UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE D'ANALYSE SIMPLIFIÉE DU CODE CSA-S6 POUR LES PONTS DE TYPE DALLE SUR POUTRES

ALEXANDRE PHAN

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

GÉNIE CIVIL

DÉCEMBRE 2018

© Alexandre Phan, 2018.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE D'ANALYSE SIMPLIFIÉE DU CODE CSA-S6 POUR LES PONTS DE TYPE DALLE SUR POUTRES

Présenté par : PHAN Alexandre

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BOUAANANI Najib, Ph. D., président

M. MASSICOTTE Bruno, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. GOULET James, Ph. D., membre

DÉDICACE

À ma famille,

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, le professeur Bruno Massicotte, pour l'opportunité qu'il m'a donné en me confiant ce projet de recherche à la fois très intéressant et pertinent. Je le remercie également pour son encadrement de grande qualité, son support et son soutien financier dont j'ai eu la chance de bénéficier. Ses judicieux conseils, réflexions et suggestions ont permis de mener à bien ce projet tout en stimulant mon intérêt dans le domaine des structures de ponts. Pour toutes ces raisons, j'aimerais le remercier sincèrement.

J'aimerais également remercier sincèrement l'associé de recherche Fabien Lagier avec qui j'ai eu la chance de collaborer. Ses idées innovatrices, son éthique de travail, sa disponibilité ont grandement contribués à l'aboutissement du projet. Les nombreux échanges que nous avons eu la chance de partager ont également permis d'apporter des nouveautés au projet tout en enrichissant mon bagage de connaissances.

Merci à mes tous mes collègues de bureau qui ont rendu ce long parcours agréable. Merci également à tous les étudiants et les membres du GRS avec qui j'ai eu la chance d'échanger. Un merci plus particulier à Maxime Bolduc, Bertrand Tchatat, Claudia Velasco, Aristide Razavet, Tarik Fetchi Saichi et Marc-Olivier Prévost, pour leurs conseils, leur aide et leur bonne humeur. Un remerciement spécial à mon voisin de bureau Philippe Darveau avec qui j'ai partagé de bons moments et pour ses précieux conseils de vie.

J'aimerais également remercier pour leur soutien financier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le ministère des Transports du Québec (MTQ).

Finalement, j'aimerais remercier du fond du cœur ma famille sans laquelle je n'aurais pas été capable d'accomplir ce périple qu'est la maîtrise. Merci pour votre soutien inconditionnel et vos encouragements dans les moments plus difficiles. Une mention particulière pour mes parents et pour mes sœurs, Viviane et Andrée-Anne, qui ont toujours été présent pour moi tout au long du parcours pour me remonter le moral et pour m'encourager à me surpasser.

RÉSUMÉ

La méthode simplifiée d'analyse structurale des charges vives telle que présentée dans l'édition actuelle du Code canadien de calcul des ponts routiers CSA S6 comporte certaines lacunes par rapport à sa précision et à la justesse de certaines de ses hypothèses. Développée dans les années 1990, les résultats de l'analyse paramétrique qui a servi de base au développement de la méthode simplifiée s'est basée sur un échantillon d'environ 500 ponts de type dalle sur poutres simplement supportés. Par la suite, cette méthode a fait l'objet de plusieurs améliorations dans le temps notamment dans la refonte des équations dans l'édition CSA S6-14. Cependant, plusieurs éléments restent encore à valider et à améliorer avec les ressources et les outils maintenant disponibles. Face à cette problématique, ce mémoire présente une validation des équations et des hypothèses liées au calcul des facteurs de distribution de la charge vive pour les ponts de type dalle sur poutre selon le Code CSA S6-14.

Pour réaliser cette validation, une étude paramétrique a été menée sur des modèles de grillages. Les géométries de ponts couvrent des portées de 10 à 60 m, comportant une à quatre voies de différentes largeurs, supportées par trois à huit poutres en acier, en béton en I précontraint et en béton en T monolithique, ayant des porte-à-faux de différentes longueurs. De plus, l'étude a couvert des portées continues de deux à trois travées avec des longueurs débalancées. Au total, 866 ponts à portée simple, 2175 ponts à deux travées, et 2175 ponts à trois travées ont été modélisés pour cette étude paramétrique. La validation des résultats a porté à la fois sur l'état limite ultime (ÉLU) et sur l'état limite de fatigue (ÉLF) qui comportent chacun leurs spécificités. Dans le cadre de l'étude, les analyses ont été réalisées une utilisant des modèles de grillage car ce type d'analyse se prête bien aux études paramétriques relativement à la puissance de calcul requise et exige moins de post-traitement que les modèles par éléments finis de plaques ou d'éléments solides 3D. De plus, il a été montré que pour des ponts de types dalle sur poutres tel que dans le cas présent, les résultats obtenus par chacune de ces deux méthodes étaient équivalents. Cette étude a permis de relevé plusieurs lacunes de la méthode simplifiée actuelle. Particulièrement à l'ÉLF, les résultats montrent la méthode simplifiée manque de précision pour l'évaluation de certains types d'efforts tels que l'effort tranchant et le moment de flexion négatif. Pour certains cas, l'étude montre même que la méthode simplifiée n'est pas conservatrice telle qu'elle devrait l'être, particulièrement pour les ponts continus. Certaines modifications aux équations empiriques du Code ont donc été proposées afin de palier à ces lacunes.

ABSTRACT

The simplified live load analysis method as presented in the current edition of the CSA S6 Canadian Highway Bridge Design Code has certain shortcomings with respect to its accuracy and the validity of some of its assumptions. Developed in the 1990s, the results of the parametric study that served to build the simplified method were based on a sample of 500 simply supported slab-on-girder bridges. Subsequently, this method has been the subject of several improvements over time, notably in the revision of the equations in the CSA S6-14 edition. However, with the availability of more computational resources and tools. Several elements still need to be validated and improved. Faced with this problematic, this thesis presents a validation of the equations and assumptions related to the calculation of the distribution load factors for slab-on-beam bridges according to CSA Code S6-14.

To carry out this validation, a parametric study was conducted on grillage models. The bridge geometries cover spans from 10 to 60 m, with one to four lanes of different widths, supported by three to eight steel beams, prestressed I concrete beams or monolithic T concrete beams, with different cantilever lengths. In addition, the study also covered continuous spans of two to three spans with unbalanced lengths. A total of 866 single span bridges, 2175 double span bridges, and 2175 three span bridges were modelled for this parametric study. The validation of the results concerned both the ultimate limit state (ULS) and the fatigue limit state (FLS), each of which has its own specificities. In the study, the type of model chosen was grillage, because the grillage analysis requires less computing power and this method requires less post-processing than the finite element models with plates or 3D solid elements. In addition, it has been shown that for slab on girders bridge decks such as in the present study, the results obtained by each of these two methods were equivalent. This study identified several shortcomings in the current simplified method. Especially at the FLS, the results show the simplified method lacks precision for the evaluation of certain types of forces such as shear force and negative bending moment. For some cases, the study even shows that the simplified method is not conservative as it should be. Some modifications to the empirical equations of the Code have therefore been proposed to address these shortcomings.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XXI

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXIX

LISTE DES ANNEXES XXXI

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Contexte 1

1.2 Problématique 2

1.3 Objectifs et portée du travail 3

1.4 Méthodologie 3

1.5 Organisation du mémoire 4

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 6

2.1 Introduction 6

2.2 Revue des méthodes d'analyse des ponts 6

2.2.1 Généralités 6

2.2.2 Méthode de la poutre équivalente 8

2.2.3 Analogie du grillage 10

2.2.4 Méthode des éléments finis 14

2.3 Méthode simplifiée du Code CSA S6-14 16
2.3.1 Historique 16
2.3.2 Méthode de rigidité OHBDC 1983 17
2.3.3 Validation de la méthode de S6-06 18
2.3.4 Équations actuelles de la méthode simplifiée du Code CSA S6-14 19
2.3.5 Prise en considération des ponts continus dans la norme CSA S6-14 22
2.4 Méthode simplifiée du Code AASHTO 23
2.4.1 Prise en considération des ponts continus dans la norme AASHTO 25
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 27
3.1 Introduction 27
3.2 Revue de littérature 27
3.3 Choix de la méthode d'analyse 27
3.4 Modélisation 30
3.5 Maillage du modèle de grillage 31
3.6 Détermination des propriétés des ponts synthétiques 33
3.7 Démarche de l'étude paramétrique 41
3.7.1 Généralités 41
3.7.2 Ponts sélectionnés 42
3.8 Validation de la rigidité des modèles analysés 44
3.9 Application des charges vives 46
3.10 Programmation du logiciel de création et d'analyse des grillages 52
3.10.1 Approche choisie 52
3.10.2 Création des modèles de grillage 53
3.10.3 Paramètres d'analyse 55

3.10.4 Post-traitement des résultats 56

3.10.5 Validation de la méthode de grillage 56

CHAPITRE 4 ANALYSE DES PONTS À PORTÉE SIMPLE 58

4.1 Introduction 58

4.2 Étude paramétrique 58

4.2.1 Résumé des paramètres considérés 58

4.2.2 Traitement statistique des résultats 59

4.3 Moment fléchissant à l'ÉLU et ÉLS-1 60

4.3.1 Ensemble des résultats 60

4.3.2 Analyse de l'effet des paramètres géométriques 65

4.3.3 Analyse des valeurs maximales 72

4.4 Effort tranchant à l'ÉLU et ÉLS-1 74

4.4.1 Ensemble des résultats 74

4.4.2 Analyse des paramètres géométriques 80

4.4.3 Analyse des valeurs maximales 85

4.5 Moment fléchissant à l'ÉLF et l'ÉLS-2 87

4.5.1 Ensemble des résultats 87

4.5.2 Analyse des paramètres géométriques 92

4.5.3 Analyse des valeurs maximales 97

4.6 Effort tranchant à l'ÉLF et l'ÉLS-2 100

4.6.1 Ensemble des résultats 100

4.6.2 Analyse des paramètres géométriques 106

4.6.3 Analyse des valeurs maximales 111

CHAPITRE 5 ANALYSE DES PORTÉES CONTINUES 114

5.1 Introduction 114
5.2 Étude des ponts à deux travées 114
5.2.1 Résumé des paramètres considérés 114
5.2.2 Moment fléchissant à l'ÉLU et ÉLS-1 115
5.2.3 Effort tranchant à l'ÉLU et ÉLS-1 129
5.2.4 Moments fléchissant à l'ÉLF et l'ÉLS-2 141
5.2.5 Effort tranchant à l'ÉLF et l'ÉLS-2 151
5.3 Étude des ponts à 3 travées 160
5.3.1 Résumé des paramètres considérés 160
5.3.2 Moments fléchissants à l'ÉLU/ÉLS-1 161
5.3.3 Effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 170
5.3.4 Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 179
5.3.5 Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 189
CHAPITRE 6 AMÉLIORATIONS À LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE 197
6.1 Sommaire de la validation de la méthode simplifiée 197
6.2 Ponts à portée simple 198
6.2.1 Flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 198
6.2.2 Flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 203
6.2.3 Propositions d'amélioration pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 205
6.2.4 Propositions d'amélioration pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 209
6.3 Ponts continus 212
6.3.1 Effort tranchant 212
6.3.2 Statistiques globales des valeurs maximales 214
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 223

7.1 Sommaire 223

7.2 Recommandations 224

BIBLIOGRAPHIE 226

ANNEXES 230

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Propriétés des éléments du grillage des ponts de type dalle sur poutres (Tiré de CSA 2014)....13

Tableau 2-2 Portée équivalente selon le Code AASHTO (Tiré de AASHTO, 2017)....26

Tableau 3-1 Avantages et inconvénients de la méthode simplifiée du Code S6-14....28

Tableau 3-2 Avantages et inconvénients de la méthode du grillage....29

Tableau 3-3 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis....30

Tableau 3-4 Limites d'espacement des poutres....32

Tableau 3-5 : Contraintes associées aux types de pont (Tiré du Manuel de conception des structures du MTQ de 2009)....37

Tableau 3-6 Propriétés des éléments longitudinaux de dalle et de porte-à-faux....40

Tableau 3-7 Propriétés des éléments transversaux....41

Tableau 3-8 Paramètres des ponts synthétiques de l'analyse paramétrique....44

Tableau 3-9 Validation des rigidités flexionnelles obtenues par les équations....45

Tableau 3-10 Validation des rigidités torsionnelles obtenues par les équations....46

Tableau 3-11 : Localisation la plus fréquente du moment maximum positif (Tiré de Kwon 2011)....50

Tableau 3-12 : Comparaison des efforts entre la méthode du grillage et la méthode des éléments finis – Pont à poutres en acier – P80....57

Tableau 4-1 Résultats statistiques pour la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples....62

Tableau 4-2 Comparaison des statistiques pour la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Étude par nombre de voies – Portées simples....64

Tableau 4-3 Influence de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 1 voie....67

Tableau 4-4 Influence de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 2 voies et plus....67

Tableau 4-5 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques du moment à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 69

Tableau 4-6 Biais du moment pour la poutre extérieure à l'ÉLU/ÉLS-1 en fonction de la largeur du porte-à-faux – Portées simples 71

Tableau 4-7 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 73

Tableau 4-8 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Flexion – Portées simples 74

Tableau 4-9 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 76

Tableau 4-10 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 selon le nombre de voies – Portées simples 78

Tableau 4-11 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 1 voie 81

Tableau 4-12 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 2 voies et plus 82

Tableau 4-13 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 84

Tableau 4-14 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 86

Tableau 4-15 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception – Effort tranchant – Portée Simple 86

Tableau 4-16 Résultats statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples 89

Tableau 4-17 Comparaison des statistiques pour la flexion selon le nombre de voies – Portée simple – ÉLF/ÉLS-2 91

Tableau 4-18 Influence de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 1 voie 94

Tableau 4-19 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 2 voies et plus 94

Tableau 4-20 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples 96

Tableau 4-21 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples 98

Tableau 4-22 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2 – Flexion – Portées simples 99

Tableau 4-23 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples 102

Tableau 4-24 Comparaison des paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 selon le nombre de voies – Portées simples 105

Tableau 4-25 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 1 voie 107

Tableau 4-26 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 2 voies et plus 108

Tableau 4-27 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples 110

Tableau 4-28 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples 112

Tableau 4-29 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception – Effort tranchant – Portée Simple – ÉLF/ÉLS-2 112

Tableau 5-1 Résultats statistiques pour le moment positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 1 116

Tableau 5-2 Résultats statistiques pour le moment positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 2 118

Tableau 5-3 Résultats statistiques pour le moment négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées 119

Tableau 5-4 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 1 voie – Travée 1 123

Tableau 5-5 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 1 123

Tableau 5-6 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 1 voie – Travée 2 124

Tableau 5-7 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 2 124

Tableau 5-8 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue à 2 travées – 1 voie 126

Tableau 5-9 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue à 2 travées – 2 voies et plus 126

Tableau 5-10 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées 131

Tableau 5-11 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 selon le nombre de voies – Portées continues à 2 travées 134

Tableau 5-12 Influence de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – 1 voie 136

Tableau 5-13 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – 2 voies et plus 137

Tableau 5-14 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées 139

Tableau 5-15 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 141

Tableau 5-16 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 1 142

Tableau 5-17 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 2 144

Tableau 5-18 Résultats statistiques pour la flexion négative à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées 145

Tableau 5-19 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 1 voie – Travée 1 148

Tableau 5-20 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 1 148

Tableau 5-21 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues – 1 voie – Travée 2 149

Tableau 5-22 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues – 2 voies et plus – Travée 2 149

Tableau 5-23 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 1 voie 150

Tableau 5-24 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus 151

Tableau 5-25 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées 152

Tableau 5-26 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 selon le nombre de voies – Portées continues à 2 travées 155

