poutres de types Next Beam (NxB), développées par *PCI-Northeast* aux États-Unis. Il s'agit de poutres en double T avec dalle intégrée. Le Tableau 6.1 présente la liste des ponts étudiés et leurs principales caractéristiques géométriques.

Tableau 6.1 : Géométries des ponts considérés

Analyse no.	Type	Nombre de travées	Nombre d'éléments porteurs (N)	Largeur du tablier (m)	Nombre de voies (n)	Espacement des poutres (m)	LONGUEUR TRAVÉES (m)		
							1	2	3
ACIER – Dalle sur poutres									
1	Poutre en I – mixte	3	3	9.66	2	3.22	43	53	43
2	Poutre en I – mixte	3	4	12.88	3	3.22	43	53	43
3	Poutre en I – mixte	3	5	16.1	4	3.22	43	53	43
4	Poutre en I – mixte	3	4	14.5	4	3.63	43	53	43
5	Poutre en I – mixte	2	4	12.88	3	3.22	43	43	
6	Poutre en I – mixte	2	4	12.88	3	3.22	45	41	
7	Poutre en I – mixte	2	4	12.88	3	3.22	39	47	
BÉTON - Dalle sur poutres									
8	Poutres NEBT – mixte	2	6	12.9	3	2.15	41	41	
9	Poutres NEBT – mixte	2	8	17.2	4	2.15	41	41	
10	Poutres NEBT – mixte	2	4	8.6	2	2.15	41	41	
11	Poutres NEBT – mixte	2	5	12.9	3	2.58	41	41	
12	Poutres NEBT – mixte	2	8	12.9	3	1.61	41	41	
13	Poutres double T	2	8	9.7536	2	1.22	22	18	
14	Poutres double T	3	8	12.192	3	1.52	21	25	21
15	Poutres double T	1	6	8.9	2	1.52	20		
16	Poutres double T	1	8	12.192	3	1.52	20		
ACIER – Béquilles, dalle sur poutres									
17	Poutre en I – mixte	3	4	12.88	3	3.22	43	53	43
18	Poutre en I – mixte	3	4	12.88	3	3.22	43	53	43

6.2 MODELES ET METHODOLOGIE

6.2.1 DESCRIPTION DES MODÈLES

6.2.1.1 Ponts de type dalle sur poutres en acier

Des ponts mixtes de type dalle sur poutres en acier ont été retenus. Leur géométrie provient d'un exemple de calcul du manuel de note et références de l'Institut Canadien de la Construction en Acier (ICCA, 2002). La géométrie de la section de poutre considérée est présentée sur la Figure 6.1. Cette section de poutre est utilisée pour les analyses 1 à 7, 17 et 18.

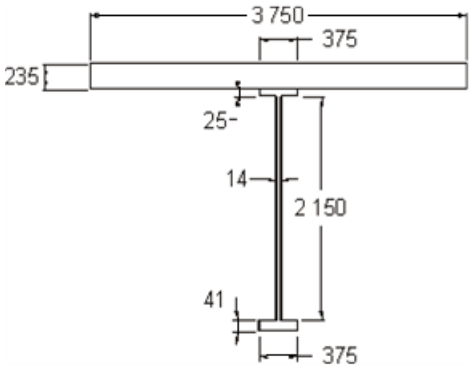


Figure 6.1 : Géométrie de la section des poutres mixtes en acier (analyses 1 à 7, 21 et 22)

Les analyses 1 à 4 avaient pour but de vérifier les équations quand le nombre de poutres varie. Ces analyses avaient donc les mêmes portées. Ces portées sont présentées sur la Figure 6.2.

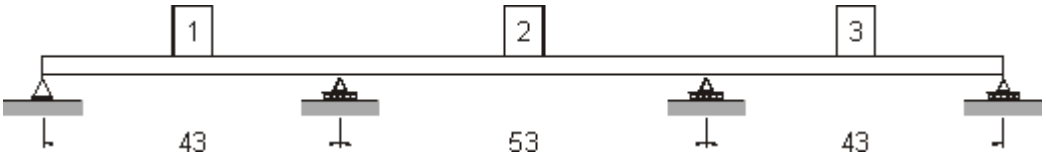


Figure 6.2 : Schéma des portées (analyses 1 à 4)

Les analyses 5 à 7 avaient pour but de vérifier l'impact de longueurs de travées différentes sur la performance de la méthode simplifiée. Ainsi, on a utilisé des rapports de longueurs de travées de 1.0 (analyse 5), de 1.1 (analyse 6) et de 1.2 (analyse 7). Ces résultats sont présentés sur la Figure 6.3, sur la Figure 6.4 et sur la Figure 6.5.

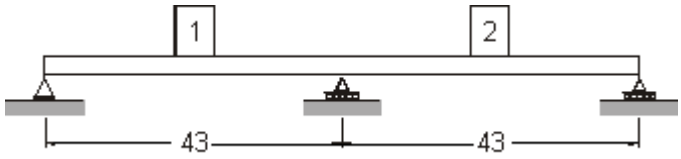


Figure 6.3 : Schéma des portées (analyse 5)

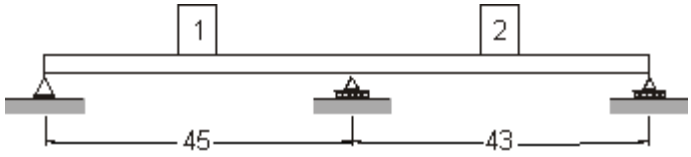


Figure 6.4 : Schéma des portées (analyse 6)

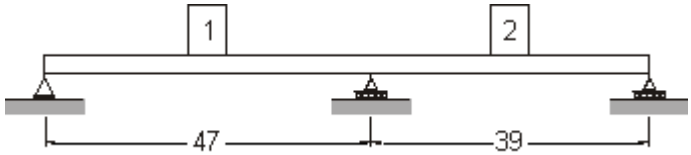


Figure 6.5 : Schéma des portées (analyse 7)

De plus les analyses 17 et 18 ont pour but de valider les équations de la méthode simplifiée pour le calcul des efforts dans les béquilles. Les schémas des travées pour les analyses 17 et 18 sont présentés sur la Figure 6.6 et sur la Figure 6.7. Les béquilles ont les mêmes propriétés sectionnelles que les poutres de tablier.

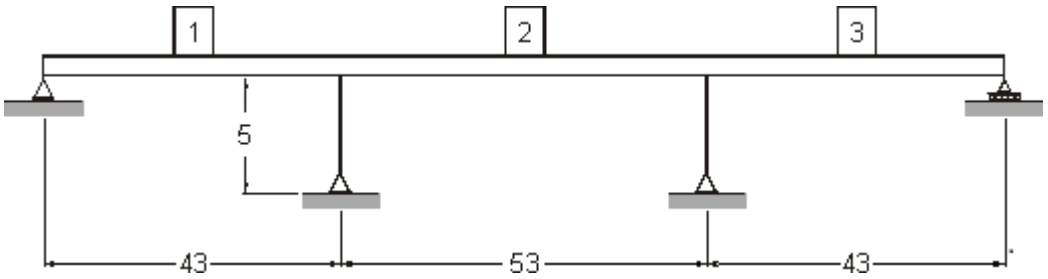


Figure 6.6 : Schéma des portées (analyse 17)

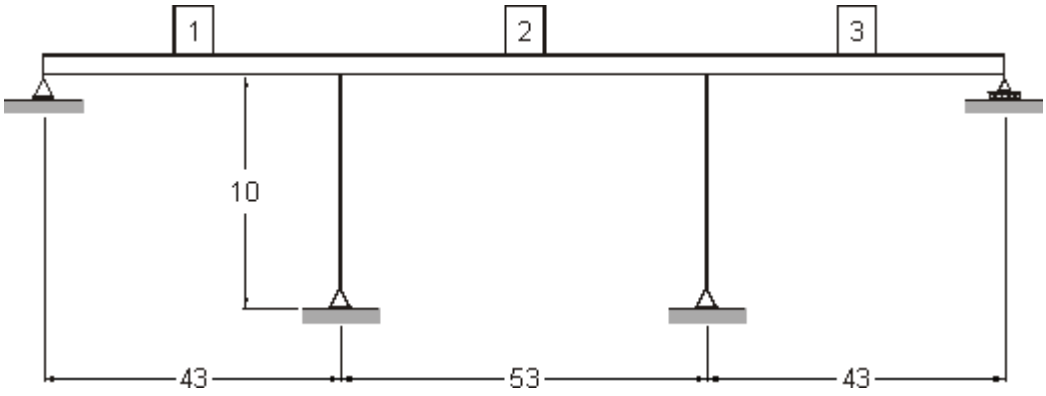


Figure 6.7 : Schéma des portées (analyse 18)

6.2.1.2 Ponts de type dalle sur poutres en béton

Les ponts en béton avec dalle sur poutres considérés ont des poutres de type NEBT. La géométrie de poutre considérée pour les analyses 8 à 12 est présentée sur la Figure 6.8 . Le schéma des portées est présenté sur la Figure 6.9.

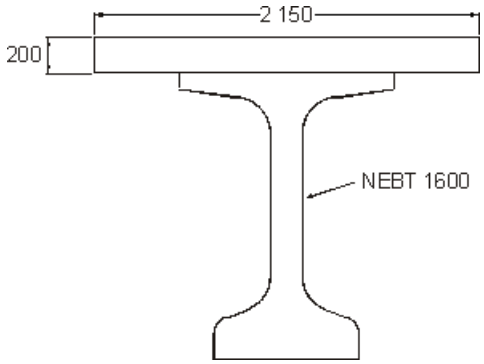


Figure 6.8 : Géométrie de la section des poutres en NEBT (analyses 8 à 12)

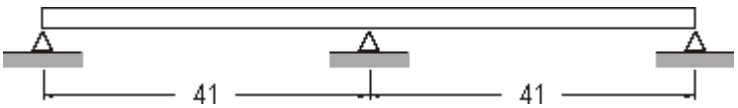


Figure 6.9 : Schéma des portées (analyses 8 à 12)

Pour les analyses 13 à 16, des sections de type Next Beam (des poutres à section double T) sont utilisées. Les propriétés de ses sections se trouvent à l'annexe 4 de Forget (2012). Le Tableau 6.2 présente le type de poutres utilisées pour les analyses 13 à 16.

Tableau 6.2 : Types de poutre Next Beam utilisées

Analyse	Type de poutre Next Beam
13	Next 28D
14	Next 32D
15	Next 32D
16	Next 32D

6.2.2 STRATÉGIE D'ANALYSE

Pour chacune des n voies de circulation, chaque position transversale d'un camion doit être envisagée. Toutes les combinaisons de voies possibles doivent être également considérées. Sur le logiciel SAP2000, deux façons ont été étudiées pour appliquer la charge mobile sur le grillage.

La première est de définir la position de toutes les voies possible sur le pont. Par exemple un pont à deux voies a la possibilité d'avoir deux voies chargées à la fois ou bien une seule voie chargée. Une fois l'analyse lancée, le logiciel fait passer le camion sur plusieurs lignes d'influence au sein même de la voie et bâtit une courbe enveloppe pour les efforts selon le pas transversal et le pas longitudinal spécifiés.

La deuxième façon d'appliquer le chargement au pont est de faire circuler le camion sur chaque élément porteur longitudinal. Ensuite, selon les différentes positions transversales possibles dans chacune des voies, les différentes combinaisons sont déterminées. La contribution de chacune des analyses est calculée en supposant une distribution isostatique de la charge de chaque ligne de roue. La Figure 6.10 présente les différents paramètres en jeu pour le calcul de la charge reprise par chaque voie. Cette seconde manière de procéder est celle qui a été le plus largement utilisée pour la réalisation cette étude. Effectivement, cette méthode se programme plus aisément. De plus, la compatibilité entre les versions de SAP est assurée, car ce ne sont pas toutes les versions de SAP qui permettent de donner une largeur aux véhicules et aux voies. Cette approche est également celle adoptée par Théoret(2010); voir les chapitres 3 et 4 précédents.