Tableau 5-27 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée continue – 2 travées – 1 voie 157

Tableau 5-28 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée continue – 2 travées – 2 voies et plus 157

Tableau 5-29 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples 159

Tableau 5-30 Résultats statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 1 162

Tableau 5-31 Résultats statistiques pour le moment positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 2 163

Tableau 5-32 Résultats statistiques pour la flexion négative à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées 164

Tableau 5-33 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 1 167

Tableau 5-34 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 2 voies et plus – Travée 1 167

Tableau 5-35 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 2 168

Tableau 5-36 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 2 voies et plus – Travée 2 168

Tableau 5-37 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le du moment fléchissant négatif – Portée continue – 1 voie – 3 travées 169

Tableau 5-38 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue – 2 voies et plus – 3 travées 170

Tableau 5-39 Influence du débalancement des travées pour le moment 172

Tableau 5-40 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées 172

Tableau 5-41 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 selon le nombre de voies – Portées continues à 3 travées 174

Tableau 5-42 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 1 voie 176

Tableau 5-43 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 2 voies et plus 177

Tableau 5-44 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales à l'effort tranchant l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 178

Tableau 5-45 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 1 180

Tableau 5-46 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 2 181

Tableau 5-47 Résultats statistiques pour le moment négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées 182

Tableau 5-48 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 1 185

Tableau 5-49 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le du moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – 2 voies et plus – Travée 1 185

Tableau 5-50 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 2 186

Tableau 5-51 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 2 186

Tableau 5-52 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue – 1 voie – 3 travées 187

Tableau 5-53 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue – 2 voies et plus – 3 travées 188

Tableau 5-54 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées 190

Tableau 5-55 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 selon le nombre de voies – Portées continues à 3 travées 192

Tableau 5-56 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 1 voie 194

Tableau 5-57 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 2 voies et plus 194

Tableau 5-58 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples 196

Tableau 6-1 Effet de l'introduction de γ_J sur les statistiques à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple 199

Tableau 6-2 Effets de l'introduction de γ_J sur les statistiques des valeurs maximales à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple 200

Tableau 6-3 Effets combinés de l'introduction de γ_J et γ_S sur les statistiques des valeurs maximales à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple 202

Tableau 6-4 Effets de l'introduction de γ_J sur les statistiques à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple 204

Tableau 6-5 Effets de l'introduction de γ_J sur les statistiques des valeurs maximales à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2- Portée simple 205

Tableau 6-6 Effets de la modification de γ_c sur les statistiques des valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 1 voie 207

Tableau 6-7 Effets de la modification de γ_c sur les statistiques des valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 2 voies et plus 208

Tableau 6-8 Effets des modifications à D_T sur les statistiques à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple 210

Tableau 6-9 Effets des modifications à D_T sur les paramètres statistiques à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple 211

Tableau 6-10 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 1 - Portée continue à deux travées 215

Tableau 6-11 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 2 - Portée continue à deux travées 216

Tableau 6-12 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion négative - Portée continue à deux travées 217

Tableau 6-13 Effet du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à deux travées.....218

Tableau 6-14 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 1 - Portée continue à trois travées 219

Tableau 6-15 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 2 - Portée continue à trois travées 220

Tableau 6-16 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion négative - Portée continue à trois travées 221

Tableau 6-17 Effet du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à trois travées 222

Tableau A-1 Comparaison des efforts entre la méthode du grillage et la méthode des éléments finis – Pont à poutres en acier – P80 231

Tableau A-2 Comparaison des efforts entre la méthode du grillage et la méthode des éléments finis – Pont à poutres en béton T – P85.....232

Tableau B-1 – Coefficients D_T , γ_c , γ_e et λ pour les ponts de type dalle sur poutres[1] 234

Tableau B-2 – Coefficient γ_c pour le moment dans les poutres intérieures des ponts de type dalle sur poutres à l'ÉLF 235

Tableau B-3 – Coefficient γ_c pour les poutres extérieures des ponts de type dalle sur poutres à l'ÉLU et l'ÉLS1 235

Tableau B-4 – Coefficient γ_c pour l'effort tranchant pour les poutres intérieures et extérieures des ponts de type dalle sur poutres 235

Tableau B-5 – Coefficient γ_e pour le moment pour les poutres extérieures des ponts de type dalle sur poutres à l'ÉLF – Voir Figure B.1 236

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Modèle de grillage pour un pont à deux voies (Tiré de Jaeger et Bakht 1982) 12

Figure 2.2 Calcul des portées équivalents pour un pont à travées multiples (Tiré du Code CSA S6-14).....22

Figure 2.3 Exemple de la méthode du bras de levier (Tiré de Théoret 2010).....24

Figure 2.4 Comparaison des méthodes d'analyse simplifiée (Tiré de TRB 2007) 25

Figure 3.1 Exemple de modèle de grillage utilisé – Pont avec 5 poutres 33

Figure 3.2 Variation de la rigidité flexionnelle longitudinale selon le type de tablier (Tiré de Massicotte, Conciatori et Théoret, 2012) 34

Figure 3.3 Variation de la rigidité torsionnelle longitudinale selon le type de tablier (Tiré de Massicotte, Conciatori et Théoret, 2012) 35

Figure 3.4 Propriétés des sections 38

Figure 3.5 Principe de la portée simple équivalente de la norme CSA-S6-14 pour les ponts à travées multiples (Tiré de CSA S6-14).....42

Figure 3.6 : Charge de camion CL-625 définie dans le Code S6-14 47

Figure 3.7 : Surcharge de voie définie dans le Code S6-14 48

Figure 3.8 Exemple de ligne d'influence transversale utilisée pour l'application des charges vives 48

Figure 3.9 Exemple de surface d'influence utilisée pour l'application des charges vive 49

Figure 3.10 Cas de chargements considérés pour un pont à 3 voies (Tiré de Massicotte, 2018) ..51

Figure 3.11 Processus de création et d'analyse des ponts 54

Figure 3.12 Processus de post-traitement des résultats 55

Figure 4.1 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU/ELS-1 – Portées simples – Ensemble des données.....61

Figure 4.2 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU/ÉLS-1 – Étude par nombre de voies – Portées simples 63

Figure 4.3 Influence de la portée pour le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – Ensemble des données 66

Figure 4.4 Influence de l'espacement des poutres pour le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée simple – Ensemble des données 68

Figure 4.5 Effet de la largeur du porte-à-faux pour les poutres extérieures des ponts avec poutres en acier à l'ÉLU/ÉLS-1 – Flexion – Portées simples 71

Figure 4.6 Comparaison des valeurs maximales du moment à l'ÉLU/ÉLS-1 – Ensemble des données – Portées simples 72

Figure 4.7 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Portées simples – Ensemble des données 75

Figure 4.8 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Étude par nombre de voies – Portées simples 77

Figure 4.9 Géométrie problématique pour le cisaillement de poutre extérieure 79

Figure 4.10 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portées simples – Ensemble des données 80

Figure 4.11 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée simple – Ensemble des données 83

Figure 4.12 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Ensemble des données – Portées simples 85

Figure 4.13 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données 88

Figure 4.14 Comparaison des valeurs pour le moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Étude par nombre de voies – Portée simple 90

Figure 4.15 Influence de la portée pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Ensemble des données 93

Figure 4.16 Influence de l'espacement des poutres pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Ensemble des données 95

Figure 4.17 Comparaison des valeurs maximales du moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Ensemble des données – Portées simples 98

Figure 4.18 Influence de l'espacement des poutres pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Valeurs maximales 99

Figure 4.19 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données 100

Figure 4.20 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données – Poutres intérieures 101

Figure 4.21 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données – Poutres extérieures 102

Figure 4.22 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Étude par nombre de voies – Portées simples 104

Figure 4.23 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données 106

Figure 4.24 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Ensemble des données 109

Figure 4.25 Comparaison des valeurs maximales pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Ensemble des données – Portées simples 111

Figure 4.26 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Valeurs maximales 113

Figure 5.1 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 1 – Ensemble des données 115

Figure 5.2 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 2 – Ensemble des données 117

Figure 5.3 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 119

Figure 5.4 Valeur du paramètre L_e pour les portées continues (Tiré de CSA S6-14) 120

Figure 5.5 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 1 121

Figure 5.6 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 2 122

Figure 5.7 Influence de la portée sur le moment fléchissant négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 125

Figure 5.8 Influence de l'espacement des poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données – Travée 1 – positif 127

Figure 5.9 Influence de l'espacement des poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS 1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données – Travée 2 – positif 128

Figure 5.10 Influence de l'espacement des poutres sur le moment fléchissant négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données – Moment négatif 128

Figure 5.11 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 130

Figure 5.12 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 2 travées 132

Figure 5.13 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 136

Figure 5.14 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données 138

Figure 5.15 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Ensemble des données – Portées continues à deux travées 140

Figure 5.16 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 1 – Ensemble des données 142

Figure 5.17 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 2 – Ensemble des données 143

Figure 5.18 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 144

Figure 5.19 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 1 146

Figure 5.20 Influence de la portée pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 2 147

Figure 5.21 Influence de la portée pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 150

Figure 5.22 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 152

Figure 5.23 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Poutres intérieures 153

Figure 5.24 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ELS-2 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 2 travées 154

Figure 5.25 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données 156

Figure 5.26 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Ensemble des données – Portées continues à deux travées 158

Figure 5.27 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 1 – Ensemble des données 161

Figure 5.28 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 2 – Ensemble des données 163

Figure 5.29 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données 164

Figure 5.30 Influence de la portée pour le du moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 1 166

Figure 5.31 Influence de la portée pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 2 166

Figure 5.32 Influence de la portée pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données 169

Figure 5.33 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données 171

Figure 5.34 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 3 travées 173

Figure 5.35 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données 176

Figure 5.36 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Ensemble des données – Portées continues à trois travées 178

Figure 5.37 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 1 – Ensemble des données 179

Figure 5.38 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 2 – Ensemble des données 181

Figure 5.39 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données 182

Figure 5.40 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 1 184

Figure 5.41 Influence de la portée pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 2 184

Figure 5.42 Influence de la portée pour le moment de flexion négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données 187

Figure 5.43 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données 189

Figure 5.44 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ELS-2 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 3 travées 191

Figure 5.45 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portées continues à 3 travées - Ensemble des données 193

Figure 5.46 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Ensemble des données – Portées continues à trois travées 195

Figure 6.1 Effet de l'introduction de γ_J à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple 199

Figure 6.2 Effet de l'introduction de γ_J à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – Valeurs maximales 200

Figure 6.3 Effet de l'introduction de γ_S pour la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple 202

Figure 6.4 Effet de l'introduction de γ_J à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple 203

Figure 6.5 Effet de l'introduction de γ_J sur les valeurs maximales à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple 204

Figure 6.6 Effet de la modification de γ_c sur les valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 1 voie 206

Figure 6.7 Effet de la modification de γ_c sur les valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 2 voies et plus 207

Figure 6.8 Effet des modifications à D_T à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple 210

Figure 6.9 Effet des modifications à D_T sur les valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple 211

Figure 6.10 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à deux travées 212

Figure 6.11 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à trois travées 213

Figure 6.12 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à deux travées – Répartition du biais par rapport à l'espacement des poutres 213

Figure 6.13 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à trois travées – Répartition du biais par rapport à l'espacement des poutres 214

Figure A.1 Modèle éléments finis CSIBridge – Ponts à poutres en acier – P80.....231

Figure A.2 Modèle éléments finis CSIBridge – Ponts à poutres en béton T – P85 232

Figure B.1 – Position du camion pour le calcul de la fatigue pour la poutre de rive 236

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire de la section transversale
As	Aire en cisaillement
B	Largeur totale d'un pont
CSA	Association canadienne de normalisation
E	Module d'élasticité
ÉLU	État limite ultime
ÉLS	État limite de service
ÉLF	État limite de fatigue
G	Module de cisaillement
h_p	Hauteur des poutres d'un pont
h_s	Hauteur de la dalle d'un pont
I_L	Inertie flexionnelle des éléments longitudinaux d'un modèle de grillage
I_T	Inertie flexionnelle des éléments transversaux d'un modèle de grillage
J_L	Inertie torsionnelle des éléments longitudinaux d'un modèle de grillage
J_T	Inertie torsionnelle des éléments transversaux d'un modèle de grillage
L	Portée d'un pont
M	Effort de moment fléchissant
N	Nombre de poutres d'un pont
n	Nombre de voies d'un pont
R_L	Facteur de simultanéité des voies charges
S	Espacement des poutres d'un pont
S_c	Longueur du porte-à-faux d'un pont
S6-14	Code canadien sur le calcul des ponts routiers

V	Effort tranchant
W_c	Largeur carrossable d'un pont
W_e	Largeur d'une voie de calcul
μ	Facteur de modification pour la largeur des voies selon le Code S6-14
δ	Statistique du biais
σ	Statistique de l'écart-type
V	Statistique du coefficient de variation
$\boldsymbol{k_A}$	Statistique déterminant la sécurité de la méthode simplifiée

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Validation des modèles de grillage 230

Annexe B – Présentation de la méthode simplifiée.....233

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

L’évolution rapide dans le domaine de l’informatique a un impact important sur celui de l’analyse des structures. En effet, avec la croissance de la puissance de calcul des outils informatiques, il est désormais possible de réaliser des modèles d’éléments finis de plus en plus complexes pour l’analyse des ponts. Cependant, plus les modèles sont complexes, plus ils sont susceptibles aux erreurs, tant pour la création des modèles que lors de leur utilisation. Les conditions d'appuis, l'influence des éléments secondaires (contreventements, etc.), la considération adéquate de la fissuration de la dalle s'ajoutent dans le cas des ponts à la complexité de considérer correctement les conditions de charges mobiles multiples comportant de nombreuses combinaisons. Il est reconnu que pour le même pont, les résultats peuvent varier grandement d'un ingénieur à l'autre lorsque des modèles raffinés sont utilisées (Massicotte et al. 2016). De plus toute analyse raffinée doit être vérifiée avec une solution simple et l'analyse d'ouvrages complexes doit procéder avec une augmentation croissante de la complexité des modèles (Massicotte, 2018). Tel qu'indiqué dans le Commentaire du Code CSA-S6 (CSA, 2019), l'utilisation de méthodes d'analyse raffinées augmente la responsabilité de l'ingénieur. Une méthode simplifiée s’avère donc nécessaire pour valider les modèles complexes. De plus, une méthode simplifiée est également fort utile à l’étape de prédimensionnement qui précède l’élaboration de modèles raffinés afin d’estimer aisément les efforts dans les éléments structuraux. En effet, comme les ponts sont des ouvrages exposés à des conditions climatiques rigoureuses, soumis à des conditions de chargements croissantes et qui seront inévitablement sujettes à une dégradation, il est reconnu qu'adopter des hypothèses conservatrices à l'étape de conception s'avère une pratique recommandable. Enfin, les méthodes simplifiées s'avèrent une approche utile pour l'évaluation rapide des ponts ou pour l'émission des permis spéciaux des véhicules hors normes.

Dans cette optique, l’idéalisation de ponts par la méthode de la poutre équivalente est préconisée dans les codes des ponts et a été utilisée dans l’élaboration de la méthode simplifiée du Code canadien de calcul des ponts routiers, la norme CSA S6-14. Cette méthode utilise des équations simples qui permettent de déterminer la répartition des charges routières entre les éléments porteurs

des ponts. Le dimensionnement ou l'évaluation de pont se fait ensuite avec ces charges. Cette méthode se base essentiellement sur des facteurs de distribution empiriques.