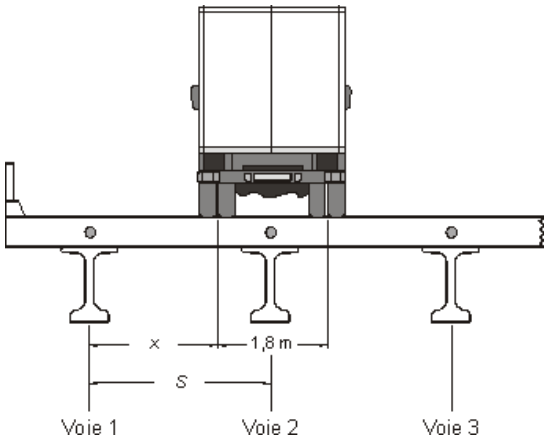


Figure 6.10 : Calcul de la répartition entre les poutres des charges d'une voie

6.2.3 AUTOMATISATION DES ANALYSES ET TRAITEMENT DES RÉSULTATS

La modélisation par grillage a été, pour la plupart des analyses, réalisée avec le logiciel de pré et de post-traitement développé par Patrick Théoret (2010). Ce logiciel, programmé sur Microsoft Excel et fait pour SAP2000, génère à la fois le système de coordonnées, les éléments du grillage, mais surtout les cas de chargement. Le logiciel génère, selon les paramètres incorporés (matériaux, géométrie), des fichiers d'entrée complets pour le logiciel SAP2000. Il permet aussi de créer un fichier contenant les paramètres à faire varier pour réaliser un grand nombre d'analyses automatiquement.

La section transversale du tablier au-dessus des appuis a été modélisée au moyen de diaphragmes d'appuis. Une règle approximative et empirique a dicté la rigidité des diaphragmes d'appuis comme étant égale à la rigidité des éléments longitudinaux. L'utilisation des diaphragmes d'appuis permet de ne pas bloquer la rotation des poutres autour de l'axe longitudinal, ce qui est plus conforme à la réalité.

Le logiciel de génération de grillage crée, à l'aide d'une macro Excel, un fichier d'entrée sur SAP. Les paramètres à insérer sont les suivants :

- longueur;
- largeur;
- nombre d'éléments porteurs;
- nombre de travées;
- retenues aux appuis;
- biais du pont (pour ce rapport, seuls des ponts sans biais ont été considérés);
- épaisseur de la dalle;
- type de poutre;
- propriétés des matériaux.

L'utilitaire est conçu pour générer des éléments transversaux disposés à des intervalles de un mètre de distance. C'est pourquoi il faut de préférence spécifier une longueur en nombre

entier. Le logiciel peut calculer les rigidités des éléments porteurs des ponts selon la longueur. Pour cette étude, des géométries de ponts réels ont été utilisées alors que les propriétés de rigidité (inertie, aire de la section et aire de cisaillement) ont été incorporées manuellement.

Une fois le fichier généré, ce dernier peut être importé directement dans SAP2000 et l'analyse peut être lancée directement. Également, des modifications peuvent être apportées au besoin dans le logiciel avant de lancer l'analyse.

Le programme a la particularité de numéroter tous les éléments principaux de manière à ce que le traitement se fasse aisément. Plus précisément, un numéro de poutres est associé pour chaque poutre longitudinale principale du grillage, partant de un jusqu'au nombre de poutres spécifié. Chacun des éléments longitudinaux d'une longueur de un mètre formant une poutre longitudinale est ensuite numéroté de un jusqu'à la longueur du pont en m. Par exemple, l'élément numéro 2013 est le 13ième élément de la deuxième poutre du grillage. Par la suite, le traitement de données est effectué comme suit :

- tri des résultats selon les cas de chargement (ultime, fatigue);
- transformation des efforts en coordonnées locales aux coordonnées globales;
- détermination de la poutre intérieure et extérieure possédant les efforts les plus élevés.

6.2.4 APPLICATION DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

La méthode simplifiée adoptée est celle de l'édition 2006 pour les facteurs d'essieu. La longueur de la portée simple équivalente pour l'application aux ponts continus est celle retenue pour la l'édition 2014, tel que montré sur la Figure 6.11.

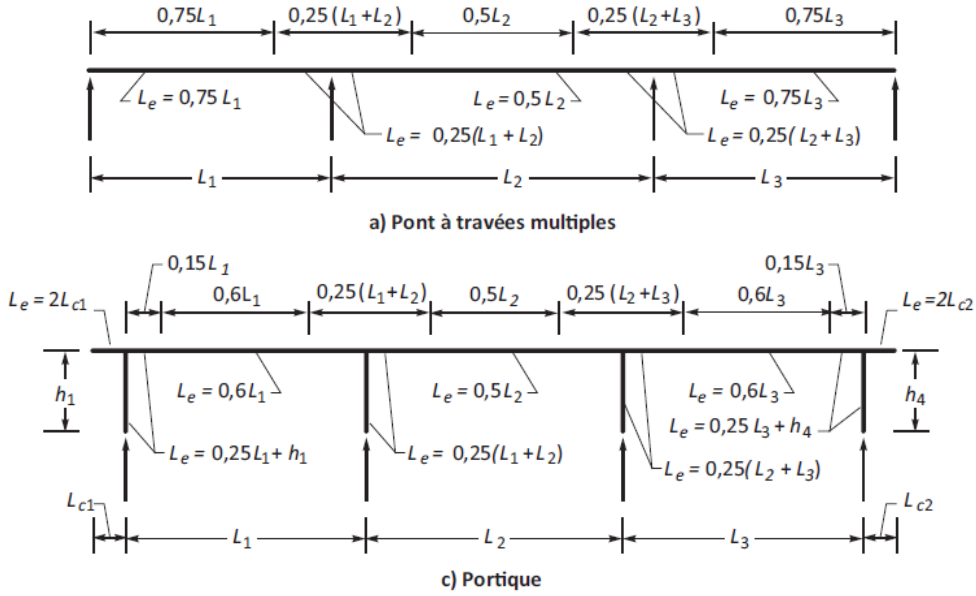


Figure 6.11 : Détermination de la portée équivalente adoptée dans cette étude (CSA-S6-14)

6.3 RESULTATS DE L'ETUDE

6.3.1 COMPARAISON DES RÉSULTATS

Les résultats pour le grillage et la méthode simplifiée sont mis en commun sur un graphique. Les facteurs d'essieu pour la méthode du grillage sont comparés aux facteurs d'essieu de la méthode simplifiée en divisant le facteur d'essieu pour le grillage par celui de la méthode simplifiée. Ainsi, un rapport au-dessus de 1.0 représente une situation où la méthode simplifiée est conservatrice par rapport à l'analyse par grillage. Les résultats pour chaque analyse sont présentés dans Forget (2012).

6.3.2 CONSIDÉRATION DE LA FISSURATION DE LA DALLE EN MOMENT NÉGATIF

Le but de cet exercice est de voir si les facteurs d'essieux obtenus en considérant une dalle fissurée ou non fissurée seraient différents. Pour ce faire, deux analyses de grillages ont été faites. Pour la première analyse, une rigidité constante est donnée aux éléments longitudinaux, celle d'une poutre à action mixte (dalle en béton et poutre en acier). La seconde analyse de grillage est faite en considérant une dalle fissurée, soit en considérant que la dalle est absente. Il s'agit en réalité de deux situations extrêmes et l'on comprend que les résultats fidèles à la réalité se trouvent entre ces deux cas étant donné que la dalle ne se fissure souvent qu'en partie dans les conditions de service.

Les efforts du grillage sont ensuite comparés à ceux de la poutre équivalente ayant les même propriétés longitudinales afin d'avoir la bonne distribution des efforts. Pour l'analyse du tablier non fissuré en zone de moment négatif, on utilise la poutre équivalente avec une rigidité constante. Pour l'analyse du tablier fissuré, on utilise la rigidité de la poutre d'acier seulement en zone de moment négatif et de la poutre mixte dans le reste du modèle.

Le Tableau 6.3 présente les résultats des analyses pour l'étude de l'impact de la fissuration de la dalle en moment négatif sur les facteurs d'essieux. La Figure 6.12 et la Figure 6.13 montrent respectivement la distribution des efforts de moments pour une poutre extérieure et intérieure.

Tableau 6.3 : Facteurs d'essieu considérant ou non la fissuration de la dalle en moment négatif

	Inertie non fissurée		**Inertie fissurée**	
	Ext	Int	Ext	Int
M+	0.833	0.668	0.838	0.660
M-	0.850	0.690	0.861	0.685

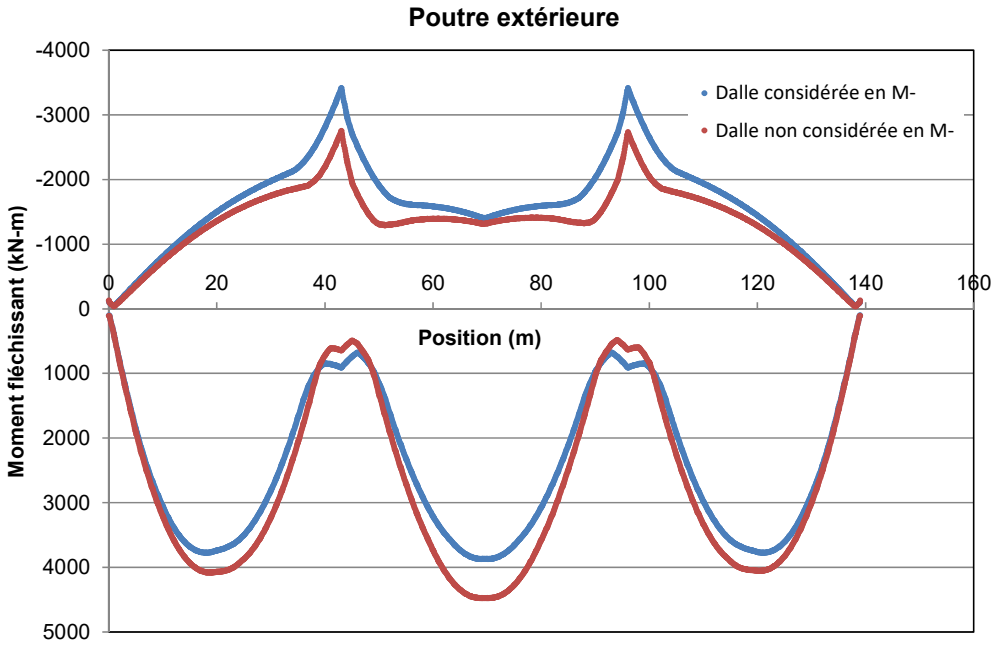


Figure 6.12 : Comparaison des moments pour une poutre extérieure

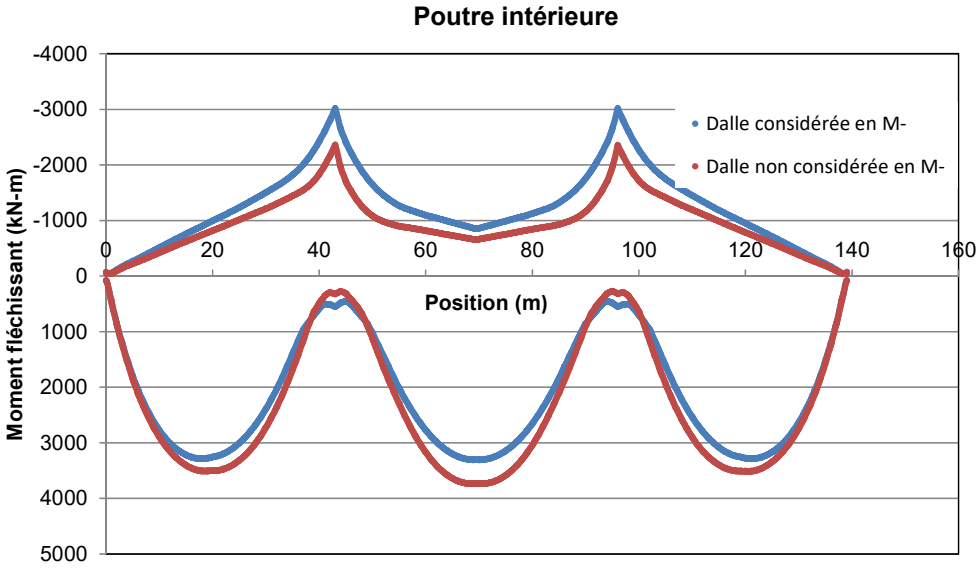


Figure 6.13 : Comparaison des moments pour une poutre intérieure

Les résultats montrent donc que lorsque la dalle de béton n'est pas considérée en zone de moment négatif, les efforts sont transférés en zone de moment positif, ce qui décale l'ensemble de la courbe enveloppe. Ceci dit, on remarque que le fait d'utiliser l'inertie fissurée ou non a

très peu d'impact sur le calcul des facteurs d'essieux (<1% d'écart). Donc, pour cette étude, les facteurs d'essieux sont calculés avec l'inertie non fissurée, par soucis de simplicité. Toutefois, il ne faut pas conclure que de considérer ou non la fissuration n'a pas d'impact.

6.3.3 RÉSULTAT DES ANALYSES

Les sections suivantes présentent le sommaire des analyses. Les résultats détaillés sont présentés à l'annexe 1 et à l'annexe 5. Les résultats sont présentés sous la forme de rapports entre le facteur d'essieu obtenu de la méthode simplifiée sur celui obtenu de l'analyse de grillage. Une valeur supérieure à 1.0 est sécuritaire. Les tableaux donnent la moyenne et l'écart-type pour chacun des paramètres considérés.

Le Tableau 6.4 donne les valeurs des rapports des facteurs d'essieu pour les ponts de type dalle sur poutres pour des travées continues. Les valeurs du Tableau 6.4 : Résumé des résultats pour les ponts à travées multiples

sont rassemblées seulement pour les ponts à travées multiples. Ces valeurs sont présentées pour les différents matériaux de ponts ainsi que pour les poutres intérieures et extérieures.

Tableau 6.4 : Résumé des résultats pour les ponts à travées multiples

	Poutre	Moyenne	Écart type
Poutres d'acier	Extérieure	1.06	0.03
	Intérieure	1.17	0.05
Poutres de béton	Extérieure	1.07	0.06
	Intérieure	1.14	0.10

Le Tableau 6.5 donne les valeurs des rapports des facteurs d'essieu pour les ponts à plusieurs travées continues avec béquilles. Ces valeurs sont présentées pour les différents éléments du pont ainsi que pour les poutres intérieures et extérieures.

Tableau 6.5 : Résumé des résultats pour les ponts à travées multiples avec béquilles

	Poutre	Moyenne	Écart type
Béquilles	Extérieure	1.04	0.03
	Intérieure	1.16	0.13
Poutres	Extérieure	1.07	0.03
	Intérieure	1.19	0.06

Le Tableau 6.6 donne les valeurs des facteurs d'essieu méthode pour les ponts en double T ayant un espacement inégal des poutres.

Tableau 6.6 : Résumé des résultats pour les ponts avec espacement inégal des poutres

	Poutre	Moyenne	Écart type
Poutre en double T	Extérieure	1.22	0.10
	Intérieure	1.19	0.08

6.3.4 SOMMAIRE DES ANALYSES

De façon générale, on remarque que les facteurs d'essieu obtenu avec la méthode simplifiée proposée pour les ponts de type dalle sur poutres sont adéquats, peu importe le matériau, puisqu'ils sont conservateurs. De plus le résultat est particulièrement satisfaisant pour les poutres extérieures avec des rapports méthode simplifiée au grillage d'environ 1.07. Cependant, pour les poutres intérieures, on remarque que les rapports sont d'environ 1.15, ce qui est un peu trop conservateur. Cette tendance est aussi obtenue pour les ponts de types dalle sur poutres avec continuité dans les piles. Les rapports collent à la tendance générale soulignée plus haut.

Bien que les facteurs d'essieu pour une poutre intérieure soient assez conservateurs, il n'y a pas d'intervention possible sur le paramètre L_e qui puisse baisser les facteurs d'essieu de la méthode simplifiée. En effet, l'excès de conservatisme pour les facteurs d'essieu des poutres intérieures provient de l'équation du D_T, qui est déjà calibrée sur un grand nombre de ponts à travée simple.

Pour ce qui est des poutres en double T (de type NEXT Beam), les rapports indiqués au Tableau 6.6 oscillent autour de 1.20, ce qui est trop conservateur. Ceci peut être expliqué par le fait que les poutres de type NEXT Beam sont relativement trapues et ont une rigidité torsionnelle très haute. Ceci a pour effet de mieux redistribuer les efforts sur tout le tablier et d'ainsi réduire les facteurs d'essieu calculés avec la méthode du grillage. Il n'est donc pas possible de conclure que l'espacement inégal des poutres a un impact sur la performance de la méthode simplifiée.

6.4 SOMMAIRE DES RESULTATS

Les analyses de grillages de plusieurs ponts continus indiquent que la méthode simplifiée conduit à des résultats sécuritaires. Cependant, on peut conclure que ce n'est pas d'abord au niveau de la détermination de la longueur équivalente que les efforts doivent être investis mais plutôt dans l'amélioration de la méthode simplifiée pour les travées simplement supportées.

7 CONCLUSIONS

7.1 SOMMAIRE DES RESULTATS

Ce rapport présente les résultats de plusieurs études, réalisées en amont de ce projet de recherche et dans ce cadre de celui-ci, qui devaient permettre de canaliser les améliorations proposées pour la méthode simplifiée du Code CSA-S6. Certaines modifications ont été implantées dans l'édition 2014 du Code CSA-S6 alors que d'autres pourraient éventuellement être intégrées dans la prochaine version. Les principaux résultats de ces études démontrent clairement que :

- les équations de l'édition 2014, dont le format a été grandement simplifié, conduisent aux mêmes résultats que les éditions précédentes;
- les efforts tranchants pour les dalles épaisses obtenus avec la méthode simplifiée ont été augmentés pour certains types d'ouvrages par rapport aux éditions précédentes mais demeurent toutefois inférieurs à ceux prédits par les méthodes raffinées ce qui constitue une anomalie préoccupante;
- les équations de la méthode simplifiée pour les ponts de type dalle sur poutres conduisent à des résultats éloignés des résultats des méthodes raffinées, avec une grande dispersion dans certains cas, et n'ont pu être améliorées malgré la disponibilité des résultats d'analyses qui n'ont pu être exploités;
- la méthode simplifiée pour les ponts de type poutres-caissons multiples améliorée dans l'édition 2014 donne des résultats très près de ceux obtenus avec les méthodes raffinées, sécuritaires et présentant peu de dispersion;
- les efforts calculés avec la méthode simplifiée pour des travées continues se sont avérés conservateurs pour les quelques ouvrages étudiés;
- la méthode du grillage est l'approche à privilégier pour l'analyse raffinée des tabliers de ponts.

7.2 RECOMMANDATIONS

La présente étude devrait être poursuivie pour amener un éclairage additionnel sur le calcul des efforts pour les ponts de type dalle épaisse, pour améliorer la précision de la méthode simplifiée pour les ponts de type dalle sur poutres et pour mieux considérer l'effet de la continuité longitudinale et transversale.

Le premier auteur tient à exprimer ses réserves en ce qui a trait au calcul des efforts tranchants et à la résistance associée des ponts de type dalle épaisse. Les analyses réalisées dans le cadre de ce projet et dans des études antérieures indiquent que les efforts tranchants peuvent, dans certaines situations, excéder les valeurs calculées avec les méthodes simplifiées, tel qu'illustré au chapitre 3. De plus, les dalles très épaisses sans étriers sont plus préoccupantes, particulièrement en présence d'un biais. L'auteur tient toutefois à préciser que l'utilisation d'étriers dans la construction de dalles épaisses tel que préconisé par le ministère des Transports du Québec est tout à fait justifiée en regard de l'expérience et de l'expertise acquises au cours de 10 dernières années. Cependant l'évaluation des ponts existants devrait aussi tenir compte des connaissances acquises depuis 2006. Il est grandement recommandé de compléter les études à cet égard et, idéalement, de permettre l'introduction de l'expertise développée au Québec dans le Code CSA-S6 pour l'édition 2019.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports pour son support financier partiel pour la réalisation de cette étude. Plusieurs de résultats présentés sont issus d'études supportées financièrement par le CRSNG et la firme CIMA+ dans le cadre d'un projet RDC ainsi que par le CRSNG par la subvention Découverte du premier auteur.

RÉFÉRENCES

Bakht, B, Moses, F. 1988. *Lateral distribution factors for highway bridges*. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 1785-1801.

CSA 1988. Calcul des ponts routes – CSA-S6-88. Association Canadienne de Normalisation, Toronto, Ontario.

CSA 2006. Code Canadien sur le Calcul de Ponts Routiers – CSA-S6-06. Association Canadienne de Normalisation, Toronto, Ontario.

CSA 2014. Code Canadien sur le Calcul de Ponts Routiers – CSA-S6-14. Association Canadienne de Normalisation, Toronto, Ontario.

CSI 2009. SAP2000 Basic Analysis Reference Manual. Computer and Structures inc, Berkeley, California, USA.

Forget, M. 2012. Développement de la nouvelle méthode simplifiée du Code CSA-S6 et Développement de ponts en béton entièrement préfabriqués. Rapport de maîtrise, Polytechnique Montréal.

Hambly, E.C. 1991. *Bridge deck behaviour*. E & FN Spon, 313p.

ICCA 2002. *Ponts en acier – Calcul fabrication et construction*. L'institut canadien de la construction en acier.

Lefour, A. 2017. Analyse des ponts de type poutres-caissons multiples. Rapport de maîtrise, Polytechnique Montréal (en rédaction).

Massicotte, B. 2010. Proposed improvements for Section 5. Communication interne du sous-comité sur les Méthodes d'analyse du Code CSA-S6.

Massicotte, B., Conciatori, D., Théoret, P. 2011. Établissement d'une méthode d'évaluation des ponts avec biais. Rapport SR10-08, Groupe de recherche en génie des Structures, Polytechnique Montréal.

Meersseman, V. 2010. Développement d'une méthode d'analyse simplifiée pour les ponts à poutres-caissons multiples composites à travées simples et continues. Rapport de maîtrise, Polytechnique Montréal.

MTO 1993. Ontario Highway Bridge Design Code – 3rd edtion. Ontario Ministry of Transportation, Toronto, Ontario.

Normandin, P. 1995. Étude du comportement des ponts à poutres-caissons mixtes acier-béton. Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal.

Rybarova, M. 1995. Comportement des ponts à poutres-caissons multiples. Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal.

Smith, D.S. 1998. Force effects in slab and voided slab brides 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. 2010. Développement d'une méthode d'analyse simplifiée pour la conception des ponts de type dalle en béton. Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal.