1.2 Problématique

La méthode simplifiée proposée dans la norme CSA S6-14 a été introduite pour l'édition 2000 de cette norme. Elle a été inspirée en partie de la norme de l'Ontario (OHBDC, 1991) et principalement développée à partir des résultats d'une seule étude (Smith, 1998) sur la base d'un nombre limité de ponts analysés. Théoret (Massicotte et al. 2012) qui a porté sur plus de 3000 ponts de type dalle sur poutres multiples (3 et plus) a démontré que la méthode était conservatrice en flexion, particulièrement à la fatigue, mais non sécuritaire dans certaines conditions à l'effort tranchant. Lors du développement de l'édition 2014 de la norme, il a été convenu qu'il était prématuré de modifier la méthode simplifiée mais de poursuivre l'étude pour inclure un plus grand spectre de géométries (Massicotte et al. 2016). En effet, aucune de ces études qui ont conduit à la méthode simplifiée de la norme n'a portée sur les ponts continus. Or, comme il sera vu plus loin, la méthode simplifiée utilise principalement deux paramètres géométriques pour établir la portion de la charge dans une poutre : l'espacement transversal des poutres et la portée des poutres. Pour les ponts continus, la position approximative des points d'inflexion est utilisée pour définir une portée simple équivalente, en moments positif et négatif. Aucune étude exhaustive n'a spécifiquement été réalisée pour valider ces hypothèses de la méthode simplifiée pour les ponts continus alors qu'il a été soulevé par Théoret que la méthode ne présentait pas le niveau de précision attendu pour les portées simples. De plus, il importe de s'assurer que la méthode simplifiée soit généralement conservatrice sans pour autant s'éloigner de la réalité ce qui aurait pour conséquence de lui enlever de sa pertinence.

Ainsi, pour toutes ces raisons, la méthode simplifiée doit être réévaluée, tant pour les portées simples que pour les travées continues. Selon les résultats obtenus, la méthode devra être améliorée.

1.3 Objectifs et portée du travail

L'objectif général du projet de recherche vise à vérifier la validité de la méthode simplifiée du code CSA-S6-14 pour les ponts de type dalle sur poutres et, au besoin, de proposer des améliorations afin de s'assurer que la méthode présente le niveau de précision et de sécurité attendu. Plus spécifiquement, le projet vise à :

- clarifier l'utilisation de la méthode du grillage pour l'analyse des ponts mixtes de type dalle sur poutres multiples;
- déterminer les propriétés des ponts types;
- développer un logiciel permettant de réaliser une étude paramétrique exhaustive sur un grand nombre de ponts;
- réaliser l'analyse de ponts types de portée simples et continus.

La portée du présent projet se limite aux ponts de type dalle en béton mixte sur poutres multiples. Trois types de poutres sont considérés : en I en acier, en béton précontraint en I et monolithiques en T en béton. Les géométries de ponts étudiés sont des ponts d'une à trois travées, de 3 à 60 mètres de portée, comportant d'une à quatre voies de circulation, avec un nombre de poutres variant de 3 à 8 et avec un porte-à-faux d'une largeur qui correspond à 0.3, 0.5 ou 0.6 fois l'espacement des poutres. Les largeurs des ponts étudiés dépendent des limites de largeurs carrossables spécifiées au tableau 3.5 du Code canadien de calcul des ponts routiers (CSA, 2014). Les tabliers sont sans trottoir, avec des chasse-roues de 0.45 m pour lesquels la largeur complète de la voir carrossable disponible est utilisée. Les ponts sont droits, sans biais et symétriques, avec des poutres également espacées, limites prescrites pour l'utilisation de la méthode simplifiée du code.

1.4 Méthodologie

Outre la revue de littérature, les étapes suivantes ont été suivies pour réaliser le présent projet de recherche :

1. détermination d'un échantillon de ponts représentatifs de la population de ponts du réseau routier du Québec pour les ponts de type dalle sur poutres;
2. création de ponts synthétiques et validation de la justesse et le réalisme de l'échantillon de ponts choisi;
3. élaboration d'une méthodologie de modélisation par grillage pour les ponts de type dalle sur poutres;
4. élaboration d'un logiciel permettant la génération de modèles de ponts synthétiques, l'analyse des modèles générés dans un logiciel d'analyse de structures ainsi que le post-traitement des résultats issus des analyses pour l'échantillon de ponts;
5. réalisation d'une analyse paramétrique des différentes configurations de ponts identifiées afin d'obtenir les moments fléchissants et les efforts tranchants aux états limites ultimes, de service et de fatigue (ÉLU, ÉLS et ÉLF) requis pour la comparaison avec les efforts correspondants déterminés selon la méthode simplifiée de la norme CSA S6-14;
6. étude de l'effet des différents paramètres géométriques des ponts influençant la distribution des efforts;
7. étudier de l'effet des travées continues et de la variation des portées respectives sur la distribution des efforts sur les ponts de type dalle sur poutres;
8. proposition d'améliorations à la méthode simplifiée du code CSA-S6 pour l'édition 2019 et identification de pistes pour l'amélioration des éditions futures.

1.5 Organisation du mémoire

Le mémoire compte sept chapitres et trois annexes. À la suite de ce chapitre d'introduction, le chapitre 2 présente une revue de littérature sur les méthodes d'analyse raffinées et simplifiées des ponts pour les charges routières. Le chapitre 3 établit les règles qui ont permis de générer des ponts synthétiques ainsi que les limites géométriques adoptées. Les chapitres 4 et 5 présentent respectivement les résultats des analyses paramétriques pour les ponts de portée simple et les ponts de deux et trois portées continues. Vue l'inexactitude relevée pour la méthode simplifiée, dans certains cas largement du côté non sécuritaire, des correctifs sont proposés au chapitre 6 afin de

permettre au CSA d'apporter des correctifs pour l'édition 2019 du code. Le dernier chapitre présente les conclusions et recommandations issues de ce travail de recherche.

L'annexe A présente une validation de la précision et de la validité de la méthode de grillage en comparant les efforts obtenus entre cette méthode et celle plus raffinée des éléments finis.

L’annexe B présente les principales équations de la méthode simplifiée du Code Canadien de calcul des ponts routiers pour l’analyse des ponts de type de dalle sur poutre.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Tel que présenté au Chapitre 1, l'objectif du présent mémoire est de déterminer les effets des charges sur les tabliers de ponts de type dalle sur poutres pour des travées simples et des travées continues. Ainsi, il sera possible d'évaluer la justesse de la méthode simplifiée présentée dans le Code canadien des ponts et, au besoin, de proposer des modifications visant à en améliorer la précision. Ce chapitre a pour but de présenter les éléments de la littérature qui ont permis de réaliser les travaux.

Premièrement, un recensement des différentes méthodes d'analyse de charges pour les tabliers de ponts utilisées sera présenté. Dans cette section, diverses méthodes d'analyse simplifiées telles que celles présentes dans le Code Canadien des ponts seront traitées en détail. La méthode du grillage sera également abordée en profondeur car elle sera l'approche privilégiée pour réaliser les analyses de tabliers de ponts. Finalement, la méthode des éléments finis sera également survolée.

Deuxièmement, une section de ce chapitre sera consacrée à une revue plus exhaustive de la méthode simplifiée d'analyse des charges routières selon le Code des ponts canadien. D'abord, un bref historique de la méthode sera présenté. Cela inclut le développement des équations et l'évolution de la méthode de calcul. Ensuite, la méthode simplifiée actuelle de la norme S6-14 sera détaillée.

Troisièmement, une section sera dédiée aux définitions des charges de calcul pour les ponts routiers. La charge routière utilisée au Canada sera présentée ainsi que les combinaisons de charges applicables pour l'analyse des ponts routiers.

2.2 Revue des méthodes d'analyse des ponts

2.2.1 Généralités

Il existe de nombreuses méthodes d'analyse des tabliers de ponts routiers. Les méthodes varient par leur niveau de complexité, de précision et de fiabilité. La précision d'une méthode d'analyse est souvent corrélée à son niveau de complexité. Pour cette raison, il est difficile de déterminer le

modèle idéal. Dans cette perspective, les différentes méthodes d'analyse des charges routières seront présentées dans cette section à travers leurs forces et leurs faiblesses.

D'abord, les méthodes simples permettent d'effectuer la répartition des efforts dans les éléments porteurs sans avoir à procéder à une analyse de la distribution transversale. La méthode de la poutre équivalente utilisée dans la méthode simplifiée du Code canadien des ponts (CSA S6-14) ainsi que dans le Code américain des ponts (AASHTO 2012) s'inscrit dans ces méthodes simples. Ces méthodes sont très populaires en raison de leur simplicité et du fait qu'elles sont conservatrices. Elles sont dites empiriques vu qu'elles font appel à des équations calibrées suite à des analyses paramétriques. Puisque la nature de ces équations est empirique, celles-ci sont également basées sur des hypothèses contraignantes. Leur domaine d'application est donc restreint.

Ensuite, bien que les méthodes raffinées reflètent mieux les caractéristiques structurales des ponts analysés, celles-ci sont également plus complexes. La répartition transversale des efforts est plus précise et réaliste que celle issue des méthodes simplifiées. De plus, vu que ces méthodes font intervenir plusieurs caractéristiques des ponts, les hypothèses qui y sont associées sont moins restrictives. Elles sont donc applicables à plus de cas et leur degré de précision est meilleur. Cependant, elles sont plus complexes à appliquer et requièrent plus de validation. Les méthodes raffinées les plus utilisées sont la méthode de l'analogie du grillage et la méthode des éléments finis. Les méthodes des bandes finies, des plaques orthotropes et du milieu semi-continu ont été utilisées jusque dans les années 1990, notamment pour réaliser les études paramétriques ayant servi au développement des méthodes simplifiées, mais leur utilisation est aujourd'hui plus limitée dû à la puissance des logiciels modernes commerciaux d'analyses des structures. Certaines de ces méthodes seront approfondies dans les sections suivantes. L'étude comparative des différentes méthodes d'analyse des ponts (Massicotte, 2018) dresse une revue exhaustive des méthodes de grillage et des méthodes d'éléments finis.

Pour l'analyse des ponts courants selon le Code des ponts S6-14, les approches préconisées sont la méthode simplifiée de la poutre équivalente ainsi que la méthode du grillage. Des directives sont disponibles pour ces deux méthodes dans le Code. La méthode des éléments finis peut également être utilisée, mais celle-ci est moins balisée dans la norme actuelle.

2.2.2 Méthode de la poutre équivalente

La méthode simplifiée de la poutre équivalente est utilisée depuis longtemps pour analyser l'effet des charges vives sur les tabliers de ponts. Dans les codes actuels en vigueur au Canada (CSA S6-14) et aux États-Unis (AASHTO 8e édition), cette méthode permet d'analyser plusieurs types de ponts dont entre autres les ponts de type dalle sur poutres, les ponts de type dalle épaisse ainsi que les ponts caissons. Cette méthode a d'abord été développée dans la norme Standard Specifications for Highway Bridges de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en 1931 (Zokaie, Imbsen et Osterkamp 1991). Bien que son format ait évolué au cours des ans, cette méthode est toujours présente dans la norme AASHTO. La méthode simplifiée de l'AASHTO 1931 a servi de modèle pour le développement de la norme canadienne CSA S6.

Cette méthode simplifiée consiste à déterminer les efforts critiques dans les éléments porteurs à travers une distribution transversale des charges de roue à l'aide de facteurs empiriques. Les efforts maximaux longitudinaux pour une voie de circulation sont d'abord déterminés en idéalisant le pont comme une poutre. La distribution transversale de ces efforts longitudinaux est ensuite déterminée selon des facteurs de répartition qui considèrent le nombre de voies réel du pont et les positions critiques des véhicules dans ces voies. Les facteurs de répartition diffèrent d'une norme à l'autre. En effet, les normes ont chacune leurs propres paramètres de calibration issus de leurs propres hypothèses. Les principales différences seront détaillées aux sections 2.3 et 2.4. Les facteurs de répartition restent simples à calculer peu importe la norme, ce qui constitue un des avantages importants de cette méthode, et le niveau de précision de cette méthode est généralement adéquat pour la majorité des configurations courantes de pont. De plus, la philosophie retenue est que la méthode conduise à des résultats conservateurs, ce qui rend la méthode sécuritaire et bien adaptée à la conception préliminaire.

Une des hypothèses importantes de la méthode de la poutre équivalente est le fait que le pont se comporte comme une série de poutres parallèles sous les charges. Pour l'analyse des charges vives, il est donc possible de considérer le pont comme une seule poutre et ensuite redistribuer les charges entre les poutres. Pour déterminer les efforts critiques de moments fléchissants et d'efforts tranchants d'une voie, ceux-ci sont obtenus en appliquant la charge routière d'une voie sur une poutre. Ensuite, puisque la répartition transversale dépend de la rigidité relative entre les poutres,

les codes CSA et AASHTO proposent des facteurs empiriques pour simplifier cette étape. Ce paramètre nommé facteur d'essieu F_E se définit comme suit pour les moments de flexion :

$$F_{EM} = \frac{M_{poutre}}{M_{voie}} \tag{2.1}$$

où,

M_{poutre} Moment fléchissant sur la poutre réelle étudiée

M_{total} Moment fléchissant pour une voie pour la poutre équivalente

De même pour l'effort tranchant :

$$F_{EV} = \frac{V_{poutre}}{V_{voie}} \tag{2.2}$$

où,

V_{poutre} Effort tranchant sur la poutre réelle étudiée

V_{total} Effort tranchant pour une voie pour la poutre équivalente

Le concept de fraction de roue F_r a été utilisé dans les éditions du Code S6 antérieures à l'édition 2000. Ce paramètre représente la fraction des efforts produits par une ligne de roues longitudinale consistant en un demi-camion. Pour considérer les différentes configurations des ponts, le paramètre F_r est corrélé à l'espacement transversal S des éléments porteurs. La valeur de F_r est donc définie comme suit :

$$F_r = \frac{S}{D} \tag{2.3}$$

Dans l'équation, le paramètre D représente un facteur de distribution transversal empirique. Son sens physique est cette dimension correspond à la largeur du tablier qui est sollicité par l'application d'une ligne de roues. La valeur du paramètre D est fonction du type de tablier, du nombre de voies chargées et de la largeur de voie carrossable. De plus, la valeur de D inclut également la probabilité de simultanéité des voies à travers le paramètre R_L qui réduit les efforts dépendamment de la probabilité du cas de chargement. Historiquement, une seule valeur de D était

utilisée pour plusieurs types de configurations. Cependant, vu que la largeur de répartition exprimée par le facteur *D* dépend de plusieurs paramètres, utiliser une valeur unique mène à des répartitions d'efforts dont la justesse n'est pas assurée puisque les différentes caractéristiques ne peuvent être précisément prises en compte. Des changements importants ont été apportés au calcul de ce facteur au cours des ans, la principale modification ayant eu lieu pour l'édition S6-00 de la norme. Les coefficients déterminés à l'époque ont été obtenus à partir d'analyses paramétriques réalisées avec un nombre restreint de ponts de portée simple uniquement. La formulation des équations de la méthode simplifiée de la norme S6-00 a été complètement revue pour l'édition 2014 afin d'en faciliter l'utilisation avec toutefois l'objectif de conduire aux mêmes résultats.

2.2.3 Analogie du grillage

Comme la méthode simplifiée de la norme S6 se base sur des paramètres empiriques, son application comporte des limitations. Lorsque celle-ci n'est pas applicable, ou encore lorsque de résultats plus précis sont requis, la norme propose entre autres l'utilisation des méthodes du grillage et des éléments finis pour l'analyse des charges vives. La méthode du grillage comporte plusieurs avantages dont les principaux ont été relevés par Jaeger et Bakht (1982) :

- le grillage peut être utilisé pour des ponts ayant des géométries ou des caractéristiques complexes tels que des grands biais, des diaphragmes rigides ou des grands porte-à-faux;
- les calculs associés à cette méthode sont adaptés pour l'automatisation sur ordinateur;
- la représentation de la structure en grillage permet à l'ingénieur d'avoir une idée du comportement de la structure sous les charges ainsi que de la répartition des charges entre les éléments porteurs.