ANNEXE 1 – PROPRIÉTÉS DES PONTS DE TYPE DALLE SUR POUTRES DE LA BASE DE DONNÉES

Bridges Informations				Steel Beams				Concrete Slab				Composite Deck		
Bridge ID	Source	Year	Continuity	N	S	I_{Beam}	J_{Beam}	t_c	W	I_{Slab}	J_{Slab}	L	Dx = EI	Dxy = GJ
					(mm)	($x10^6$ mm^4)	($x10^6$ mm^4)	(mm)	(mm)	($x10^6$ mm^4)	($x10^6$ mm^4)	(mm)	($kN*m^2$/m)	($kN*m^2$/m)
81-5066	MTL	1958	Simply Supp.	12	1 829	4 988	8.829	241.3	21 336	24 981	49 605	16 086	1 874 692	19 423
81-5068	MTL	1989	Continuous	6	3 600	13 365	8.338	290.0	22 860	46 461	92 179	18 600	2 604 968	33 193
81-5057	MTL	1971	Continuous	11	1 880	2 039	4.103	152.4	18 288	5 394	10 732	14 630	995 326	4 996
81-5074	MTL	1965	Simply Supp.	6	2 775	8 214	12.538	152.4	10 719	3 162	6 267	34 442	2 856 270	5 329
			Continuous	6	2 616	4 832	2.829	177.8	13 767	6 448	12 792	31 638	1 273 835	7 705
			Continuous	6	2 616	5 965	6.241	177.8	13 767	6 448	12 792	42 184	1 759 724	7 819
			Continuous	6	2 629	8 242	12.540	177.8	13 767	6 448	12 792	25 603	2 431 499	8 031
			Continuous	6	2 629	4 480	2.398	177.8	13 767	6 448	12 792	16 459	1 433 978	7 690
81-5087	MTL	1997	Continuous	13	2 220	33 137	4.279	200.0	28 650	19 100	38 032	43 037	9 409 374	11 021
			Continuous	13	2 220	33 137	4.279	200.0	28 650	19 100	38 032	30 633	9 409 374	11 021
81-5112	MTL	1965	Continuous	11	2 746	4 115	2.679	200.0	28 764	19 176	38 184	8 890	935 770	10 951
			Continuous	11	2 746	4 115	2.679	200.0	28 764	19 176	38 184	11 430	935 770	10 951
			Continuous	11	2 746	4 115	2.679	200.0	28 764	19 176	38 184	13 716	935 770	10 951
			Continuous	11	2 746	4 115	2.679	200.0	28 764	19 176	38 184	18 288	935 770	10 951
81-5173	MTL	1967	Simply Supp.	10	1 270	2 018	0.872	254.0	12 040	16 441	32 445	11 963	1 422 594	22 126
81-5488	MTL	1981	Continuous	8	1 422	4 554	5.718	290.0	11 430	23 231	45 718	7 521	2 241 250	33 066
81-5492	MTL	2008	Continuous	7	2 050	14 606	16.667	200.0	14 250	9 500	18 832	20 730	4 294 929	11 454
			Continuous	7	2 050	14 606	16.667	200.0	14 250	9 500	18 832	19 316	4 294 929	11 454
81-5044	MTL	1966	Continuous	14	2 743	5 252	2.965	177.8	36 271	16 989	33 874	16 002	1 712 939	7 737
			Continuous	14	2 743	5 988	8.105	177.8	36 271	16 989	33 874	19 370	2 248 618	7 889
81-3205	MTL	1960	Simply Supp.	8	1 981	974	1.471	190.5	15 850	9 131	18 124	13 100	365 541	9 422
81-3202	MTL	2007	Continuous	4	3 050	16 542	23.963	225.0	12 170	11 552	22 835	17 400	3 344 250	15 973
81-3211	MTL	2006	Continuous	9	2 350	9 899	5.248	200.0	20 795	13 863	27 559	18 600	2 550 988	11 029
81-3228	MTL	1962	Continuous	12	2 235	3 064	3.808	190.5	25 133	14 480	28 821	15 727	953 590	9 531
81-5016	MTL	1966	Simply Supp.	16	2 464	16 294	8.575	200.0	39 200	26 133	52 099	32 063	4 433 071	11 154
81-5017	MTL	1966	Simply Supp.	12	2 319	12 755	15.606	177.8	26 986	12 640	25 175	25 138	3 105 960	8 175
81-5031	MTL	2002	Simply Supp.	7	2 185	25 477	14.982	200.0	15 420	10 280	20 392	42 368	7 542 868	11 354
81-5014	MTL	2000	Continuous	11	1 830	3 991	3.153	200.0	20 100	13 400	26 632	17 200	1 510 864	10 984
81-5021	MTL	2000	Simply Supp.	11	1 829	8 760	5.991	200.0	20 120	13 413	26 659	32 196	3 647 352	11 104
81-5005	MTL	2000	Simply Supp.	13	1 880	8 760	5.991	200.0	24 390	16 260	32 352	32 000	3 566 949	11 109
81-5020	MTL	2000	Simply Supp.	10	1 829	8 760	5.991	200.0	18 290	12 193	24 219	32 000	3 647 511	11 097
81-5012	MTL	2001	Continuous	8	2 175	6 705	6.027	200.0	17 400	11 600	23 032	22 104	2 319 476	11 054
81-5010	MTL	1965	Continuous	5	2 438	8 021	7.999	178.0	10 974	5 158	10 210	11 858	2 491 871	7 900
81-5003	MTL	2000	Simply Supp.	16	1 575	13 089	6.240	200.0	24 390	16 260	32 352	39 200	5 815 523	11 179
81-5008-2	MTL	1966	Continuous	12	2 172	4 693	3.895	178.0	27 286	12 824	25 542	19 751	2 024 597	7 798
P-00010	MTQ	1961	Simply Supp.	3	3 200	31 909	13.955	184.2	9 296	4 838	9 555	33 833	6 764 337	8 764
P-00091	MTQ	1975	Continuous	3	3 200	33 809	24.974	203.2	8 839	6 180	12 181	21 580	5 967 203	11 939
P-00163A	MTQ	1975	Simply Supp.	3	3 200	20 533	2.967	203.2	9 144	6 393	12 608	33 528	4 823 178	11 367
P-14595	MTQ	1975	Continuous	4	3 658	11 223	3.820	191	11 277	6 497	12 855	18 288	3 005 904	9 440
P-13911	MTQ	1971	Simply Supp.	5	2 743	15 784	12.560	191	14 021	8 078	16 017	30 480	4 723 223	9 701
P-10719	MTQ	1999	Simply Supp.	4	2 300	4 971	2.344	200	8 900	5 933	11 699	20 250	1 471 289	13 142
P-16654	MTQ	2008	Continuous	6	3 450	18 079	28.066	200	20 475	13 650	27 132	33 000	4 599 113	13 800
P-15950	MTQ	1987	Simply Supp.	3	3 000	8 609	5.020	240	8 900	10 253	20 157	28 100	3 318 592	22 634
P-15881	MTQ	1985	Continuous	4	3 200	11 315	1.830	220	12 600	11 180	22 115	24 046	2 505 632	17 484
P-16497	MTQ	2006	Continuous	13	1 940	9 850	16.976	200	24 380	16 253	32 339	19 680	3 609 500	13 877

Bridges Informations				Concrete CiP T Beams				Concrete Slab				Composite Deck		
Bridge ID	Source	Year	Continuity	N	S	I_{Beam}	J_{Beam}	t_c	W	I_{Slab}	J_{Slab}	L	Dx = EI	Dxy = GJ
					(mm)	($x10^6$ mm^4)	($x10^6$ mm^4)	(mm)	(mm)	($x10^6$ mm^4)	($x10^6$ mm^4)	(mm)	($kN*m^2/m$)	($kN*m^2/m$)
81-3314	MTL	1966	Simply Supp.	6	1 676	44 797	90 895	198.7	9 398	6 144	12 124	20 117	1 321 135	594 170
81-5056	MTL	1990	Continuous	7	2525	56 300	26 171	250.0	18 000	23 438	46 465	10 488	1 817 661	126 127
81-5051	MTL	1924	Continuous	2	4826	271 420	52 122	203.2	5 321	3 721	7 262	10 241	5 747 148	209 226
P0-51-00446	MTQ	1951	Simply Supp.	2	3911.6	91 469	31 123	190.5	6 934	3 995	7 851	21 336	1 636 774	100 591
P0-55-00488	MTQ	1955	Simply Supp.	6	2 438	32 398	18 972	190.5	13 818	7 960	15 783	15 240	891 968	93 275
P0-51-05055	MTQ	1951	Simply Supp.	5	2 515	108 216	33 550	190.5	12 268	7 068	13 997	42 723	2 392 352	147 793
P0-54-06070	MTQ	1953	Simply Supp.	3	3 048	61 245	25 863	203.2	8 712	6 091	12 004	19 812	1 349 742	102 167
P0-54-06730	MTQ	1954	Simply Supp.	3	3 124	39 972	21 008	203.2	8 712	6 091	12 004	15 240	936 917	85 396
81-5033	MTL	1985	Continuous	8	3 000	203 832	145 693	200.0	25 000	16 667	33 165	7 955	3 196 771	480 060
81-5092	MTL	1965	Simply Supp.	5	2 946	35 533	16 739	203.2	12 192	8 524	16 870	16 154	1 132 915	81 744
P-14318	MTQ	1975	Simply Supp.	4	2 997	163 684	42 613	203.2	11 354	7 938	15 698	26 416	3 614 179	163 477
P-00018	MTQ	1961	Simply Supp.	4	2 743	13 653	12 129	190.5	11 074	6 380	12 621	12 192	478 986	54 559
P-00024A	MTQ	1961	Simply Supp.	5	2 077	80 566	44 681	177.8	10 706	5 015	9 924	19 815	2 174 180	217 968
P-00121	MTQ	2002	Continuous	5	2 134	83 081	24 364	191.0	10 044	5 832	11 524	14 630	2 189 364	132 351
P-00319	MTQ	1962	Simply Supp.	4	2 896	14 384	12 470	177.8	11 074	5 187	10 269	10 668	477 024	53 816
P-07602	MTQ	1938	Simply Supp.	3	2 743	15 748	17 359	190.5	8 230	4 741	9 344	12 192	432 353	74 050
P-15382	MTQ	1975	Simply Supp.	7	2 388	46 922	43 914	177.8	16 650	7 799	15 492	15 392	1 255 968	193 878
P-04607	MTQ	1955	Simply Supp.	3	3 124	49 865	23 436	203.2	8 712	6 091	12 004	18 313	1 131 513	93 781
P-04624	MTQ	1945	Simply Supp.	2	3 912	8 338	5 895	190.5	7 010	4 039	7 939	10 058	209 507	27 413
P-04685	MTQ	1948	Simply Supp.	2	3 912	51 656	23 840	190.5	6 934	3 995	7 851	18 339	995 542	79 520
P-05011	MTQ	1937	Simply Supp.	3	2 438	92 861	29 511	203.2	7 010	4 902	9 624	20 726	2 588 906	139 470
P-05101	MTQ	1964	Simply Supp.	4	3 048	38 025	18 766	203.2	7 010	4 902	9 624	18 288	1 514 656	120 192
P-05233	MTQ	1948	Simply Supp.	4	3 200	17 599	13 444	215.9	12 192	10 225	20 221	13 767	468 621	59 683
			Simply Supp.	4	3 200	104 040	32 863	215.9	12 192	10 225	20 221	21 387	2 103 600	123 601
P-05239	MTQ	1961	Simply Supp.	4	2 896	14 384	12 470	177.8	11 151	5 223	10 341	10 668	474 789	53 507
P-00922	MTQ	1947	Simply Supp.	4	2 794	15 566	12 512	190.5	10 744	6 190	12 241	12 192	430 887	57 335
P-00831	MTQ	1951	Simply Supp.	4	3 404	41 521	21 413	190.5	13 030	7 507	14 875	15 240	861 326	76 568
P-00898	MTQ	1965	Simply Supp.	5	2 134	32 082	18 057	200.0	11 125	7 417	14 665	19 837	1 070 072	93 683
P-00794	MTQ	1947	Simply Supp.	3	3 124	35 549	19 795	190.5	8 611	4 961	9 783	18 288	823 244	79 761
P-00830	MTQ	1946	Simply Supp.	2	3 912	25 350	16 558	190.5	6 934	3 995	7 851	13 716	540 879	58 449
P-02687	MTQ	1942	Simply Supp.	2	4 572	35 262	22 574	203.2	8 026	5 612	11 045	21 386	594 718	69 236
P-02659	MTQ	1962	Simply Supp.	4	2 819	61 228	24 740	177.8	11 125	5 211	10 317	19 812	1 530 548	97 866
P-03061	MTQ	1957	Simply Supp.	3	3 124	22 087	15 344	203.2	8 712	6 091	12 004	12 192	568 885	65 829
P-03363	MTQ	1989	Simply Supp.	5	1 448	11 698	8 211	190.0	8 230	4 704	9 271	12 912	610 439	60 529
P-03133	MTQ	1932	Simply Supp.	5	1 600	43 037	24 003	215.9	8 077	6 774	13 320	14 935	1 796 900	164 406
P-04005N	MTQ	2001	Simply Supp.	5	3 048	158 978	83 929	220.0	15 670	13 905	27 563	18 312	3 261 582	285 030
P-04000	MTQ	1951	Simply Supp.	5	3 048	19 110	14 130	190.5	14 503	8 356	16 573	10 668	483 990	59 505
P-04120	MTQ	1961	Simply Supp.	4	2 743	19 110	14 130	190.5	10 541	6 073	12 007	12 192	517 356	64 394
P-04245	MTQ	1935	Simply Supp.	3	2 286	41 329	23 212	240.0	6 960	8 017	15 687	12 192	1 445 116	121 354
P-04371	MTQ	1976	Simply Supp.	6	2 134	89 395	32 913	240.0	14 402	16 591	32 833	18 120	2 644 738	158 777
P-04278	MTQ	1964	Simply Supp.	4	2 743	24 542	15 338	177.8	10 058	4 711	9 318	15 240	781 147	69 811
P-06572	MTQ	1935	Simply Supp.	4	2 286	59 540	18 070	228.6	9 144	9 103	17 919	15 850	1 943 144	97 539
P-06490	MTQ	1956	Simply Supp.	4	2 286	4 162	4 763	177.8	8 712	4 081	8 057	12 243	175 726	30 546
P-07067	MTQ	1963	Simply Supp.	4	2 819	24 542	15 338	177.8	11 125	5 211	10 317	13 716	730 260	63 953
P-07244	MTQ	1958	Simply Supp.	6	2 438	32 786	18 985	190.5	13 894	8 004	15 870	15 240	889 237	92 881
P-07154	MTQ	1966	Simply Supp.	4	3 048	38 025	18 766	190.5	12 040	6 936	13 734	16 764	1 026 182	73 162
P-13560E-1	MTQ	1974	Continuous	14	2 210	57 382	49 645	177.8	29 947	14 027	27 949	19 751	1 606 612	241 521
P-13560E-2	MTQ	1974	Continuous	8	2 210	57 382	49 645	177.8	16 535	7 745	15 385	19 751	1 640 720	249 618
P-07353	MTQ	1940	Simply Supp.	3	2 896	10 616	5 872	190.5	8 077	4 653	9 168	12 801	306 570	32 445
			Simply Supp.	3	2 896	19 348	7 891	190.5	8 077	4 653	9 168	15 545	507 540	39 967
P-07742	MTQ	1935	Simply Supp.	3	2 819	44 405	21 337	241.3	8 179	9 576	18 796	14 020	1 406 301	99 904
P-07610	MTQ	1941	Simply Supp.	5	2 845	81 866	45 126	203.2	13 716	9 590	19 001	19 812	1 777 208	177 922
P-07451	MTQ	2002	Continuous	4	2 896	47 857	56 052	220.0	12 600	11 180	22 115	8 230	1 217 126	194 848
P-07360	MTQ	1937	Simply Supp.	3	2 286	71 288	19 475	228.6	6 960	6 928	13 570	18 288	2 229 929	102 365
P-07850	MTQ	1960	Simply Supp.	4	2 743	32 786	18 985	190.5	10 541	6 073	12 007	15 240	814 763	82 876
P-09738	MTQ	1975	Continuous	7	2 083	19 423	6 819	152.4	15 240	4 495	8 934	17 374	682 481	36 879
P-07954	MTQ	1959	Simply Supp.	5	2 362	26 050	11 837	190.5	11 151	6 424	12 710	15 240	805 045	63 856
P-13998	MTQ	1968	Simply Supp.	4	2 896	41 841	22 292	190.5	10 973	6 321	12 505	16 764	1 170 086	92 130
P-13946	MTQ	1969	Simply Supp.	5	2 946	48 543	22 354	190.5	14 630	8 429	16 719	18 288	1 270 448	87 276

Bridges Information				Concrete PC I Beams				Concrete Slab				Composite Deck		
Bridge ID	Source	Year	Continuity	N	S	I_{Beam}	J_{Beam}	t_c	W	I_{Slab}	J_{Slab}	L	Dx = EI	Dxy = GJ
					(mm)	($x10^6$ mm^4)	($x10^6$ mm^4)	(mm)	(mm)	($x10^6$ mm^4)	($x10^6$ mm^4)	(mm)	($kN*m^2/m$)	($kN*m^2/m$)
81-5052	MTL	1979	Continuous	12	1 829	52 191	3 323	165.1	20 117	7 544	15 011	10 927	2 003 535	29 329
81-5042	MTL	1966	Simply Supp.	7	1 600	108 549	6 355	152.4	10 770	3 177	6 297	30 133	3 589 741	52 078
81-5227	MTL	1996	Simply Supp.	10	2 600	52 182	3 327	216.0	26 720	22 440	44 651	18 500	1 686 234	29 610
81-1203	MTL	1968	Simply Supp.	12	1 829	108 549	6 355	152.4	21 946	6 473	12 890	30 480	3 204 486	44 700
			Simply Supp.	12	1 829	52 182	3 327	152.4	21 946	6 473	12 890	23 241	1 821 525	26 005
81-3107	MTL	1997	Simply Supp.	10	2 620	108 549	6 355	200.0	26 200	17 467	34 765	28 138	2 872 987	39 735
81-5071B-1	MTL	1966	Simply Supp.	9	1 956	108 549	6 355	152.4	18 288	5 394	10 732	38 100	2 990 909	40 772
81-5071B-2	MTL	1966	Simply Supp.	9	1 956	108 549	6 355	152.4	18 288	5 394	10 732	38 100	2 990 909	40 772
81-3218	MTL	1964	Simply Supp.	13	1 537	108 571	6 354	152.4	19 406	5 724	11 391	25 603	3 662 716	53 522
81-3233	MTL	1965	Simply Supp.	27	1 664	108 549	6 355	200.0	44 674	29 783	59 397	29 870	3 880 608	55 738
81-5026	MTL	1972	Simply Supp.	8	2 642	108 549	6 355	203.2	19 814	13 854	27 528	25 724	3 005 848	41 900
81-5040	MTL	1966	Simply Supp.	10	1 524	108 549	6 355	152.4	15 392	4 540	9 024	37 897	3 588 625	52 070
81-5055	MTL	2002	Continuous	6	3 000	52 187	3 330	220.0	17 520	15 546	30 846	10 424	1 599 459	29 261
81-5077	MTL	1970	Simply Supp.	16	1 829	52 187	3 330	152.4	29 261	8 631	17 205	24 815	1 821 861	26 031
			Simply Supp.	16	1 829	108 549	6 355	152.4	29 261	8 631	17 205	31 394	3 204 486	44 706
81-5198	MTL	1970	Simply Supp.	11	1 372	9 467	1 008	152.4	14 834	4 375	8 694	11 333	581 856	13 893
81-5009	MTL	2000	Simply Supp.	8	1 626	52 187	3 330	200.0	12 720	8 480	16 792	24 741	2 289 935	35 932
81-5015	MTL	2000	Simply Supp.	11	1 829	143 498	8 704	200.0	20 120	13 413	26 659	33 223	4 407 173	66 063
81-5006	MTL	2000	Simply Supp.	11	1 829	52 187	3 330	200.0	20 118	13 412	26 656	25 888	2 091 444	32 888
81-5004	MTL	2000	Simply Supp.	15	1 702	108 549	6 355	200.0	24 384	16 256	32 344	32 683	3 925 092	56 483
81-5007	MTL	2004	Simply Supp.	11	2 745	108 549	6 355	200.0	20 130	13 420	26 672	32 233	3 636 045	51 539
81-5008-1	MTL	1966	Simply Supp.	8	1 626	52 187	3 330	152.4	12 802	3 776	7 495	24 384	1 985 343	28 944
81-5100	MTL	1965	Simply Supp.	7	1 219	9 467	1 008	152.4	8 839	2 607	5 158	16 231	607 111	14 442
81-5105	MTL	1965	Simply Supp.	7	1 219	9 467	1 008	152.4	8 839	2 607	5 158	16 535	607 111	14 442
81-5094	MTL	1965	Simply Supp.	7	1 219	9 467	1 008	152.4	8 839	2 607	5 158	19 126	607 111	14 442
81-5095	MTL	1965	Simply Supp.	7	1 219	9 467	1 008	152.4	8 839	2 607	5 158	16 535	607 111	14 442
81-5103	MTL	1965	Simply Supp.	7	1 219	21 219	1 536	152.4	8 839	2 607	5 158	22 555	1 176 094	19 168
81-5123-1	MTL	1990	Continuous	9	2 647	216 794	7 746	180.0	22 500	10 935	21 760	18 588	4 356 537	43 983
81-5123-2	MTL	1990	Continuous	12	1 787	216 794	7 746	180.0	21 150	10 279	20 448	27 552	5 576 802	58 619
81-5123-3	MTL	1990	Continuous	10	1 787	216 794	7 746	180.0	18 518	9 000	17 889	24 000	5 384 484	56 219
81-5123-4	MTL	1990	Continuous	10	1 787	216 794	7 746	180.0	17 500	8 505	16 900	29 424	5 605 101	58 963
P-13698	MTQ	1961	Simply Supp.	9	1 448	252 500	8 813	177.8	12 802	5 996	11 888	37 135	7 255 208	78 599
P-14601	MTQ	1971	Simply Supp.	5	1 905	216 794	7 746	177.8	10 058	4 711	9 318	36 576	5 054 075	52 096

ANNEXE 2 – CAS DE CHARGEMENT CONSIDÉRÉS (GRILLAGE)

4.2 m wide 1 Lane Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*
1 Lane - 1, 1L	1.0500	2.8500						
1 Lane - 1, 1C	1.2000	3.0000						

4.8 m wide 1 Lane Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*
1 Lane - 1, 1L	1.0500	2.8500						
1 Lane - 1, 1C	1.5000	3.3000						

6.8 m wide 1 Lane Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*
1 Lane - 1, 1L	1.0500	2.8500						
1 Lane - 1, 1C	2.5000	4.3000						

6.9 m wide 2 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
2 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1C	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1R	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	4.0500	5.8500				
2 Lanes - 2, 1L2R	1.0500	2.8500	4.0500	5.8500				
2 Lanes - 2, 1C2C	1.0500	2.8500	4.0500	5.8500				
2 Lanes - 2, 1R2L	1.0500	2.8500	4.0500	5.8500				

7.5 m wide 2 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
2 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1C	1.2000	3.0000						
2 Lanes - 1, 1R	1.3500	3.1500						
2 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	4.3500	6.1500				
2 Lanes - 2, 1L2R	1.0500	2.8500	4.6500	6.4500				
2 Lanes - 2, 1C2C	1.2000	3.0000	4.5000	6.3000				
2 Lanes - 2, 1R2L	1.3500	3.1500	4.3500	6.1500				

8.7 m wide 2 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
2 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1C	1.5000	3.3000						
2 Lanes - 1, 1R	1.9500	3.7500						
2 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	4.9500	6.7500				
2 Lanes - 2, 1L2R	1.0500	2.8500	5.8500	7.6500				
2 Lanes - 2, 1C2C	1.5000	3.3000	5.4000	7.2000				
2 Lanes - 2, 1R2L	1.9500	3.7500	4.9500	6.7500				

10.9 m wide 2 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
2 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1C	2.0500	3.8500						
2 Lanes - 1, 1R	3.0500	4.8500						
2 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	6.0500	7.8500				
2 Lanes - 2, 1L2R	1.0500	2.8500	8.0500	9.8500				
2 Lanes - 2, 1C2C	2.0500	3.8500	7.0500	8.8500				
2 Lanes - 2, 1R2L	3.0500	4.8500	6.0500	7.8500				