Cependant, cette méthode requiert du concepteur une bonne compréhension du comportement du pont. En effet, l'idéalisation d'un pont par le grillage est une étape qui peut comporter des difficultés et qui amène des choix d'hypothèses qui ont un impact important sur la répartition des efforts.

Selon Hambly (1991), un modèle de grillage consiste à modéliser le tablier du pont comme un ensemble de poutres connectées aux nœuds. Chacune des poutres représente une portion de la section du tablier, c'est-à-dire une section de dalle ou de poutres. Les rigidités flexionnelles et torsionnelles longitudinales du pont sont donc concentrées dans les éléments longitudinaux. Les

rigidités transversales sont quant à elles concentrées dans les éléments transversaux. Pour assurer la validité des rigidités définies dans chacun des éléments dans un modèle de grillage, Hambly propose que si les éléments sont soumis à un chargement, ils doivent présenter les mêmes efforts de flexion et de torsion ainsi que les mêmes flèches que la section qu'ils représentent. De cette façon, il y a une compatibilité entre la réalité et l'idéalisation du tablier par l'analogie du grillage. Cette étape de validation est d'autant plus importante que des logiciels commerciaux tels que CSIBridge (CSI, 2018) permettent de construire des modèles de grillages de façon automatisée. Cependant, la définition des propriétés de section des poutres reste une tâche qui revient au concepteur.

Théoriquement, 6 propriétés d'un élément de poutre sont requises pour les grillages. Toutefois, comme son nom l'indique, l'analogie du grillage consiste à modéliser les propriétés d'un tablier dans un maillage bidimensionnel horizontal. Typiquement seuls trois degrés de libertés sont requis : la flèche verticale, perpendiculaire au plan du grillage, et les rotations autour des axes définissant le plan du grillage. Ainsi les trois propriétés de sections requises pour les poutres dans le modèle sont les suivantes :

- aire en cisaillement associé au déplacement vertical du tablier (A_s);
- moment d'inertie associé à la flexion autour d'un axe situé dans le plan du grillage (I);
- inertie torsionnelle (J).

Des relations géométriques sont proposées par Jaeger et Bakht (1982) afin de déterminer ces propriétés pour différents types de ponts dont les ponts à dalle épaisse, les ponts de type dalle sur poutres et les ponts de type dalle sur poutres caissons. Pour les ponts de type dalle sur poutres, ils proposent de positionner les éléments longitudinaux de façon à ce que ceux-ci coïncident avec les lignes de rigidité du pont, c'est-à-dire avec les éléments porteurs que sont les poutres. Les propriétés des éléments longitudinaux sont donc celles des poutres et de la portion de dalle associée. Pour les éléments transversaux, ceux-ci auront comme propriétés ceux de la portion de dalle qu'ils représentent. Dans le même article, ils proposent également de négliger l'effet du décalage en cisaillement dans la dalle. En effet, suite à une étude paramétrique par la méthode des bandes finies (Cheung & Chan, 1979), ils ont pu démontrer que pour des dimensions de poutres réalistes, l'effet du décalage en cisaillement dans le plan est négligeable. En ce qui a trait à l'effet du coefficient de Poisson, il peut également être négligé, car il agit seulement sur la dalle et produit

un effet négligeable sur la réponse du pont. Une recommandation est également émise pour ajouter un nœud entre chacune des membrures longitudinales représentant les poutres afin de pouvoir mieux représenter l'application des charges vives. En effet, la répartition transversale des charges de camion est plus juste et précise avec cette modification puisqu'il y a plus de points où il est possible d'y assigner des fractions de charge. Les charges sont donc moins concentrées seulement sur les éléments de poutres et se divisent mieux sur le modèle. Dans leur étude paramétrique, il a été trouvé qu'il est possible d'améliorer les résultats de jusqu'à 9% (Jaeger et Bakht, 1982). L'exemple montré sur la Figure 2.1 est un modèle minimaliste d'un grillage pour un pont à deux voies dont le raffinement était limité par les capacités informatiques de l'époque. Tel qu'indiqué plus loin dans ce document, des grillages plus raffinés sont recommandés, notamment pour l'espacement des membrures transversales. Tel que recommandé par O'Brien (2014) et Massicotte (2018), un élément longitudinal est placé entre les axes des poutres principales afin justement de permettre une meilleure application des charges vives sur le tablier.

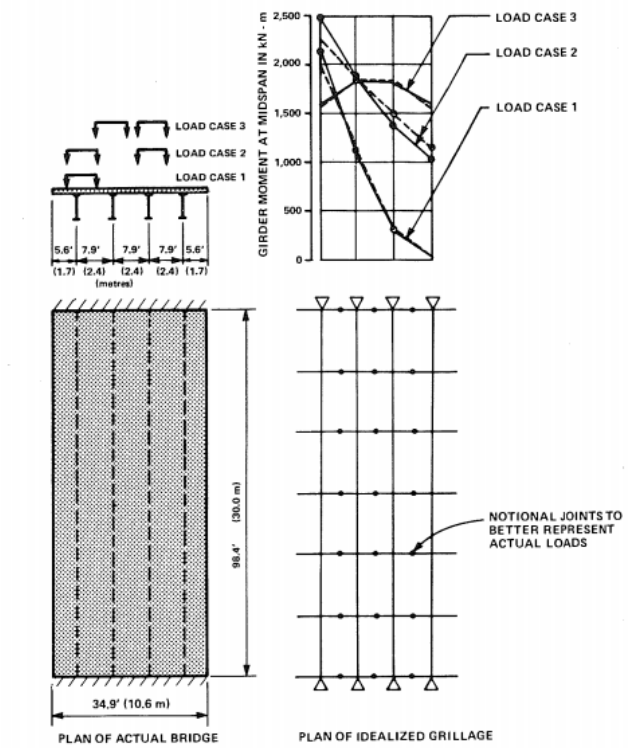
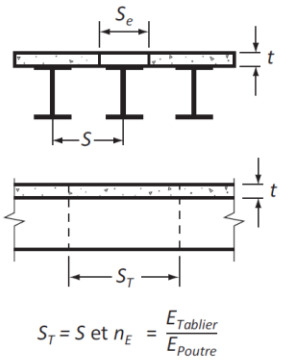


Figure 2.1 Modèle de grillage pour un pont à deux voies (Tiré de Jaeger et Bakht 1982)

L'Annexe A5.1 de la norme canadienne des ponts (CSA S6-14) portant sur l'analyse bidimensionnelle selon la méthode de l'analogie du grillage propose des équations basées sur ces lignes directrices afin de déterminer les propriétés de section des membrures longitudinales et transversales pour différents types de tabliers. Les équations pour les ponts de type dalle sur poutres sont présentées au Tableau 2-1.

Tableau 2-1 Propriétés des éléments du grillage des ponts de type dalle sur poutres (Tiré de CSA 2014)

Tableau A5.1.4
Expressions des propriétés des membrures des grillages pour les ponts à dalle sur poutres non mixtes
(voir l'article A5.1.2.5)

$I_L = n_E I_G + \frac{S_e t^3}{12}$	
$I_T = \frac{S_T t^3}{12\left(1-\upsilon^2\right)}$	
$J_L = \frac{S_e t^3}{6}$	
$J_T = \frac{S_T t^3}{6}$	
$A_L = A_w$	
$A_T = \frac{5}{6} S_T t$	

Dans les équations du Code, les propriétés des éléments de grillage sont exprimées en fonction de l'espacement des poutres pour les propriétés longitudinales. Dans la même optique, les propriétés transversales sont présentées en fonction de l'espacement des éléments longitudinaux. Cela permet de généraliser ces équations pour tout pont de type de dalle sur poutre.

La modélisation par grillage comporte plusieurs avantages. Ainsi, tel que soulevé par Jaeger et Bakht (1982), l'un des grands bénéfices est que cette méthode est automatisable sur ordinateur. En effet, avec les équations générales du Code Canadien, il est possible de déterminer et d'assigner les propriétés pour chacune des membrures de façon automatisée. De plus, le grillage est une méthode qui s'appuie sur l'utilisation des éléments de type poutre. Ce type d'éléments comporte des avantages par rapport aux éléments finis, car il nécessite moins de post-traitement que des

éléments finis de type coque ou 3-D solide. D'une part, les résultats obtenus des analyses sont exprimés directement en efforts globaux pour les membrures, c'est-à-dire en forces axiales, en effort tranchant, en moment flexion et en moment de torsion. De plus, ces forces peuvent être exprimées selon le système local de l'élément ou selon le système global de l'ouvrage. D'autre part, les résultats issus des éléments finis sont en contraintes. Il faut donc post-traiter ces résultats pour les ramener en efforts globaux ce qui constitue une étape supplémentaire, généralement disponible directement dans les logiciels. Un autre avantage de l'utilisation des éléments poutres par rapport aux éléments finis est au niveau de la lourdeur des calculs. En effet, les éléments finis nécessitent une plus grande quantité de calcul que les éléments poutres et donc plus de puissance informatique et de temps de calcul. Ceci est dû à la fois au grand nombre de degrés de liberté et à la formulation plus complexe pour les éléments finis. Les éléments finis donnent généralement des résultats plus précis que le grillage, mais lorsque le modèle de grillage est adéquat, les résultats peuvent être comparables (TRB, 2007). Par rapport à la méthode simplifiée, la méthode du grillage est une méthode raffinée qui permet d'obtenir des résultats plus précis. Plusieurs hypothèses et suppositions de la méthode de la poutre équivalente ne sont pas appliquées pour le grillage. Bref, le fait que la distribution transversale réelle des charges vives est considérée directement améliore la précision des résultats. De plus, la prise en compte des différentes rigidités des éléments qui constituent le pont permet d'obtenir des résultats plus justes.

La méthode de l'analogie du grillage a par contre comme désavantage le manque de directives quant à son utilisation. En effet, le Code Canadien S6 (CSA S6-14) ne donne que des directives par rapport à la définition des propriétés des membrures. Cependant, en ce qui a trait à l'application des charges vives, de la densité du maillage ou encore du traitement des résultats, il n'y a pas d'indications. De plus, il y a peu de documentation sur cette méthode. En effet, depuis l'article de Jaeger & Bakht (1982, 1987) ou le livre de Hambly (1991), il y a eu peu de publication sur cette méthode.

2.2.4 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (Bathe, 1996) est une méthode d'analyse répandue dans le domaine du génie. Autant en génie mécanique qu'en génie des structures, un grand nombre de logiciels ont été développés en se basant sur la théorie et les formulations mathématiques derrière les éléments finis. En ce qui a trait au génie des structures, plusieurs logiciels ont été adaptés et optimisés afin

de faciliter la modélisation tel que ABAQUS (2018), ADINA (2018) ou ANSYS (2018). Ces logiciels d'abord développés pour le génie mécanique ont été ensuite adaptés pour le génie civil. Par exemple, ces logiciels ont implémenté des formulations pour des matériaux propres au génie des structures tels que le béton. D'autres logiciels, tels que SAP2000 (2018) ou SAFI (2018), sont des logiciels d'éléments finis qui ont été développés en premier lieu pour le génie civil. Ces logiciels permettent plus précisément de modéliser des géométries complexes de ponts sans avoir à poser autant d'hypothèses que la méthode du grillage ou encore la méthode simplifiée. Ils disposent notamment de plusieurs types d'éléments utiles pour la modélisation de ponts. Un pont de type dalle sur poutre peut ainsi être modélisé à l'aide d'éléments plaques ou coques en 2D ou bien à l'aide d'éléments solides 3D. De plus, la modélisation par éléments finis est une méthode raffinée acceptée dans la norme CSA S6-14. Par contre, la clause 5.9.4 du Code (CSA, 2014) ne permet que l'utilisation de propriétés linéaires de matériaux pour l'analyse des tabliers. Une approbation est requise pour l'utilisation de propriétés non-linéaires. La principale justification est à l'effet que les propriétés représentant les conditions de service doivent être utilisées. On peut ainsi tenir compte de la fissuration du béton en réduisant les propriétés élastiques du béton en autant que les propriétés demeurent les mêmes peu importe l'amplitude des charges. Cet exercice est plus facilement réalisable avec un modèle de grillage. Par exemple les rigidités flexionnelles et torsionnelles, longitudinales ou transversales, peuvent être variées indépendamment l'une de l'autre selon la condition réelle appréhendée dans un modèle de grillage, exercice plus difficilement réalisable en éléments finis. La possibilité de réduire les propriétés pour tenir compte de la fissuration repose ultimement sur le jugement de l'ingénieur.

La méthode des éléments finis est toutefois celle permettant d'obtenir la plus grande précision dans la distribution des contraintes car elle reflète le mieux le comportement réel des structures et nécessite le moins de simplifications. Elle permet également d'obtenir les efforts à tous points dans le tablier directement. Cependant, cette méthode est celle qui requiert le plus de ressources informatiques. En effet, le nombre de degrés de liberté avec cette méthode augmente rapidement avec le nombre d'éléments. Par conséquent, la taille des matrices à résoudre devient un facteur limitant. De plus, cette méthode est également très sensible aux erreurs de modélisation. Par exemple, le maillage est un paramètre qui peut faire grandement varier les résultats. Il est alors important que les modèles par éléments finis soient construits correctement afin d'éviter les erreurs de modélisation qui pourraient diminuer la précision des résultats ou affecter la justesse des

résultats (Zookai et al., 1991). Dans cet ordre d'idée, certaines vérifications sont proposées afin de valider la justesse des modèles. Massicotte (2018) propose des exemples de tests de validation afin, entre autres, de vérifier la rigidité torsionnelle et la rigidité flexionnelle.

Un des grands problèmes associés à cette méthode est l'application des charges vives. En effet, tel que soulevé par Zookai et al. (1991), la localisation de l'emplacement du CL-625 qui produit les efforts maximaux n'est pas connue préalablement. Il est nécessaire de considérer plusieurs cas de charges qui représentent toutes des positions possibles du camion afin de déterminer les efforts critiques. Une autre méthode possible est de procéder par lignes ou par surfaces d'influence afin de déterminer l'emplacement critique des charges. De plus, dû au fait que le camion est idéalisé par une série de charges ponctuelles, il faut s'assurer que le logiciel utilisé permet de placer des charges sur les éléments. Sinon, une répartition aux nœuds est nécessaire et cet élément est sensible aux maillages. Certains logiciels spécialisés en ponts tel que CSIBridge (CSI, 2018) permettent de définir des voies de circulation et des combinaisons de charges ponctuelles applicables sur des poutres ou des surfaces. De plus, le code demande de ne considérer que les charges qui augmentent d'amplitude des efforts, ce qui accroît considérablement les cas de charge si on considère qu'en plus le facteur d'amplification dynamique varie dans le code CSA-S6 avec le nombre d'essieux considérés.

La méthode des éléments finis requiert également plus de post-traitement que les autres méthodes. En effet, à partir des distributions de contraintes, il est nécessaire de retrouver les valeurs critiques requis pour la conception. De plus, vu que les efforts sont exprimés en contraintes, une étape additionnelle est nécessaire pour obtenir des efforts en forces et moments fléchissants.

Bref, bien que la méthode des éléments finis puisse être considérée comme celle reproduisant avec plus d'exactitude le comportement des ouvrages, son utilisation pour l'analyse courante des ponts est encore limitée.

2.3 Méthode simplifiée du Code CSA S6-14

2.3.1 Historique

La forme de la méthode d'analyse simplifiée utilisée dans la présente édition du Code canadien de calcul des ponts routiers découle d'avancements des méthodes issus des codes canadien et

américain. La méthode introduite dans la norme CSA S6-00 était basée, pour les ponts de type dalle épaisses et dalles sur poutres, sur les travaux de Smith (1998), alors responsable du chapitre des méthodes d'analyse du Code S6. Le Commentaire du code S6 (CSA, 2000) révèle que les équations sont en partie basées sur la version du Code ontarien de conception des ponts routiers (Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC), 1991) qui elle-même découlait de l'édition de 1983 (Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC), 1983) qui faisait directement intervenir des paramètres issus de la théorie des plaques orthotropes permettant de caractériser la distribution transversale exprimée par *D* obtenu à partir des rigidités flexionnelles et torsionnelles des tabliers. Cette méthode sera élaborée à la section 2.3.2.

Une étude a ensuite été réalisée par Smith en 1998 (Smith, 1998) afin de valider que les équations présentées dans l'OHBDC donnaient des distributions d'efforts de flexion et de cisaillement exactes et conservatrices. L'analyse paramétrique portant sur environ 500 ponts de type dalle sur poutres simplement supportés avait été réalisée avec la méthode du milieu semi-continu et du logiciel SECAN (Mufti et al, 1992). Seuls des ponts droits, réguliers et simplement supportés avaient été considérés. Pour les charges, un maximum de sept cas de charges a été considéré. Ces cas incluent à la fois les positions transversales possibles de la charge routière ainsi que le nombre de camions. Avec ce faible nombre de cas de chargement limité par le logiciel d'analyse raffinée, il y a lieu de se questionner à savoir si certaines conditions plus critiques ont ait pu être omises, entraînant possiblement une sous-estimation des efforts critiques.

2.3.2 Méthode de rigidité OHBDC 1983

Avant 1975, les ponts de l'Ontario étaient conçus avec le code issu des États-Unis régi par l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Dorton, 1984). Cependant, le modèle de chargement américain ne pouvait être adéquatement appliqué à la province en raison de différences importantes quant aux camions observés sur les routes de l'Ontario. En effet, le camion utilisé dans le Code AASHTO avait seulement la moitié de la charge des camions circulant sur le réseau ontarien. De plus, le Ministère des Transports de l'Ontario (MTO) voulait normaliser les équations en unités métriques, les équations américaines étant calibrées en unités impériales. Des gains économiques, notamment au niveau des armatures de dalle, ont également motivé le MTO à investir dans un Code de conception ponts.

C'est dans ce contexte que Bakht et al. (1979) présentèrent une méthode pour calculer des facteurs de distribution empiriques pour le OHBDC. L'objectif était de présenter une méthode de calcul qui serait similaire à celle du Code AASHTO, mais dont les résultats seraient plus précis. La forme générale de l'équation choisie a donc été de type *S/D* où *S* représente l'espacement des poutres et *D* un facteur empirique. Cette méthode se base sur la théorie des plaques orthotropes qui suppose que la répartition transversale des efforts induits par les charges vives est seulement fonction des rigidités relatives. Selon cette approche, deux ponts possédants les mêmes rigidités relatives ont les mêmes caractéristiques de distribution des charges vives. Les rigidités qui ont été considérées sont la rigidité flexionnelle longitudinale, la rigidité flexionnelle transversale ainsi que la rigidité en torsion. Pour caractériser le comportement des tabliers, deux paramètres de caractérisation ont été introduits : α et θ, présentés aux équations suivantes.

$$\alpha_1 = \frac{D_{xy} + D_{yx} + D_1 + D_2}{2\left(D_x D_y\right)^{0.5}} \tag{2.4}$$

$$\theta = \frac{h}{L}\left(\frac{D_x}{D_y}\right)^{0.25} \tag{2.5}$$

Une analyse paramétrique représentant des géométries courantes de ponts a ensuite été réalisée à l'aide de la méthode des plaques orthotropes et de la méthode du grillage afin de lier ces paramètres caractéristiques et le facteur de distribution *D*. La relation est exprimée sous formes d'abaques dans l'édition de 1983 de la norme OHBDC puis sous forme d'équations, sans toutefois les facteurs α et θ dans l'édition 1991. L'élimination de l'utilisation explicite de ces paramètres a permis de simplifier les équations à l'époque où les calculs se faisaient encore manuellement, au détriment toutefois de la précision de la méthode. Les normes OHBDC ont également introduit le concept de largeur des voies, paramètre entrant dans le calcul de D_T, facteur de correction qui a été conservé dans les éditions de la norme CSA-S6.

2.3.3 Validation de la méthode de S6-06

Une étude a été conduite en 2012 (Théoret et Massicotte, 2012) portant sur une validation exhaustive de la méthode simplifiée pour les ponts de type dalle sur poutres dans laquelle 3432

configurations de ponts droits simplement supportés ont été étudiés, ainsi que ces mêmes ponts pour 4 valeurs de biais (15, 30, 45 et 60 degrés), pour un total de 17 160 ponts analysés. Cette étude a permis de révéler que pour les ponts droits la norme S6 était généralement sécuritaire à l'état limite ultime, trop sécuritaire à l'état limite de fatigue et s'avérait non sécuritaire pour certaines conditions à l'état limite ultime pour l'effort tranchant. Ces travaux ont permis d'introduire un facteur de correction visant à augmenter l'effort tranchant pour les ponts de type dalle sur poutres biais dans l'édition 2014 du CSA-S6. Par contre, les correctifs proposés pour la méthode simplifiée pour les ponts droits n'ont pas été retenus.

2.3.4 Équations actuelles de la méthode simplifiée du Code CSA S6-14

La méthode simplifiée actuelle, tel que présentée dans le Code CSA S6-14, se base encore sur le concept d'une répartition *S/D*. Tout d'abord, il faut calculer les efforts de cisaillement et de flexion causés par les charges vives pour une voie. Dans le calcul des efforts, il faut également considérer les facteurs d'amplification dynamique prescrits avec la charge vive. Le tablier est alors simulé comme une seule poutre. La répartition s'effectue ensuite entre les différents éléments porteurs à l'aide de facteurs de distribution empiriques. Ces facteurs appelés *facteur d'essieu* ou F_T sont basés sur des études de calibration.

Les facteurs d'essieu présentés dans le Code S6-14 sont déterminés par rapport aux caractéristiques géométriques des ponts, similairement à l'approche de la dernière édition du Code OHBDC, soit sans considérer les propriétés liées à la rigidité des ponts. Les paramètres considérés dans la norme S6 sont la largeur de voie (W_e), le nombre de voies (n), le nombre d'éléments porteurs (N), la portée équivalente (L_e), l'espacement des poutres (S) ainsi que la largeur du porte-à-faux (S_c). Le type de poutre n'est pas considéré dans les paramètres.

La méthode simplifiée du Code comporte cependant des limitations pour son utilisation. En effet, les ponts doivent comporter des géométries qualifiées de régulières et ils doivent respecter les conditions suivantes, indiquées à l'article 5.6.2 du Code pour des ponts droits :

(i) au moins trois poutres longitudinales supportent le tablier;

(ii) les poutres ont toutes la même rigidité en flexion avec une variation admissible par rapport à la moyenne qui n'excède pas 10 %;

(iii) les poutres sont également espacées avec une variation admissible par rapport à la moyenne qui n'excède pas 10 %;

(iv) l'espacement minimal des poutres est 0,6 m;

(v) l'espacement maximal des poutres est 4,0 m;

(vi) l'épaisseur de la dalle est de 150 mm ou plus;

(vii) le rapport de l'espacement des poutres sur l'épaisseur de la dalle n'excède pas 18;

(viii) la longueur du porte-à-faux n'est pas supérieure à 1,80 m et n'excède pas 60 % de l'espacement moyen entre les poutres longitudinales.

Si une des conditions n'est pas atteinte, la méthode simplifiée ne peut être utilisée et une méthode raffinée est nécessaire pour l'analyse des charges. La méthode du Code S6-14 est demeurée la même dans sa philosophie à celle des versions précédentes (CSA-S6-00 et CSA-S6-06). Toutefois la formation de la méthode a considérablement été changée afin de la rendre plus simple d'application, le nombre d'équations pour le calcul de *D* a été réduit de près de quatre fois, avec le même résultat.

Les équations de la méthode de la poutre équivalente du Code S6-14 sont présentées ci-dessous pour les ponts de type dalle sur poutres pour l'état limite ultime (ÉLU) et l'état limite de service pour le calcul des contraintes maximales (ÉLS1) pour lesquels le nombre de voies chargées varie de 1 jusqu'au nombre maximal *n* et où la position des camions dans les voies doit être la plus défavorable afin de produire la condition la plus critique :

$$M_L = F_T F_S M_T \tag{2.6}$$

et

$$V_L = F_T F_S V_T \tag{2.7}$$

où :

M_T, V_T = Moment fléchissant et effort tranchant total sur la poutre équivalente causés par une voie chargée;

F_T = Facteur d'essieu empirique pour prendre en compte la répartition transversale;

F_S = Facteur empirique pour prendre en compte l'effet du biais.

Dans la présente étude, puisque les ponts à biais ne sont pas traités, F_S sera pris égal à 1.0. Pour le calcul du facteur de répartition transversale empirique F_T :

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c (1 + \mu\lambda)} \geq 1.05 \frac{nR_L}{N} \tag{2.8}$$

où :

S = Espacement des poutres;

D_T, λ = Facteurs empiriques de variant selon la portée;

γ_c = Facteur permettant de considérer l'effet du porte-à-faux pour le moment fléchissant des poutres extérieures ou de considérer l'effet de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant;

μ = Facteur permettant de considérer l'effet de la largeur de chaque voie;

R_L = Facteur permettant de considérer la simultanéité des voies chargées;

n = Le nombre de voies de conception;

N = Le nombre de poutres;

Les équations rattachées à chacun de ces paramètres sont présentées à la section 5.6.6 du Code. Plus précisément, les tableaux 5.3 à 5.7 du Code présentent les équations applicables pour déterminer les valeurs de chacun des paramètres. Un résumé de ces équations est présenté à l'Annexe B. La paramètres D_T et λ, qui varient avec la portée pour la flexion, ont des valeurs plus grandes pour des portées plus longues afin de refléter le fait que la répartition transversale entre les poutres est plus favorable pour des longues portées.

À l'état limite de fatigue (ÉLF) et l'état limite de service associé à la flèche (ELS2), l'équation générale est légèrement différente alors que les équations pour les différents paramètres diffèrent de ceux de l'ÉLU. Selon le Code S6, un seul camion au centre d'une seule voie doit être considéré à ces états limite. L'équation pour l'état limite de fatigue est présentée ci-dessous pour les ponts de type dalle sur poutres :

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c (1 + \mu\lambda + \gamma_e)} \geq 1.05 \frac{1}{N} \tag{2.9}$$

où, en plus des paramètres décrits pour l'équation précédente, on a :

γ_e = Facteur permettant de considérer l'effet de la position du camion dans la voie de rive par rapport à l'extrémité du porte-à-faux.

2.3.5 Prise en considération des ponts continus dans la norme CSA S6-14

La méthode simplifiée du Code CSA S6-14 permet d'analyser des ponts continus qui respectent les critères établis à la section 5.6.2 du Code. L'analyse de ce type de pont se fait exactement comme pour les portées simples sauf que les valeurs de D_T et λ, qui varient selon la portée, sont déterminées en fonction d'une portée réduite afin de prendre en considération que la distribution transversale est moindre pour une travée continue que pour une travée simple de même longueur. Cela est pris en compte avec le concept de portée équivalente L_e. Dans l'édition actuelle, la portée équivalente représente à la distance entre deux points d'inflexion. Pour le moment positif, cette distance est une proportion constante de la portée sur laquelle le moment positif est calculé. Pour le moment négatif, cette distance est une proportion constante des deux portées de part et d'autre de l'appui analysé. L'hypothèse que les points d'inflexion sont toujours situés à la même localisation est implicite. La Figure 2.2 illustre comment calculer la valeur de cette portée équivalente.

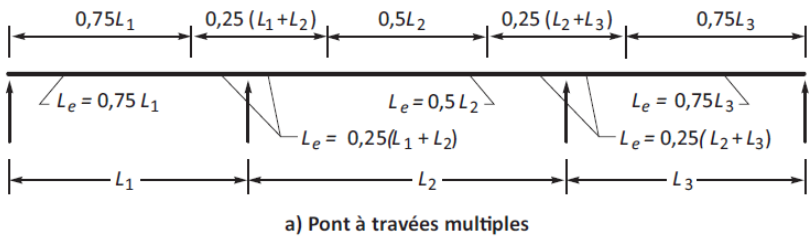


Figure 2.2 Calcul des portées équivalents pour un pont à travées multiples (Tiré du Code CSA S6-14)

2.4 Méthode simplifiée du Code AASHTO

Le Code américain, la norme AASHTO (AASHTO, 2017), comporte également une méthode simplifiée. Comme dans le Code canadien, la méthode simplifiée de l'AASHTO comporte également des facteurs empiriques. À l'instar du Code canadien, l'analyse des ponts de type dalle en béton sur poutres en acier, dalle en béton sur poutres en béton I précontraint et dalle en béton sur poutres en béton T monolithique se fait par les mêmes équations. Par contre, le Code américain tient compte de la différence entre ces types de ponts en considérant la différence de rigidité flexionnelle entre les poutres et la dalle pour la flexion. Le paramètre K_g est introduit dans les équations afin de distinguer ces types de ponts qui peuvent avoir une répartition d'efforts différente. L'équation qui permet de calculer ce paramètre s'exprime comme suit :

$$K_g = n\left(I + Ae_g{}^2\right) \tag{2.10}$$

où,

n = rapport des modules élastiques égal à E_B / E_D;

E_B = Module élastique de la poutre;

E_D = Module élastique de la dalle ;

I = Inertie de la poutre;

A = Aire de la poutre;

e_g = Distance entre le centre de gravité de la poutre seule et celui du tablier complet.

Dépendamment de la rigidité flexionnelle des poutres, le facteur de distribution empirique peut ainsi varier. Le tableau 4.6.2.2.2b-1 de la norme présente ensuite les différentes équations à utiliser afin de calculer le facteur d'essieu pour la poutre intérieure pour tous les ponts ayant plus de trois poutres. Les équations ne considèrent qu'une équation pour les ponts à une voie et une autre pour tous les autres ponts ayant plus d'une voie. Cela constitue une différence avec le Code canadien où plusieurs équations sont présentées dépendamment du nombre de voies présentes sur le pont. Pour les ponts à trois poutres, il est prescrit de prendre la plus grande valeur entre les équations du

tableau 4.6.2.2.2b-1 et la méthode du bras de levier, ou méthode isostatique. Ce principe est également appliqué pour les poutres extérieures.

La méthode du bras de levier, ou isostatique, consiste à considérer la dalle comme étant composée d'éléments discontinus transversalement, c'est-à-dire sans rigidité transversale (Massicotte, 2018). La méthode se base sur l'hypothèse qu'il n'y a aucune continuité de moment dans la section transversale du tablier. Une rotule est alors supposée au-dessus de chacun des appuis intérieurs. Les réactions sont alors obtenues par équilibre statique et celles-ci représentent alors les facteurs d'essieu. Un exemple est présenté à la Figure 2.3.