11 m wide 3 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*
2 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1C	2.0750	3.8750						
2 Lanes - 1, 1R	3.1000	4.9000						
2 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	6.1000	7.9000				
2 Lanes - 2, 1L2R	1.0500	2.8500	8.1500	9.9500				
2 Lanes - 2, 1C2C	2.0750	3.8750	7.1250	8.9250				
2 Lanes - 2, 1R2L	3.1000	4.9000	6.1000	7.9000				
3 Lanes - 1, 1C	1.2333	3.0333						
3 Lanes - 1, 1R	1.4167	3.2167						
3 Lanes - 1, 2L	4.4167	6.2167						
3 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	4.4167	6.2167				
3 Lanes - 2, 1L2C	1.0500	2.8500	4.6000	6.4000				
3 Lanes - 2, 1C2C	1.2333	3.0333	4.6000	6.4000				
3 Lanes - 2, 1C3C	1.2333	3.0333	7.9667	9.7667				
3 Lanes - 2, 1R2L	1.4167	3.2167	4.4167	6.2167				
3 Lanes - 2, 1R3L	1.4167	3.2167	7.7833	9.5833				
3 Lanes - 3, 1L2L3L	1.0500	2.8500	4.4167	6.2167	7.7833	9.5833		
3 Lanes - 3, 1L2L3R	1.0500	2.8500	4.4167	6.2167	8.1500	9.9500		
3 Lanes - 3, 1L2C3R	1.0500	2.8500	4.6000	6.4000	8.1500	9.9500		
3 Lanes - 3, 1C2C3C	1.2333	3.0333	4.6000	6.4000	7.9667	9.7667		
3 Lanes - 3, 1C2R3L	1.2333	3.0333	4.7833	6.5833	7.7833	9.5833		
3 Lanes - 3, 1R2L3L	1.4167	3.2167	4.4167	6.2167	7.7833	9.5833		
3 Lanes - 3, 1R2C3L	1.4167	3.2167	4.6000	6.4000	7.7833	9.5833		

12.9 m wide 3 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*
2 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1C	2.5500	4.3500						
2 Lanes - 1, 1R	4.0500	5.8500						
2 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	7.0500	8.8500				
2 Lanes - 2, 1L2R	1.0500	2.8500	10.0500	11.8500				
2 Lanes - 2, 1C2C	2.5500	4.3500	8.5500	10.3500				
2 Lanes - 2, 1R2L	4.0500	5.8500	7.0500	8.8500				
3 Lanes - 1, 1C	1.5500	3.3500						
3 Lanes - 1, 1R	2.0500	3.8500						
3 Lanes - 1, 2L	5.0500	6.8500						
3 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	5.0500	6.8500				
3 Lanes - 2, 1L2C	1.0500	2.8500	5.5500	7.3500				
3 Lanes - 2, 1C2C	1.5500	3.3500	5.5500	7.3500				
3 Lanes - 2, 1C3C	1.5500	3.3500	9.5500	11.3500				
3 Lanes - 2, 1R2L	2.0500	3.8500	5.0500	6.8500				
3 Lanes - 2, 1R3L	2.0500	3.8500	9.0500	10.8500				
3 Lanes - 3, 1L2L3L	1.0500	2.8500	5.0500	6.8500	9.0500	10.8500		
3 Lanes - 3, 1L2L3R	1.0500	2.8500	5.0500	6.8500	10.0500	11.8500		
3 Lanes - 3, 1L2C3R	1.0500	2.8500	5.5500	7.3500	10.0500	11.8500		
3 Lanes - 3, 1C2C3C	1.5500	3.3500	5.5500	7.3500	9.5500	11.3500		
3 Lanes - 3, 1C2R3L	1.5500	3.3500	6.0500	7.8500	9.0500	10.8500		
3 Lanes - 3, 1R2L3L	2.0500	3.8500	5.0500	6.8500	9.0500	10.8500		
3 Lanes - 3, 1R2C3L	2.0500	3.8500	5.5500	7.3500	9.0500	10.8500		

14.4 m wide 3 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*	*(m)*
2 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
2 Lanes - 1, 1C	2.9250	4.7250						
2 Lanes - 1, 1R	4.8000	6.6000						
2 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	7.8000	9.6000				
2 Lanes - 2, 1L2R	1.0500	2.8500	11.5500	13.3500				
2 Lanes - 2, 1C2C	2.9250	4.7250	9.6750	11.4750				
2 Lanes - 2, 1R2L	4.8000	6.6000	7.8000	9.6000				
3 Lanes - 1, 1C	1.8000	3.6000						
3 Lanes - 1, 1R	2.5500	4.3500						
3 Lanes - 1, 2L	5.5500	7.3500						
3 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	5.5500	7.3500				
3 Lanes - 2, 1L2C	1.0500	2.8500	6.3000	8.1000				
3 Lanes - 2, 1C2C	1.8000	3.6000	6.3000	8.1000				
3 Lanes - 2, 1C3C	1.8000	3.6000	10.8000	12.6000				
3 Lanes - 2, 1R2L	2.5500	4.3500	5.5500	7.3500				
3 Lanes - 2, 1R3L	2.5500	4.3500	10.0500	11.8500				
3 Lanes - 3, 1L2L3L	1.0500	2.8500	5.5500	7.3500	10.0500	11.8500		
3 Lanes - 3, 1L2L3R	1.0500	2.8500	5.5500	7.3500	11.5500	13.3500		
3 Lanes - 3, 1L2C3R	1.0500	2.8500	6.3000	8.1000	11.5500	13.3500		
3 Lanes - 3, 1C2C3C	1.8000	3.6000	6.3000	8.1000	10.8000	12.6000		
3 Lanes - 3, 1C2R3L	1.8000	3.6000	7.0500	8.8500	10.0500	11.8500		
3 Lanes - 3, 1R2L3L	2.5500	4.3500	5.5500	7.3500	10.0500	11.8500		
3 Lanes - 3, 1R2C3L	2.5500	4.3500	6.3000	8.1000	10.0500	11.8500		

14.5 m wide 4 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
4 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
4 Lanes - 1, 1C	1.2500	3.0500						
4 Lanes - 1, 1R	1.4500	3.2500						
4 Lanes - 1, 2L	4.4500	6.2500						
4 Lanes - 1, 2C	4.6500	6.4500						
4 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	4.4500	6.2500				
4 Lanes - 2, 1L2C	1.0500	2.8500	4.6500	6.4500				
4 Lanes - 2, 1C2C	1.2500	3.0500	4.6500	6.4500				
4 Lanes - 2, 1C3C	1.2500	3.0500	8.0500	9.8500				
4 Lanes - 2, 1C4C	1.2500	3.0500	11.4500	13.2500				
4 Lanes - 2, 1R2L	1.4500	3.2500	4.4500	6.2500				
4 Lanes - 2, 1R3L	1.4500	3.2500	7.8500	9.6500				
4 Lanes - 2, 1R4L	1.4500	3.2500	11.2500	13.0500				
4 Lanes - 2, 2L3L	4.4500	6.2500	7.8500	9.6500				
4 Lanes - 2, 2L3R	4.4500	6.2500	8.2500	10.0500				
4 Lanes - 2, 2C3C	4.6500	6.4500	8.0500	9.8500				
4 Lanes - 3, 1L2L3L	1.0500	2.8500	4.4500	6.2500	7.8500	9.6500		
4 Lanes - 3, 1L2D3L	1.0500	2.8500	4.8500	6.6500	7.8500	9.6500		
4 Lanes - 3, 1C2C3C	1.2500	3.0500	4.6500	6.4500	8.0500	9.8500		
4 Lanes - 3, 1R2L3C	1.4500	3.2500	4.4500	6.2500	8.0500	9.8500		
4 Lanes - 3, 1R2C3L	1.4500	3.2500	4.6500	6.4500	7.8500	9.6500		
4 Lanes - 3, 1C2C4C	1.2500	3.0500	4.6500	6.4500	11.4500	13.2500		
4 Lanes - 3, 1R2L4C	1.4500	3.2500	4.4500	6.2500	11.4500	13.2500		
4 Lanes - 3, 1R2L4R	1.4500	3.2500	4.4500	6.2500	11.6500	13.4500		
4 Lanes - 4, 1L2L3L4L	1.0500	2.8500	4.4500	6.2500	7.8500	9.6500	11.2500	13.0500
4 Lanes - 4, 1L2L3L4R	1.0500	2.8500	4.4500	6.2500	7.8500	9.6500	11.6500	13.4500
4 Lanes - 4, 1L2L3C4C	1.0500	2.8500	4.4500	6.2500	8.0500	9.8500	11.4500	13.2500
4 Lanes - 4, 1L2L3R4R	1.0500	2.8500	4.4500	6.2500	8.2500	10.0500	11.6500	13.4500
4 Lanes - 4, 1L2C3C4C	1.0500	2.8500	4.6500	6.4500	8.0500	9.8500	11.4500	13.2500
4 Lanes - 4, 1L2R3L4R	1.0500	2.8500	4.8500	6.6500	7.8500	9.6500	11.6500	13.4500
4 Lanes - 4, 1C2L3L4L	1.2500	3.0500	4.4500	6.2500	7.8500	9.6500	11.2500	13.0500
4 Lanes - 4, 1C2C3L4L	1.2500	3.0500	4.6500	6.4500	7.8500	9.6500	11.2500	13.0500
4 Lanes - 4, 1C2C3C4L	1.2500	3.0500	4.6500	6.4500	8.0500	9.8500	11.2500	13.0500
4 Lanes - 4, 1C2C3C4C	1.2500	3.0500	4.6500	6.4500	8.0500	9.8500	11.4500	13.2500
4 Lanes - 4, 1R2C3C4L	1.4500	3.2500	4.6500	6.4500	8.0500	9.8500	11.2500	13.0500
4 Lanes - 4, 1R2R3L4L	1.4500	3.2500	4.8500	6.6500	7.8500	9.6500	11.2500	13.0500

16.5 m wide 4 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
4 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
4 Lanes - 1, 1C	1.5000	3.3000						
4 Lanes - 1, 1R	1.9500	3.7500						
4 Lanes - 1, 2L	4.9500	6.7500						
4 Lanes - 1, 2C	5.4000	7.2000						
4 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	4.9500	6.7500				
4 Lanes - 2, 1L2C	1.0500	2.8500	5.4000	7.2000				
4 Lanes - 2, 1C2C	1.5000	3.3000	5.4000	7.2000				
4 Lanes - 2, 1C3C	1.5000	3.3000	9.3000	11.1000				
4 Lanes - 2, 1C4C	1.5000	3.3000	13.2000	15.0000				
4 Lanes - 2, 1R2L	1.9500	3.7500	4.9500	6.7500				
4 Lanes - 2, 1R3L	1.9500	3.7500	8.8500	10.6500				
4 Lanes - 2, 1R4L	1.9500	3.7500	12.7500	14.5500				
4 Lanes - 2, 2L3L	4.9500	6.7500	8.8500	10.6500				
4 Lanes - 2, 2L3R	4.9500	6.7500	9.7500	11.5500				
4 Lanes - 2, 2C3C	5.4000	7.2000	9.3000	11.1000				
4 Lanes - 3, 1L2L3L	1.0500	2.8500	4.9500	6.7500	8.8500	10.6500		
4 Lanes - 3, 1L2D3L	1.0500	2.8500	5.8500	7.6500	8.8500	10.6500		
4 Lanes - 3, 1C2C3C	1.5000	3.3000	5.4000	7.2000	9.3000	11.1000		
4 Lanes - 3, 1R2L3C	1.9500	3.7500	4.9500	6.7500	9.3000	11.1000		
4 Lanes - 3, 1R2C3L	1.9500	3.7500	5.4000	7.2000	8.8500	10.6500		
4 Lanes - 3, 1C2C4C	1.5000	3.3000	5.4000	7.2000	13.2000	15.0000		
4 Lanes - 3, 1R2L4C	1.9500	3.7500	4.9500	6.7500	13.2000	15.0000		
4 Lanes - 3, 1R2L4R	1.9500	3.7500	4.9500	6.7500	13.6500	15.4500		
4 Lanes - 4, 1L2L3L4L	1.0500	2.8500	4.9500	6.7500	8.8500	10.6500	12.7500	14.5500
4 Lanes - 4, 1L2L3L4R	1.0500	2.8500	4.9500	6.7500	8.8500	10.6500	13.6500	15.4500
4 Lanes - 4, 1L2L3C4C	1.0500	2.8500	4.9500	6.7500	9.3000	11.1000	13.2000	15.0000
4 Lanes - 4, 1L2L3R4R	1.0500	2.8500	4.9500	6.7500	9.7500	11.5500	13.6500	15.4500
4 Lanes - 4, 1L2C3C4C	1.0500	2.8500	5.4000	7.2000	9.3000	11.1000	13.2000	15.0000
4 Lanes - 4, 1L2R3L4R	1.0500	2.8500	5.8500	7.6500	8.8500	10.6500	13.6500	15.4500
4 Lanes - 4, 1C2L3L4L	1.5000	3.3000	4.9500	6.7500	8.8500	10.6500	12.7500	14.5500
4 Lanes - 4, 1C2C3L4L	1.5000	3.3000	5.4000	7.2000	8.8500	10.6500	12.7500	14.5500
4 Lanes - 4, 1C2C3C4L	1.5000	3.3000	5.4000	7.2000	9.3000	11.1000	12.7500	14.5500
4 Lanes - 4, 1C2C3C4C	1.5000	3.3000	5.4000	7.2000	9.3000	11.1000	13.2000	15.0000
4 Lanes - 4, 1R2C3C4L	1.9500	3.7500	5.4000	7.2000	9.3000	11.1000	12.7500	14.5500
4 Lanes - 4, 1R2R3L4L	1.9500	3.7500	5.8500	7.6500	8.8500	10.6500	12.7500	14.5500