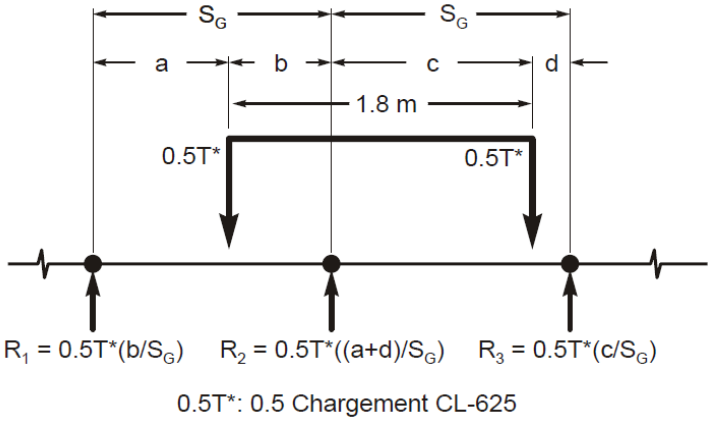


Figure 2.3 Exemple de la méthode du bras de levier (Tiré de Théoret 2010)

Cette méthode peut bien performer pour trouver les répartitions des efforts au cisaillement et peut même donner des meilleurs résultats que les autres méthodes simplifiées lorsque calibrée (TRB, 2007). La Figure 2.4 tirée du rapport NCHRP 592 (TRB, 2007) présente une comparaison des différentes méthodes simplifiées. L'indice de performance est basé sur les coefficients de corrélation R^2 entre la méthode simplifiée étudiée et celle obtenue par une méthode raffinée.

	excellent ≥ 0.9		0.90 > good ≥ 0.80	0.80 > acceptable ≥ 0.70		0.70 > poor ≥ 0.50		bad < 0.5			
				Method							
Bridge Set	**Action**	**Girder Locations**	**Lanes Loaded**	Sanders and Elleby	AASHTO Standard Specification	CHBDC	LRFD	Alternate for Moment	Uniform Distribution	Lever Rule	**Best Method**	
1	Shear	Exterior	1	bad	bad	bad	good	NA	bad	excellent	**Lever**	Slab On Steel I
			2 or more	bad	bad	bad	good		bad	excellent	**Lever**	
		Interior	1	good	good	good	good		acceptable	good	**Lever**	
			2 or more	good	good	good	acceptable		good	excellent	**Lever**	
	Moment	Exterior	1	bad	bad	bad	acceptable	bad	poor	good	**Lever**	
			2 or more	bad	bad	bad	good	bad	poor	good	**Lever**	
		Interior	1	bad	bad	bad	bad	poor	bad	bad	**Alternate**	
			2 or more	acceptable	poor	acceptable	acceptable	acceptable	good	acceptable	**Uniform**	
2	Shear	Exterior	1	bad	bad	bad	excellent	NA	poor	excellent	**Lever**	Slab on Concrete I
			2 or more	bad	bad	bad	acceptable		poor	excellent	**Lever**	
		Interior	1	good	good	good	excellent		acceptable	excellent	**Lever**	
			2 or more	good	good	good	good		excellent	good	**Uniform**	
	Moment	Exterior	1	bad	bad	bad	good	bad	poor	excellent	**Lever**	
			2 or more	bad	bad	bad	good	bad	poor	excellent	**Lever**	
		Interior	1	bad	poor	acceptable	good	good	bad	poor	**Alternate**	
			2 or more	good	good	good	good	good	excellent	good	**Uniform**	

Figure 2.4 Comparaison des méthodes d'analyse simplifiée (Tiré de TRB 2007)

À l'effort tranchant, il est possible de voir que la méthode du bras de levier calibrée performe mieux que toutes les autres méthodes.

Pour la répartition à la poutre extérieure, seul un coefficient e est multiplié au facteur d'essieu intérieur. Ce coefficient permet de prendre en compte l'effet de la largeur du porte-à-faux sur les efforts à la poutre extérieure. Le paramètre d_e est utilisé pour caractériser cet effet. Ce paramètre représente la distance entre la poutre et l'intérieur du chasse-roue. Il est à noter que cette distance peut également être négative, ce qui diminuerait les efforts de flexion sur la poutre extérieure. Le coefficient e est également utilisé à l'effort tranchant. En ce qui a trait au cisaillement, l'équation utilisée pour les poutres extérieures et intérieures ne dépend que de l'espacement des poutres comme dans le Code canadien.

2.4.1 Prise en considération des ponts continus dans la norme AASHTO

La méthode simplifiée du Code AASHTO permet également d'analyser des ponts continus. Comme pour le Code canadien, l'analyse de ce type de pont se fait exactement comme pour les portées simples sauf qu'est introduit le concept de portée équivalente. Par contre, cette portée équivalente est calculée différemment que dans le Code S6-14. Par exemple, pour calculer le moment de flexion négatif à l'appui, la longueur à prendre est la moyenne des deux portées qui sont de part et d'autre de l'appui. Dans le Code S6-14, la moitié de cette longueur est prise. Les portées équivalentes sont résumées au Tableau 2-2.

Tableau 2-2 Portée équivalente selon le Code AASHTO (Tiré de AASHTO, 2017)

Force Effect	*L* (ft)
Positive Moment	The length of the span for which moment is being calculated
Negative Moment—Near interior supports of continuous spans from point of contraflexure to point of contraflexure under a uniform load on all spans	The average length of the two adjacent spans
Negative Moment—Other than near interior supports of continuous spans	The length of the span for which moment is being calculated
Shear	The length of the span for which shear is being calculated
Exterior Reaction	The length of the exterior span
Interior Reaction of Continuous Span	The average length of the two adjacent spans

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie du projet. Tout d'abord, un bref résumé de la revue de littérature sera présenté. Ensuite, les détails liés à la modélisation des structures de ponts sont présentés. Par la suite, la méthode de sélection et de filtre des ponts à analyser est présenté. Finalement, deux validations sont présentées : une validation des rigidités des modèles analysés et une validation de la méthode d'analyse sélectionnée.

3.2 Revue de littérature

Une revue de littérature est d'abord nécessaire pour recenser les connaissances dans le domaine de l'analyse des ponts routiers et ainsi orienter la méthodologie. Une recherche sur les sujets suivants a été réalisée et présentée au Chapitre 2 :

- le Code canadien de calcul des ponts routiers (CSA S6-14) ainsi que la documentation ayant mené à la méthode d'analyse simplifiée des charges présentée au chapitre 5 de ce code;
- les méthodes de calibration de la méthode d'analyse simplifiée de la norme CSA S6-14;
- les méthodes d'analyses raffinées utilisées pour analyser les ponts routiers;
- les règles de conception des ponts routiers;
- les capacités ainsi que les limites des logiciels d'analyse des structures;
- les particularités des méthodes d'analyse des ponts à travées continues.

3.3 Choix de la méthode d'analyse

Les différentes méthodes d'analyse présentées au Chapitre 2 comportent toutes des avantages et inconvénients. La méthode des éléments finis est la plus précise et robuste, mais également celle la plus sensible aux erreurs de modélisation. La méthode simplifiée pour sa part n'est pas susceptible à ces erreurs, mais son champ d'application est limité par le Code.

Tout d'abord, pour déterminer la méthode idéale pour cette étude, le Tableau 3-1 présente les avantages et les inconvénients de la méthode simplifiée.

Tableau 3-1 Avantages et inconvénients de la méthode simplifiée du Code S6-14

Méthode simplifiée	
Avantages	**Inconvénients**
• Rapide et facile à calculer • Facile à valider • Méthode conservatrice • Méthode bien couverte par le Code S6 • Plus grande consistance entre les utilisateurs • Indépendant du raffinement du modèle	• Applicabilité limitée par le Code S6 • Méthode qui peut comporter dans certains cas des résultats non-sécuritaires ou trop conservateurs

Ensuite, le Tableau 3-2 présente les avantages et les inconvénients de la méthode du grillage.

Tableau 3-2 Avantages et inconvénients de la méthode du grillage

Analogie du grillage	
Avantages	**Inconvénients**
• Couverte en partie par le Code S6-14 • Facilement programmable • N'est pas limitée par le Code • Précision des résultats comparables aux éléments finis • Requiert moins de puissance de calcul que les éléments finis • Les résultats sont directement renvoyés en efforts globaux	• Demande une bonne compréhension du concepteur pour le choix des hypothèses • Manque de directive du Code pour l'application des charges • Peu de documentation récente • Certains effets sont négligés (ex. gauchissement) • Dépend du raffinement du modèle • Plus grande variabilité entre les utilisateurs

Finalement, le Tableau 3-3 présente les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis.

Tableau 3-3 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

Éléments finis	
Avantages	**Inconvénients**
• Méthode d'analyse la plus précise • Permet de considérer tous les effets sur le tablier • Nécessite le moins de simplifications • N'est pas limitée par le Code	• Pas couverte par le Code S6 • Sensible aux erreurs de modélisation • Les rigidités sont couplées dans toutes les directions • L'application des charges vives est longue et complexe • Les efforts sont exprimés en contraintes ce qui alourdit le post-traitement

3.4 Modélisation

À travers le recensement des méthodes d'analyse raffinées, il est possible de déterminer que la méthode du grillage est la plus appropriée pour cette étude. Tel que mentionné au Chapitre 2, avec des modèles adéquats, cette méthode permet d'obtenir des résultats justes et précis semblables à la méthode des éléments finis tout en ayant des temps de calcul plus rapides que celle-ci. Il est donc possible de couvrir une plus grande gamme de ponts avec cette méthode d'analyse et ainsi obtenir un plus vaste échantillon afin de recueillir des statistiques plus justes et précises sur la méthode simplifiée. Pour assurer la validité et la justesse des modèles, l'information trouvée au Chapitre 2 permettra de déterminer plusieurs paramètres nécessaires au modèle de grillage :

- maillage du grillage;
- types d'éléments considérés;
- propriétés géométriques des éléments du grillage;
- application des charges vives;

- interprétation des résultats.

Tout d'abord, le maillage du grillage doit respecter le comportement d'un tablier avec des poutres en acier ou en béton. À cette fin, il faut choisir tous les types d'éléments à considérer dans le modèle. La littérature présente plusieurs types d'éléments qu'il est possible de considérer dans un modèle de grillage et l'élément de poutres a été choisi pour l'étude. Ce type d'éléments permet à la fois de considérer les déformations de flexion et celles de cisaillement en plus d'être relativement simple. Ces éléments à six degrés de liberté par nœuds ont l'avantage de n'avoir que deux nœuds, ce qui accélère les calculs. Ensuite, les propriétés géométriques de ces éléments de poutre doivent se traduire en des rigidités qui représentent bien le cheminement réel des efforts. À cette fin, le Code CSA S6-14 propose dans l'annexe A5.1 des propriétés à adopter pour chaque type d'éléments. Ces équations sont celles qui ont été choisies pour définir les propriétés des éléments du modèle. La manière d'appliquer les charges vives sur le modèle doit également être déterminée. En effet, sur cet élément, il y a plusieurs méthodes disponibles dans la littérature pour simuler le passage de camions. Il faut donc sélectionner celle qui est la plus appropriée. Finalement, il faut choisir, selon la littérature, les emplacements où les efforts de flexion et ceux de l'effort de cisaillement sont maximaux.

3.5 Maillage du modèle de grillage

Les paramètres des modèles de grillages qui ont été utilisés dans le cadre du présent projet ont été déterminés à travers les recommandations présentées au chapitre 2. Tout d'abord, tel que recommandé par O'Brien (2014), un élément longitudinal est placé à la localisation de chaque poutre pour représenter les lignes de cheminement des forces du tablier. Les lignes de forces peuvent être des concentrations d'armatures, des câbles de précontraintes ou encore des poutres comme dans le cas présent. De plus, l'ajout d'un élément longitudinal additionnel de dalle intercalé entre les éléments de poutre permet une meilleure distribution des efforts de flexion à la mi-travée (Jaeger & Bakht, 1982). Pour l'espacement transversal des éléments longitudinaux du grillage S_G, un espacement de $S/2$ a donc été choisi, où S représente l'espacement des poutres. De cette façon, l'espacement est constant entre les éléments et il est alors possible d'insérer des éléments de dalle longitudinale entre chaque élément de poutre longitudinal. De plus, pour respecter un réalisme dans

les ponts, des limites maximales et minimales ont été imposées où L représente la portée du pont tel que présenté au Tableau 3-4.

Tableau 3-4 Limites d'espacement des poutres

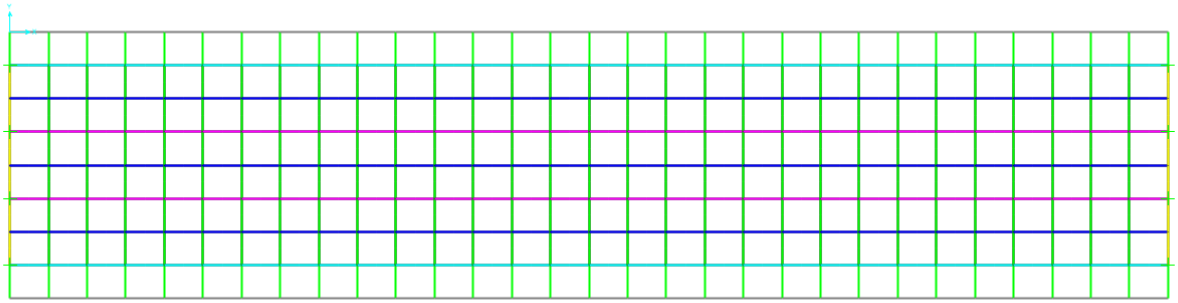
Type de pont	**Espacement minimal des poutres S_{min}**	**Espacement maximal des poutres S_{max}**
Pont avec poutres en acier	Maximum entre *L/15* et 0.6 m	Minimum entre *L/3* et 4 m
Pont avec poutres en béton	Maximum entre *L/25* et 0.9 m	Minimum entre *L/3* et 4 m

La limite maximale de 4 m et la limite de minimale de 0.6 m sont définies dans le Code canadien des ponts (CSA S6-14) comme les bornes pour l'application de la méthode simplifiée. En dehors de ces limites, la méthode simplifiée n'est pas applicable. En ce qui a trait à la limite d'espacement minimale S_{min} de 0.9 m pour les ponts avec poutres en béton, celle-ci sert à assurer le réalisme dans le choix des ponts analysés. En effet, ces poutres possèdent une âme plus large et un espacement minimal de 0.6 m ferait en sorte que les poutres soient trop rapprochées.

Une autre considération est apportée par Hambly (1991) qui recommande que l'espacement des membrures longitudinales S_G soit toujours moindre que le quart de la portée L du pont. Avec les limites d'espacement sélectionnées, il est toujours possible de respecter cette recommandation, car l'espacement maximal des poutres S étant de $L/3$, la valeur minimale de S_G devient donc $L/6$ ce qui est moindre que *L/4* tel que recommandé. Cette limite permet une distribution adéquate des charges entre les éléments longitudinaux. Les éléments porte-à-faux quant à eux sont placés à la distance de la longueur du porte-à-faux S_c. Pour l'espacement longitudinal des éléments transversaux, un espacement de $L/25$ m a été choisi pour tous les modèles afin de bien représenter l'effet de la répartition bidirectionnelle des efforts dans la dalle.

Pour les conditions limites, des appuis simples ont été placés aux nœuds d'extrémité des éléments représentant les poutres. Cela représente les conditions d'appui du pont car il n'y a que les poutres qui sont supportées aux extrémités. De plus, de cette façon, les membrures restent toujours orthogonales et aucune manipulation de nœuds n'est nécessaire pour faire coïncider les nœuds avec les points de support réels. Dans le cas contraire, il pourrait y avoir des membrures en biais ce qui

compliquerait l'interprétation des résultats. La Figure 3.1 montre un exemple de modèle de géométrie de grillage considéré pour un pont de 5 poutres de 30 m de portée avec un porte-à-faux de *0.5S*:



Couleur	Type d'élément
Jaune	Diaphragme
Magenta	Poutre intérieure
Gris	Porte-à-faux
Cyan	Poutre extérieure
Bleu	Dalle longitudinale
Vert	Dalle transversale

Figure 3.1 Exemple de modèle de grillage utilisé – Pont avec 5 poutres

3.6 Détermination des propriétés des ponts synthétiques

L'étude de Massicotte, Conciatori et Théoret (2012) a permis de pouvoir dresser des tendances entre les rigidités flexionnelles et torsionnelles de ponts de type dalle sur poutres, la portée des ponts ainsi que le matériau de poutres. Cette étude a porté sur 123 ponts réels provenant de plans du ministère des Transports du Québec ainsi que de la ville de Montréal.

Cette étude a permis de dresser des tendances entre la portée des ponts, leur type de tablier ainsi que leur rigidité flexionnelle longitudinale. La Figure 3.2 présente graphiquement la relation entre ces trois paramètres.

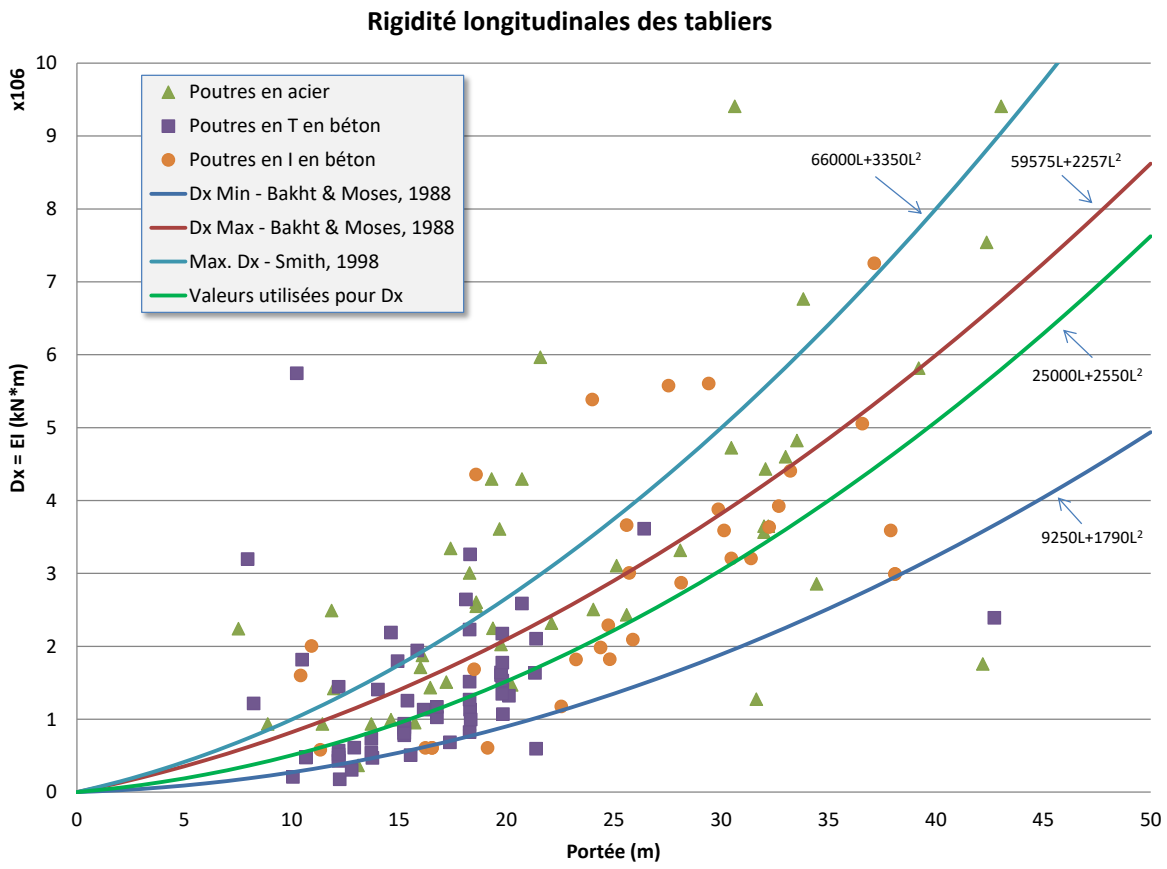


Figure 3.2 Variation de la rigidité flexionnelle longitudinale selon le type de tablier (Tiré de Massicotte, Conciatori et Théoret, 2012)

Suite à cette étude, il a été déterminé que la rigidité flexionnelle par unité de largeur de tablier, D_x, où les unités sont en kN et m, pouvait être exprimée par la relation suivante où L représente la portée du pont :

$$D_x = 25000\,L + 2550\,L^2 \tag{3.1}$$

Cette équation est applicable pour tous les trois types de poutres étudiés. L'inertie flexionnelle associée aux éléments de poutres est ensuite trouvée en fonction de l'espacement entre les poutres S et le module d'élasticité E du matériau de la poutre. En supposant que cette inertie flexionnelle soit distribuée également entre les poutres, comme c'est le cas dans ce travail, l'inertie en flexion est trouvée selon cette équation :

$$I_x = \frac{D_x S}{E} \tag{3.2}$$

Ensuite, cette étude a également permis de dresser des tendances entre la portée des ponts, leur type de tablier ainsi que leur rigidité torsionnelle longitudinale. La Figure 3.3 présente graphiquement la relation entre ces trois paramètres.

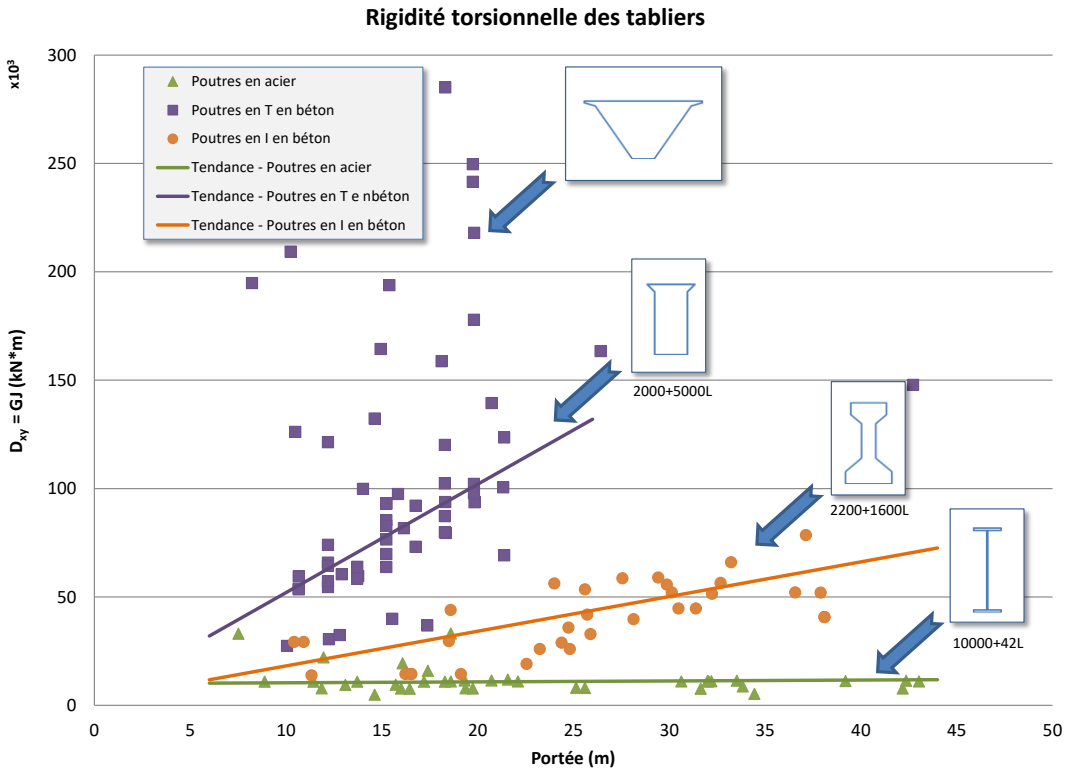


Figure 3.3 Variation de la rigidité torsionnelle longitudinale selon le type de tablier (Tiré de Massicotte, Conciatori et Théoret, 2012)

Pour la rigidité torsionnelle, il faut considérer la rigidité à la fois de la dalle et celle des poutres. En effet, les poutres en béton ont une grande influence sur ce paramètre tandis que pour les poutres en acier, l'inertie torsionnelle est principalement attribuable à la dalle. L'étude de Théoret a donc déterminé trois relations pour lier la rigidité torsionnelle à la portée du pont :

$$D_{xy} = 10\,000 + 42\,L \qquad \text{Dalle de béton sur poutres d'acier en I} \qquad (3.3)$$

$$D_{xy} = 2200 + 1600\,L \qquad \text{Dalle de béton sur poutres de béton en I} \qquad (3.4)$$

$$D_{xy} = 2000 + 5000\,L \qquad \text{Pont avec poutres monolithiques en T en béton} \qquad (3.5)$$

Comme pour l'inertie flexionnelle, l'inertie torsionnelle est ensuite trouvée selon l'espacement des poutres S et le module de cisaillement G du matériau de la poutre :

$$J_{xy} = \frac{D_{xy}S}{G} \tag{3.6}$$

Dans les modèles étudiés, les diaphragmes d'appui sont également considérés. Pour ces éléments, une rigidité flexionnelle égale aux trois quarts de celle des poutres a été choisie. La rigidité torsionnelle équivaut à la moitié de celles des poutres.

Dans le cadre de cette nouvelle étude, il a été décidé de rendre le modèle moins rigide en cisaillement en considérant l'aire en cisaillement dans les propriétés des éléments. En effet, dans l'étude de Massicotte et al. (2016), les résultats montraient que les modèles étaient parfois trop rigides en cisaillement. Une grande partie des efforts tranchants obtenus par la méthode d'analyse raffinée était plus élevée que les efforts tranchants issus du calcul avec la méthode de la norme CSA S6-14, ce qui a suscité certaines interrogations à l'époque. En assignant une aire de cisaillement aux éléments de poutres, le modèle devient moins rigide au cisaillement. Pour tout élément de poutre, l'aire en cisaillement est représentée par la relation suivante où h_w représente la hauteur de l'âme de la poutre et w la largeur de l'âme de la poutre :

$$A_v = h_w \times w \tag{3.7}$$

Pour la présente étude, la hauteur des poutres est déterminée selon les contraintes d'élancement tel que formulées dans le *Manuel de conception des structures* du ministère des Transports du Québec (MTQ). Ces contraintes sont présentées dans le Tableau 3-5 qui est un extrait du tableau 1.8-2 du *Manuel de conception des structures* (Ministère des Transports du Québec, 2016).

Tableau 3-5 : Contraintes associées aux types de pont (Tiré du Manuel de conception des structures du MTQ de 2009)

	CONTRAINTES								
Type de ponts	**Portée L (m)**	**Épaisseur du tablier**	**Biais**	**Sol * (kPa) ÉLUT**	**Remblai**	**Étaiement**	**Préfabrication**	**Délai de construction**	**Entretien**
Ponceau	1 à 8	selon le type	< 30°	> 75	oui	oui	possible	moyen à court	faible
Ponceau en arc en béton	3 à 20	L/30	non	> 150	oui	oui	possible	moyen à court	faible
Portique en béton	5 à 20	L/30 à L/15	< 20°	> 150	possible	oui	non	moyen	faible
Dalle pleine en béton	6 à 15	L/30 à L/20	< 30°	> 150	non	oui	non	moyen	faible
Pont acier-bois	6 à 25	L/25	< 20°	> 75	non	non	oui	court	moyen
Poutre en béton	10 à 25	L/20	< 30°	> 150	non	oui	possible	long à moyen	moyen
Poutre en acier, dalle en béton	15 à 45	L/25	< 20°	> 150	non	non	oui	moyen	moyen
Poutre préfabriquée en béton précontraint	20 à 45	L/16 à L/22	< 30°	> 300	non	non	oui	moyen	moyen
Poutre en béton précontraint par post-tension	30 à 45	L/28	< 30°	> 300	non	oui	non	long	moyen

** L'utilisation de pieux rend possible la construction sur un sol de capacité inférieure à 150 kPa.*

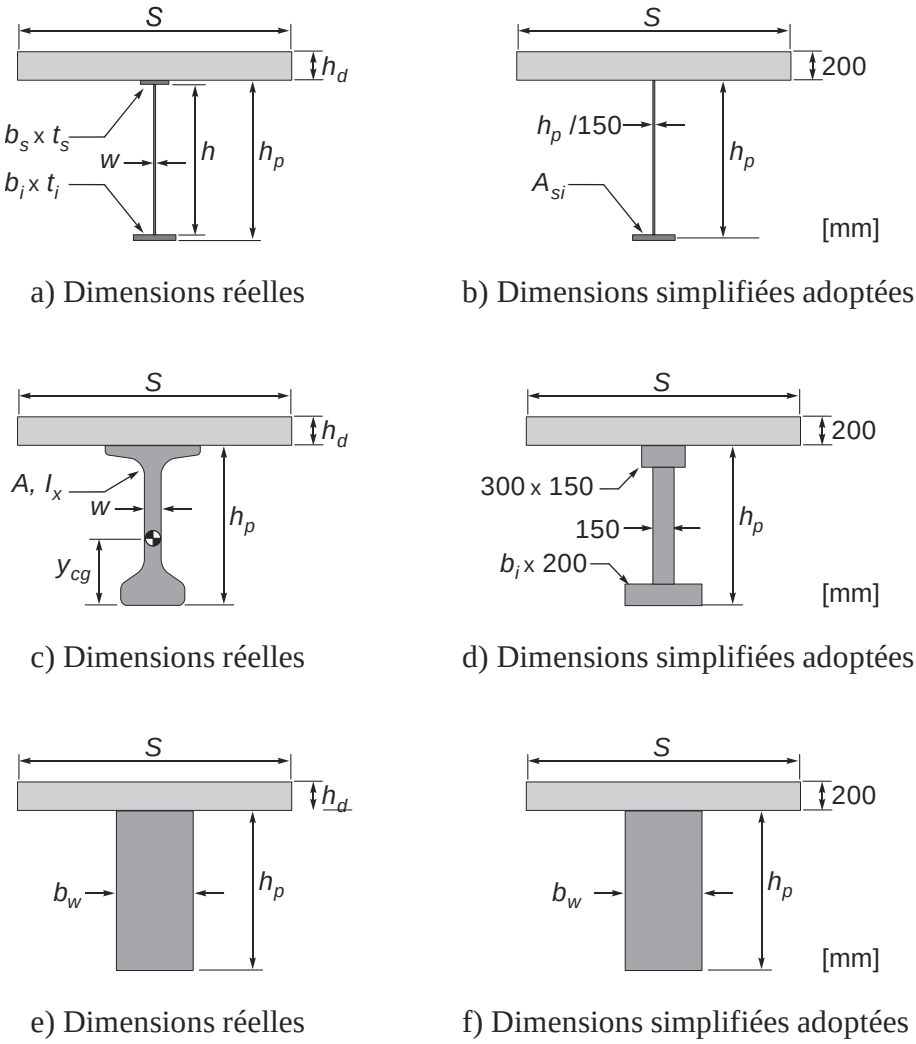
La hauteur des poutres h_p , excluant l'épaisseur de la dalle, a été déterminée pour chaque type de poutres. Une hauteur de poutre de $L/25$ a donc été choisie pour les ponts avec dalle mixte sur poutres en acier. Pour les ponts avec des poutres en béton en précontraint en I, la hauteur de la poutre est fixée à $L/22$. Pour les poutres en béton en T monolithiques, l'élancement dépend de la portée du pont. En effet, pour des ponts dont la portée est égale ou inférieure à 20 m, les poutres sont fabriquées en béton armé pour lesquelles un élancement moindre de $L/20$ a été retenu. Des poutres en béton précontraint ont été considérées pour les ponts dont la portée est supérieure à 20 m pour lesquelles un élancement de $L/28$ a été retenu. Cette valeur rentre à la fois dans la plage d'élancement de la version 2009 du *Manuel de conception des structures* et dans celle de l'édition de 2016. La hauteur h_w de l'âme des poutres se trouve alors en soustrayant de cette hauteur des poutres les épaisseurs des semelles. Tel qu'illustré sur la Figure 3.4, pour les ponts sur poutres en acier, l'épaisseur des semelles est négligeable alors que pour les ponts sur poutres en béton précontraint en I, l'épaisseur est fixée à 150 mm pour la semelle supérieure et 200 mm pour la semelle inférieure, qui sont des valeurs usuelles. Les équations suivantes sont utilisées pour déterminer la hauteur h_p des poutres où les dimensions sont en mm :