17.9 m wide 4 Lanes Bridge decks Load Cases

	Truck 1		Truck 2		Truck 3		Truck 4	
	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel	Left Wheel	Right Wheel
Load Cases	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
4 Lanes - 1, 1L	1.0500	2.8500						
4 Lanes - 1, 1C	1.6750	3.4750						
4 Lanes - 1, 1R	2.3000	4.1000						
4 Lanes - 1, 2L	5.3000	7.1000						
4 Lanes - 1, 2C	5.9250	7.7250						
4 Lanes - 2, 1L2L	1.0500	2.8500	5.3000	7.1000				
4 Lanes - 2, 1L2C	1.0500	2.8500	5.9250	7.7250				
4 Lanes - 2, 1C2C	1.6750	3.4750	5.9250	7.7250				
4 Lanes - 2, 1C3C	1.6750	3.4750	10.1750	11.9750				
4 Lanes - 2, 1C4C	1.6750	3.4750	14.4250	16.2250				
4 Lanes - 2, 1R2L	2.3000	4.1000	5.3000	7.1000				
4 Lanes - 2, 1R3L	2.3000	4.1000	9.5500	11.3500				
4 Lanes - 2, 1R4L	2.3000	4.1000	13.8000	15.6000				
4 Lanes - 2, 2L3L	5.3000	7.1000	9.5500	11.3500				
4 Lanes - 2, 2L3R	5.3000	7.1000	10.8000	12.6000				
4 Lanes - 2, 2C3C	5.9250	7.7250	10.1750	11.9750				
4 Lanes - 3, 1L2L3L	1.0500	2.8500	5.3000	7.1000	9.5500	11.3500		
4 Lanes - 3, 1L2D3L	1.0500	2.8500	6.5500	8.3500	9.5500	11.3500		
4 Lanes - 3, 1C2C3C	1.6750	3.4750	5.9250	7.7250	10.1750	11.9750		
4 Lanes - 3, 1R2L3C	2.3000	4.1000	5.3000	7.1000	10.1750	11.9750		
4 Lanes - 3, 1R2C3L	2.3000	4.1000	5.9250	7.7250	9.5500	11.3500		
4 Lanes - 3, 1C2C4C	1.6750	3.4750	5.9250	7.7250	14.4250	16.2250		
4 Lanes - 3, 1R2L4C	2.3000	4.1000	5.3000	7.1000	14.4250	16.2250		
4 Lanes - 3, 1R2L4R	2.3000	4.1000	5.3000	7.1000	15.0500	16.8500		
4 Lanes - 4, 1L2L3L4L	1.0500	2.8500	5.3000	7.1000	9.5500	11.3500	13.8000	15.6000
4 Lanes - 4, 1L2L3L4R	1.0500	2.8500	5.3000	7.1000	9.5500	11.3500	15.0500	16.8500
4 Lanes - 4, 1L2L3C4C	1.0500	2.8500	5.3000	7.1000	10.1750	11.9750	14.4250	16.2250
4 Lanes - 4, 1L2L3R4R	1.0500	2.8500	5.3000	7.1000	10.8000	12.6000	15.0500	16.8500
4 Lanes - 4, 1L2C3C4C	1.0500	2.8500	5.9250	7.7250	10.1750	11.9750	14.4250	16.2250
4 Lanes - 4, 1L2R3L4R	1.0500	2.8500	6.5500	8.3500	9.5500	11.3500	15.0500	16.8500
4 Lanes - 4, 1C2L3L4L	1.6750	3.4750	5.3000	7.1000	9.5500	11.3500	13.8000	15.6000
4 Lanes - 4, 1C2C3L4L	1.6750	3.4750	5.9250	7.7250	9.5500	11.3500	13.8000	15.6000
4 Lanes - 4, 1C2C3C4L	1.6750	3.4750	5.9250	7.7250	10.1750	11.9750	13.8000	15.6000
4 Lanes - 4, 1C2C3C4C	1.6750	3.4750	5.9250	7.7250	10.1750	11.9750	14.4250	16.2250
4 Lanes - 4, 1R2C3C4L	2.3000	4.1000	5.9250	7.7250	10.1750	11.9750	13.8000	15.6000
4 Lanes - 4, 1R2R3L4L	2.3000	4.1000	6.5500	8.3500	9.5500	11.3500	13.8000	15.6000

1 Lane Bridge Decks Load Combinations

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-A&B	1 Lane - 1, 1L	1.0
	1 Lane - 1, 1C	1.0
ULS2-FLS	1 Lane - 1, 1C	1.0

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-C&D	1 Lane - 1, 1L	1.0
	1 Lane - 1, 1C	1.0

2 Lanes Bridge Decks Load Combinations

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-A&B	2 Lanes - 1, 1L	1.0
	2 Lanes - 1, 1C	1.0
	2 Lanes - 1, 1R	1.0
	2 Lanes - 2, 1L2L	0.9
	2 Lanes - 2, 1L2R	0.9
	2 Lanes - 2, 1C2C	0.9
	2 Lanes - 2, 1R2L	0.9
ULS2-FLS	2 Lanes - 1, 1C	1.0

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-C&D	2 Lanes - 1, 1L	1.0
	2 Lanes - 1, 1C	1.0
	2 Lanes - 1, 1R	1.0
	2 Lanes - 2, 1L2L	0.85
	2 Lanes - 2, 1L2R	0.85
	2 Lanes - 2, 1C2C	0.85
	2 Lanes - 2, 1R2L	0.85

3 Lanes Bridge Decks Load Combinations

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-A&B	2 Lanes - 1, 1L	1.0
	2 Lanes - 1, 1C	1.0
	2 Lanes - 1, 1R	1.0
	2 Lanes - 2, 1L2L	0.9
	2 Lanes - 2, 1L2R	0.9
	2 Lanes - 2, 1C2C	0.9
	2 Lanes - 2, 1R2L	0.9
	3 Lanes - 1, 1C	1.0
	3 Lanes - 1, 1R	1.0
	3 Lanes - 1, 2L	1.0
	3 Lanes - 2, 1L2L	0.9
	3 Lanes - 2, 1L2C	0.9
	3 Lanes - 2, 1C2C	0.9
	3 Lanes - 2, 1C3C	0.9
	3 Lanes - 2, 1R2L	0.9
	3 Lanes - 2, 1R3L	0.9
	3 Lanes - 3, 1L2L3L	0.8
	3 Lanes - 3, 1L2L3R	0.8
	3 Lanes - 3, 1L2C3R	0.8
	3 Lanes - 3, 1C2C3C	0.8
	3 Lanes - 3, 1C2R3L	0.8
	3 Lanes - 3, 1R2L3L	0.8
	3 Lanes - 3, 1R2C3L	0.8
ULS2-FLS	1 Lane - 1, 1C *	1.0
	2 Lanes - 1, 1C	1.0
	3 Lanes - 1, 1C	1.0

** Load case is a duplicate of 3 Lanes - 1, 2C*

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-C&D	2 Lanes - 1, 1L	1.0
	2 Lanes - 1, 1C	1.0
	2 Lanes - 1, 1R	1.0
	2 Lanes - 2, 1L2L	0.85
	2 Lanes - 2, 1L2R	0.85
	2 Lanes - 2, 1C2C	0.85
	2 Lanes - 2, 1R2L	0.85
	3 Lanes - 1, 1C	1.0
	3 Lanes - 1, 1R	1.0
	3 Lanes - 1, 2L	1.0
	3 Lanes - 2, 1L2L	0.85
	3 Lanes - 2, 1L2C	0.85
	3 Lanes - 2, 1C2C	0.85
	3 Lanes - 2, 1C3C	0.85
	3 Lanes - 2, 1R2L	0.85
	3 Lanes - 2, 1R3L	0.85
	3 Lanes - 3, 1L2L3L	0.7
	3 Lanes - 3, 1L2L3R	0.7
	3 Lanes - 3, 1L2C3R	0.7
	3 Lanes - 3, 1C2C3C	0.7
	3 Lanes - 3, 1C2R3L	0.7
	3 Lanes - 3, 1R2L3L	0.7
	3 Lanes - 3, 1R2C3L	0.7

4 Lanes Bridge Decks Load Combinations, continued

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-A&B	4 Lanes - 1, 1L	1.0
	4 Lanes - 1, 1C	1.0
	4 Lanes - 1, 1R	1.0
	4 Lanes - 1, 2L	1.0
	4 Lanes - 1, 2C	1.0
	4 Lanes - 2, 1L2L	0.9
	4 Lanes - 2, 1L2C	0.9
	4 Lanes - 2, 1C2C	0.9
	4 Lanes - 2, 1C3C	0.9
	4 Lanes - 2, 1C4C	0.9
	4 Lanes - 2, 1R2L	0.9
	4 Lanes - 2, 1R3L	0.9
	4 Lanes - 2, 1R4L	0.9
	4 Lanes - 2, 2L3L	0.9
	4 Lanes - 2, 2L3R	0.9
	4 Lanes - 2, 2C3C	0.9
	4 Lanes - 3, 1L2L3L	0.8
	4 Lanes - 3, 1L2D3L	0.8
	4 Lanes - 3, 1C2C3C	0.8
	4 Lanes - 3, 1R2L3C	0.8
	4 Lanes - 3, 1R2C3L	0.8
	4 Lanes - 3, 1C2C4C	0.8
	4 Lanes - 3, 1R2L4C	0.8
	4 Lanes - 3, 1R2L4R	0.8
	4 Lanes - 4, 1L2L3L4L	0.8
	4 Lanes - 4, 1L2L3L4R	0.8
	4 Lanes - 4, 1L2L3C4C	0.8
	4 Lanes - 4, 1L2L3R4R	0.8
	4 Lanes - 4, 1L2C3C4C	0.8
	4 Lanes - 4, 1L2R3L4R	0.8
	4 Lanes - 4, 1C2L3L4L	0.8
	4 Lanes - 4, 1C2C3L4L	0.8
	4 Lanes - 4, 1C2C3C4L	0.8
	4 Lanes - 4, 1C2C3C4C	0.8
	4 Lanes - 4, 1R2C3C4L	0.8
	4 Lanes - 4, 1R2R3L4L	0.8
ULS2-FLS	4 Lanes - 1, 1C	1.0
	4 Lanes - 1, 2C	1.0

Load Combination	Included load cases	R_L
ULS1-SLS CL-C&D	4 Lanes - 1, 1L	1.0
	4 Lanes - 1, 1C	1.0
	4 Lanes - 1, 1R	1.0
	4 Lanes - 1, 2L	1.0
	4 Lanes - 1, 2C	1.0
	4 Lanes - 2, 1L2L	0.85
	4 Lanes - 2, 1L2C	0.85
	4 Lanes - 2, 1C2C	0.85
	4 Lanes - 2, 1C3C	0.85
	4 Lanes - 2, 1C4C	0.85
	4 Lanes - 2, 1R2L	0.85
	4 Lanes - 2, 1R3L	0.85
	4 Lanes - 2, 1R4L	0.85
	4 Lanes - 2, 2L3L	0.85
	4 Lanes - 2, 2L3R	0.85
	4 Lanes - 2, 2C3C	0.85
	4 Lanes - 3, 1L2L3L	0.7
	4 Lanes - 3, 1L2D3L	0.7
	4 Lanes - 3, 1C2C3C	0.7
	4 Lanes - 3, 1R2L3C	0.7
	4 Lanes - 3, 1R2C3L	0.7
	4 Lanes - 3, 1C2C4C	0.7
	4 Lanes - 3, 1R2L4C	0.7
	4 Lanes - 3, 1R2L4R	0.7
	4 Lanes - 4, 1L2L3L4L	0.7
	4 Lanes - 4, 1L2L3L4R	0.7
	4 Lanes - 4, 1L2L3C4C	0.7
	4 Lanes - 4, 1L2L3R4R	0.7
	4 Lanes - 4, 1L2C3C4C	0.7
	4 Lanes - 4, 1L2R3L4R	0.7
	4 Lanes - 4, 1C2L3L4L	0.7
	4 Lanes - 4, 1C2C3L4L	0.7
	4 Lanes - 4, 1C2C3C4L	0.7
	4 Lanes - 4, 1C2C3C4C	0.7
	4 Lanes - 4, 1R2C3C4L	0.7
	4 Lanes - 4, 1R2R3L4L	0.7

ANNEXE 3 – RÉSULTATS DE L'ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DES PONTS CONTINUS

Tableau A3.1 - Résultats des analyses des ponts avec poutres en acier

Numéro d'analyse	Description	Int/Ext	Position	Facteurs d'essieu		
				Grillage	Méthode simplifiée	MS / Grill.
1	ICCA - 3T 2V 3P	EXT	M+ (1-3)	0.825	0.868	1.05
			M- (pile)	0.847	0.879	1.04
			M+ (2)	0.827	0.875	1.06
			V (1-3)	0.864	0.947	1.10
			V (pile)	0.866	0.947	1.09
			V (2)	0.950	0.947	1.00
		INT	M+ (1-3)	0.658	0.778	1.18
			M- (pile)	0.688	0.809	1.18
			M+ (2)	0.661	0.798	1.21
			V (1-3)	0.900	0.947	1.05
			V (pile)	0.899	1.006	1.12
			V (2)	0.800	0.981	1.23
2	ICCA - 3T 3V 4P	EXT	M+ (1-3)	0.823	0.868	1.05
			M- (pile)	0.850	0.879	1.03
			M+ (2)	0.833	0.875	1.05
			V (1-3)	0.883	0.947	1.07
			V (pile)	0.884	0.947	1.07
			V (2)	0.864	0.947	1.10
		INT	M+ (1-3)	0.667	0.778	1.17
			M- (pile)	0.690	0.809	1.17
			M+ (2)	0.668	0.798	1.19
			V (1-3)	0.884	0.947	1.07
			V (pile)	0.880	1.006	1.14
			V (2)	0.783	0.981	1.25
3	ICCA - 3T 4V 5P	EXT	M+ (1-3)	0.826	0.876	1.06
			M- (pile)	0.838	0.885	1.06
			M+ (2)	0.828	0.882	1.06
			V (1-3)	0.885	0.947	1.07
			V (pile)	0.878	0.947	1.08
			V (2)	0.885	0.947	1.07
		INT	M+ (1-3)	0.683	0.792	1.16
			M- (pile)	0.692	0.820	1.19
			M+ (2)	0.683	0.811	1.19
			V (1-3)	0.820	0.947	1.16

			V (pile)	0.870	1.006	1.16
			V (2)	0.820	0.981	1.20
4	ICCA - 3T 4V 4P	EXT	M+ (1-3)	0.968	1.011	1.04
			M- (pile)	0.986	1.015	1.03
			M+ (2)	0.969	1.014	1.05
			V (1-3)	1.009	1.068	1.06
			V (pile)	1.035	1.068	1.03
			V (2)	1.009	1.068	1.06
		INT	M+ (1-3)	0.780	0.935	1.20
			M- (pile)	0.804	0.958	1.19
			M+ (2)	0.804	0.950	1.18
			V (1-3)	0.877	1.068	1.22
			V (pile)	0.976	1.134	1.16
			V (2)	0.889	1.106	1.24
5	ICCA - 2T 3V 4P (1)	EXT	M+	0.823	0.868	1.05
			M- (pile)	0.845	0.882	1.04
			V	0.850	0.947	1.11
			V (pile)	0.885	0.947	1.07
		INT	M+	0.667	0.778	1.17
			M- (pile)	0.703	0.821	1.17
			V	0.770	0.947	1.23
			V (pile)	0.903	1.033	1.14
6	ICCA - 2T 3V 4P (2)	EXT	M+ (1)	0.824	0.867	1.05
			M- (pile)	0.844	0.882	1.05
			M+ (2)	0.823	0.869	1.06
			V (1)	0.851	0.947	1.11
			V (pile)	0.881	0.947	1.08
			V (2)	0.881	0.947	1.08
		INT	M+ (1)	0.675	0.776	1.15
			M- (pile)	0.703	0.821	1.17
			M+ (2)	0.667	0.783	1.17
			V (1)	0.789	0.947	1.20
			V (pile)	0.899	1.033	1.15
			V (2)	0.894	0.947	1.06
7	ICCA - 2T 3V 4P (3)	EXT	M+ (1)	0.824	0.871	1.06
			M- (pile)	0.844	0.882	1.05
			M+ (2)	0.822	0.867	1.05
			V (1)	0.862	0.947	1.10
			V (pile)	0.844	0.947	1.12
			V (2)	0.879	0.947	1.08

		INT	M+ (1)	0.681	0.788	1.16
			M- (pile)	0.698	0.821	1.18
			M+ (2)	0.664	0.774	1.17
			V (1)	0.887	0.954	1.08
			V (pile)	0.888	1.033	1.16
			V (2)	0.885	0.947	1.07

Tableau A3.2 - Résultats des analyses des ponts avec poutres en béton

Numéro d'analyse	Description	Int/Ext	Position	Facteurs d'essieu		
				Grillage	Méthode simplifiée	MS / Grill.
8	P-11802 2T 3V 6P	EXT	M+ (1-2)	0.516	0.580	1.12
			M- (pile)	0.541	0.590	1.09
			V (1-2)	0.618	0.632	1.02
			V (pile)	0.598	0.634	1.06
		INT	M+ (1-2)	0.461	0.523	1.13
			M- (pile)	0.493	0.552	1.12
			V (1-2)	0.637	0.632	0.99
			V (pile)	0.635	0.697	1.10
9	P-11802 2T 4V 8P	EXT	M+ (1-2)	0.510	0.580	1.14
			M- (pile)	0.536	0.590	1.10
			V (1-2)	0.620	0.632	1.02
			V (pile)	0.596	0.634	1.06
		INT	M+ (1-2)	0.443	0.523	1.18
			M- (pile)	0.477	0.552	1.16
			V (1-2)	0.675	0.632	0.94
			V (pile)	0.667	0.697	1.05
10	P-11802 2T 2V 4P	EXT	M+ (1-2)	0.522	0.545	1.04
			M- (pile)	0.553	0.568	1.03
			V (1-2)	0.623	0.632	1.01
			V (pile)	0.602	0.634	1.05
		INT	M+ (1-2)	0.485	0.529	1.09
			M- (pile)	0.504	0.559	1.11
			V (1-2)	0.647	0.632	0.98
			V (pile)	0.648	0.697	1.08
11	P-11802 2T 3V 5P	EXT	M+ (1-2)	0.606	0.649	1.07
			M- (pile)	0.651	0.677	1.04
			V (1-2)	0.736	0.759	1.03
			V (pile)	0.723	0.761	1.05
		INT	M+ (1-2)	0.529	0.624	1.18
			M- (pile)	0.558	0.665	1.19
			V (1-2)	0.737	0.759	1.03
			V (pile)	0.721	0.837	1.16
12	P-11802 2T 3V 8P	EXT	M+ (1-2)	0.374	0.406	1.09
			M- (pile)	0.402	0.423	1.05
			V (1-2)	0.488	0.474	0.97
			V (pile)	0.461	0.475	1.03

		INT	M+ (1-2)	0.346	0.390	1.13
			M- (pile)	0.364	0.416	1.14
			V (1-2)	0.445	0.474	1.06
			V (pile)	0.454	0.523	1.15
13	Next beam -3	EXT	M+ (1)	0.280	0.350	1.25
			M- (pile)	0.290	0.350	1.21
			M+ (2)	0.330	0.350	1.06
			V (1)	0.310	0.390	1.26
			V (pile)	0.310	0.420	1.35
			V (2)	0.320	0.390	1.22
		INT	M+ (1)	0.270	0.320	1.19
			M- (pile)	0.270	0.360	1.33
			M+ (2)	0.260	0.330	1.27
			V (1)	0.390	0.430	1.10
			V (pile)	0.380	0.460	1.21
			V (2)	0.380	0.430	1.13
14	Next beam -4	EXT	M+ (1-3)	0.380	0.430	1.13
			M- (pile)	0.400	0.430	1.08
			M+ (2)	0.390	0.430	1.10
			V (1)	0.440	0.470	1.07
			V (pile)	0.450	0.490	1.09
			V (2)	0.410	0.480	1.17
		INT	M+ (1-3)	0.350	0.410	1.17
			M- (pile)	0.370	0.430	1.16
			M+ (2)	0.350	0.420	1.20
			V (1)	0.420	0.520	1.24
			V (pile)	0.430	0.550	1.28
			V (2)	0.400	0.540	1.35

Tableau A3.3 - Résultats d'analyses ponts avec continuité dans les culées

Numéro d'analyse	Description	Position ou élément	Effort	Facteurs d'essieu		
				Grillage	Méthode simplifiée	MS / Grill.
15	Portée simple simplement supportée – Espacement inégal des poutres	EXT	M+	0.330	0.410	1.24
			V+	0.370	0.450	1.22
		INT	M+	0.33	0.400	1.21
			V+	0.46	0.500	1.09
16	Portée simple simplement supportée – Espacement égal des poutres	EXT	M+	0.370	0.410	1.11
			V+	0.430	0.450	1.05
		INT	M+	0.35	0.400	1.14
			V+	0.41	0.500	1.22
			V (M+)	0.783	0.915	1.17

Tableau A3.4 - Résultats des analyses des ponts avec poutres en acier avec béquilles

Numéro d'analyse	Description	Élément	Int/ext	Position	Facteurs d'essieu		
					Grillage	Méthode simplifiée	MS / Grill.
17	ICCA - 3T 3V 4P Béquilles 5 m	Béquilles	EXT	M	0.823	0.879	1.07
				V	0.873	0.879	1.01
				N	0.891	0.947	1.06
			INT	M	0.785	0.809	1.03
				V	0.833	0.809	0.97
				N	0.778	1.006	1.29
		Poutre	EXT	M+ (1-3)	0.832	0.868	1.04
				M- (pile)	0.845	0.879	1.04
				M+ (2)	0.844	0.875	1.04
				V (1-3)	0.855	0.947	1.11
				V (pile)	0.882	0.947	1.07
				V (2)	0.855	0.947	1.11
			INT	M+ (1-3)	0.673	0.778	1.16
				M- (pile)	0.675	0.809	1.20
				M+ (2)	0.680	0.798	1.17
				V (1-3)	0.771	0.947	1.23
				V (pile)	0.867	1.006	1.16
				V (2)	0.771	0.981	1.27
18	ICCA - 3T 3V 4P Béquilles 10 m	Béquilles	EXT	M	0.836	0.879	1.05
				V	0.873	0.879	1.01
				N	0.889	0.947	1.07
			INT	M	0.652	0.809	1.24
				V	0.681	0.809	1.19
				N	0.797	1.006	1.26
		Poutre	EXT	M+ (1-3)	0.830	0.868	1.04
				M- (pile)	0.847	0.879	1.04
				M+ (2)	0.841	0.875	1.04
				V (1-3)	0.874	0.947	1.08
				V (pile)	0.883	0.947	1.07
				V (2)	0.855	0.947	1.11
			INT	M+ (1-3)	0.671	0.778	1.16
				M- (pile)	0.677	0.809	1.20
				M+ (2)	0.677	0.798	1.18
				V (1-3)	0.884	0.947	1.07
				V (pile)	0.865	1.006	1.16
				V (2)	0.770	0.981	1.27