$$h_p = \frac{L}{25}$$ Dalle de béton sur poutres d'acier en I (3.8)

$$h_p = \frac{L}{22}$$ Dalle de béton sur poutres en béton précontraint en I (3.9)

$$h_p = \frac{L}{20}$$ Dalle de béton sur poutres en béton armé en T monolithique (3.10)

$$h_p = \frac{L}{28}$$ Dalle de béton sur poutres en béton armé en T monolithique (3.11)



a) Dimensions réelles b) Dimensions simplifiées adoptées

c) Dimensions réelles d) Dimensions simplifiées adoptées

e) Dimensions réelles f) Dimensions simplifiées adoptées

Figure 3.4 Propriétés des sections

Pour la largeur w de l'âme, une valeur de $h_p/150$ a été choisie pour les ponts avec poutres en acier. Pour les ponts avec poutres en béton en I et en T, la largeur w est fixée à 150 mm pour le calcul de A_v pour toutes les portées. En réalité, la largeur de l'âme des poutres en béton T varie avec la portée afin de satisfaire une inertie en flexion ainsi qu'une inertie en torsion réaliste, mais celle-ci est fixée à une valeur constante afin d'éviter de s'assurer de limiter la rigidité en cisaillement. Avec ces valeurs de h_p et de w, l'aire en cisaillement, exprimée en m^2, se calcule en faisant la somme de l'aire de chaque partie de la section. Pour les portées simples, l'aire en cisaillement se simplifie à ces relations qui ne dépendent que de la portée L :

$$A_v = L^2 / 95000 \qquad \text{Dalle de béton sur poutres d'acier en I} \qquad (3.12)$$

$$A_v = 0.150\left(\frac{L}{22} - 0.3\right) \qquad \text{Dalle de béton sur poutres de béton précontraint en I} \qquad (3.13)$$

$$A_v = 0.0075L \qquad \text{Dalle de béton sur poutres en béton armé en T monolithique} \qquad (3.14)$$

$$A_v = 0.0054L \qquad \text{Dalle de béton sur poutres en béton précontraint en T monolithique} \qquad (3.14)$$

Pour les éléments de dalle longitudinale et de porte-à-faux, les propriétés des éléments ont été calculées en prenant les propriétés de section de la portion de dalle qu'ils représentent. Massicotte (Massicotte, 2018) propose des équations données au Tableau 3-6 pour déterminer ces propriétés.

Tableau 3-6 Propriétés des éléments longitudinaux de dalle et de porte-à-faux

Propriété	**Élément de dalle**	**Élément de porte-à-faux**
$\boldsymbol{A_L}$	$b_s h_s$	$b_b(h_s + h_b)$
$\boldsymbol{J_L}$	$\frac{b_s {h_s}^3}{6}\left(1 - 0.63\frac{h_s}{b_s}\right)$	$\frac{(h_s + h_b)b_b^3}{3}\left(1 - 0.63\frac{b_b}{(h_s + h_b)}\right)$
$\boldsymbol{I_{xL}}$	$\frac{b_s h_s^3}{12(1 - \upsilon^2)}$	$\frac{b_b(h_s + h_b)^3}{12}$
$\boldsymbol{I_{yL}}$	$\frac{h_s b_s^3}{12}$	$\frac{(h_s + h_b)b_b^3}{12}$
$\boldsymbol{A_{yL}}$	$\frac{5}{6}b_s h_s$	$\frac{5}{6}b_b(h_s + h_b)$
$\boldsymbol{A_{xL}}$	$\frac{5}{6}b_s h_s$	$\frac{5}{6}b_b(h_s + h_b)$

Dans le cas présent, les éléments longitudinaux de dalle sont considérés comme de type S et les éléments de porte-à-faux sont considérés comme de type B.

Pour les éléments transversaux de dalle, le même raisonnement est fait pour déterminer leurs propriétés et Massicotte propose d’autres équations pour ce type d’élément, données au Tableau 3-7.

Tableau 3-7 Propriétés des éléments transversaux

Propriété	Élément de dalle
A_L	0
J_L	$\frac{p_s h_s^3}{6}$
I_{xL}	$\frac{p_s h_s^3}{12(1-\upsilon^2)}$
I_{yL}	$\frac{G}{E}\frac{p h_s S^3}{6}$
A_{yL}	$\frac{5}{6} p_s h_s$
A_{xL}	0

3.7 Démarche de l'étude paramétrique

3.7.1 Généralités

Pour l'étude paramétrique, il faudra d'abord sélectionner un échantillon de ponts représentatif de ce qui est présent sur le réseau routier du Québec. À cette fin, la section de la revue de littérature sur les normes de conception des ponts détermine des limites pour les géométries des ponts ainsi que des géométries fréquentes.

Dans un premier temps, les ponts analysés sont des travées simples. Ainsi, les paramètres liés à la continuité des travées pourront être isolés. Les résultats des analyses de grillage des ponts seront regroupés pour être comparés aux résultats issus du Code CSA S6-14. Les moments fléchissant et les efforts tranchants critiques pour chacune des poutres seront comparés entre les deux méthodes d'analyse afin de valider la justesse et la précision des équations du Code CSA S6. Les résultats de l'analyse raffinée serviront ensuite de référence pour calibrer les équations du facteur d'essieu du Code CSA S6. Pour ce faire, la revue de littérature inclut un volet sur l'historique des méthodes de calibration de l'analyse des charges vives.

Ensuite, les portées continues seront analysées avec des ponts de deux ou trois travées. Le Code CSA S6 propose une méthode basée sur la portée équivalente telle qu'illustré sur la Figure 5.1 du Code reproduite à la Figure 3.5.

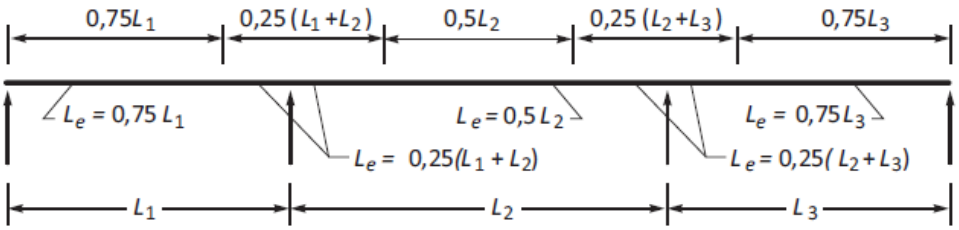


Figure 3.5 Principe de la portée simple équivalente de la norme CSA-S6-14 pour les ponts à travées multiples (Tiré de CSA S6-14)

La validité de cette méthode pourra être analysée de la même façon que pour les portées simples. Un comparatif entre les résultats issus de la méthode raffinée et ceux issus de la méthode simplifiée pourra être dressé. Les proportions de portées pourront alors être revues pour améliorer leur précision. Cependant, d'autres paramètres pourraient influencer la répartition longitudinale des charges dépendamment des caractéristiques du pont. Par exemple, les rapports de longueurs entre les différentes travées pourraient avoir un impact sur la répartition des efforts de flexion. L'impact des différents paramètres sur le biais pourra être analysé et des recommandations pourront être faites.

3.7.2 Ponts sélectionnés

L'analyse paramétrique nécessite d'abord une sélection d'un groupe de ponts synthétiques à analyser. La sélection des ponts synthétiques pour l'analyse paramétrique inclut à la fois les ponts présents sur le réseau routier et ceux couverts par le Code des ponts CSA S6-14. Pour les ponts sur poutres, trois types de poutres ont été retenus : les poutres en acier, les poutres en I en béton précontraint et les poutres en béton en T monolithiques.

Les propriétés de matériau utilisées pour le calcul des membrures du grillage sont des valeurs typiques pour l'acier et pour le béton. Pour l'acier, un module élastique E de 200 GPa et un coefficient de Poisson de 0.3 ont été considérés. Pour le béton, un module élastique de 27 GPa et

un coefficient de Poisson de 0.2 ont été considérés. Ces propriétés correspondent à un béton ayant une résistance de 35 MPa.

Pour les largeurs de voies, afin d'étudier l'influence du paramètre de la largeur des voies W_e sur la distribution des efforts, les deux valeurs limites de largeur carrossable W_c du Code des ponts CSA S6-14 (CSA, 2014) sont considérées ainsi qu'une troisième valeur moyenne entre ces limites. Par exemple, pour un pont de deux voies, des largeurs carrossables de 6 m, 10 m ainsi que 8 m ont été considérées. Pour un pont à une voie, puisqu'il n'y a pas de limite inférieure dans la norme, une largeur minimale de 3.3 m a été fixée. Cette valeur est tirée d'une étude paramétrique de calibration antérieure (Smith, 1998). La largeur complète B des ponts analysés inclut les largeurs des voies ainsi que deux chasse-roues de 450 mm chacun. Pour le nombre de voies considéré, l'étude couvre une à quatre voies

Au niveau des portées L, pour une voie, six portées de 3, 5, 10, 15, 20 et 30 m sont retenues. Pour les ponts comportant deux voies et plus, des portées de 3, 5, 10, 20, 40, 60 m sont retenues. Le choix des limites de portée minimale de 3 m et maximale de 60 m est dû à l'article 5.6.4.6 de la norme CSA S6-14 qui limite la portée L_e entre 3 m et 60 m, les valeurs obtenues pour ces portées devant être utilisées pour des portées respectivement plus courtes ou plus longues.

Le code spécifie également que le nombre minimal de poutre est de trois poutres. Ainsi un nombre de poutres égal à 3, 4, 5, 6 et 8 a été retenu. Le nombre de poutres a été adapté aux critères d'espacement indiqués au Tableau 3-4. Des porte-à-faux de longueur S_c considérés en proportion d'espacement des poutres de $0.3S$, $0.5S$ et $0.6S$ ont été choisis pour analyser l'effet de ce paramètre où S représente l'espacement entre les poutres. La largeur du porte-à-faux de $0.6S$ représente la limite supérieure admise du code S6 pour appliquer la méthode simplifiée. Cependant, les largeurs de porte-à-faux ne peuvent pas dépasser la longueur de 1.8 m puisque le Code spécifie cette borne supérieure. Pour la limite inférieure à la largeur du porte-à-faux, une valeur de 0.3 m a été choisie afin de garder une géométrie réaliste pour le tablier.

Un autre élément qu'il faut considérer pour respecter des géométries réalistes de ponts est l'espacement des poutres. En effet, dépendamment des géométries de poutres analysées, il faut que l'espacement minimal permettent que les tabliers soient réalistes. Pour les poutres en acier, puisque ces poutres ont des faibles largeurs puisqu'elles sont élancées, un espacement de poutres minimal de 0.6 m est choisi. De cette façon, les poutres ne sont pas immédiatement collées et cela reflète

mieux la réalité. Pour les poutres en béton qui sont plus trapues, un espacement de poutres minimal de 0.9 m est imposé. La largeur des poutres en béton T est habituellement de 300 mm et cette largeur correspond également à la largeur des semelles des poutres en béton I. L'espacement minimal de poutres de 0.9 m est donc approprié pour assurer que les poutres ne soient pas immédiatement collées.

Pour les propriétés géométriques, les géométries qui ont été retenues sont celles couvertes dans la norme CSA S6-14. Pour tous les ponts analysés, une épaisseur de dalle de 200 mm a été choisie. En effet, l'utilisation de la méthode simplifiée de la norme a comme limite une épaisseur de dalle supérieure à 150 mm, alors l'épaisseur considérée est proche de cette limite inférieure. De plus, selon la méthode du Code S6, le rapport de l'espacement des poutres sur l'épaisseur de dalle ne peut pas excéder 18. Cette condition est donc assurée avec une épaisseur de 200 mm. Cette valeur d'épaisseur de dalle est également celle qui a été utilisée pour l'étude de calibration précédente. Une dalle non fissurée a été considérée pour le calcul des propriétés. Les propriétés et les géométries des ponts analysés sont présentés au Tableau 3-8.

Tableau 3-8 Paramètres des ponts synthétiques de l'analyse paramétrique

Nombre de voies (*n*)	**Nombre de poutres (*N*)**	**Largeur carrossable en m (W_c)**	**Portée en m (*L*)**	**Longueur du porte-à-faux (S_c)**
1	3 à 8	3.3 m – 4.8 m – 5.9 m	3 à 30 m	0.3S, 0.5S, 0.6S
2	3 à 8	6.0 m – 8.0 m – 9.9 m	3 à 60 m	0.3S, 0.5S, 0.6S
3	3 à 8	10 m – 11.75 m – 13.4 m	3 à 60 m	0.3S, 0.5S, 0.6S
4	3 à 8	13.5 m – 15.25 m – 16.9 m	3 à 60 m	0.3S, 0.5S, 0.6S

Puisqu'il y a plusieurs contraintes associées aux géométries des ponts, il y a des ponts qui auront les mêmes propriétés. Pour l'étude paramétrique et statistique, il est important que chacun des ponts n'ait que de poids une seule fois. Pour ne pas biaiser les résultats, un filtre sera appliqué aux ponts sélectionner afin d'éliminer les doublons. Cela assurera une meilleure représentativité de l'échantillon de ponts analysé.

3.8 Validation de la rigidité des modèles analysés

Les rigidités flexionnelles et torsionnelles assignées doivent être validées puisque les ponts synthétiques doivent représenter des rigidités de ponts réels. En effet, des rigidités qui diffèrent trop de la réalité entraîneraient des répartitions d'efforts différents. Les facteurs d'essieu calculés

représenteraient alors des valeurs irréalistes. Les équations présentées à la section 3.6 ayant été obtenues d'une étude précédente, il s'est donc avéré justifié de vérifier la validité des équations de rigidité des modèles à considérer dans l'étude paramétrique pour quelques ponts réels.

Tout d'abord, les rigidités flexionnelles seront validées. À partir de plans de ponts réels, des rigidités pour différents types de ponts ont été calculées et sont présentées au Tableau 3-9. Les rigidités sont exprimées en kN-m par mètre de largeur de tablier et le matériau de référence est le béton dans le cas présent.

Tableau 3-9 Validation des rigidités flexionnelles obtenues par les équations

Id Pont	**Type**	**D_x-réel**	**D_x-équation**	**$D_{xréel}/D_{xéq.}$**
P-85	Béton T	0.95×10^6	0.97×10^6	0.978
P-16	Béton T	0.15×10^6	0.10×10^6	1.474
P-13	Béton T	2.11×10^6	3.13×10^6	0.673
P-80	Acier	1.31×10^6	0.97×10^6	1.345
P-09	Acier	3.51×10^6	3.72×10^6	0.945
P-02	Béton I	4.55×10^6	5.26×10^6	0.865
P-91	Béton I	8.50×10^6	7.83×10^6	1.086

Il est possible d'observer que les rigidités flexionnelles sont similaires entre les ponts réels et celles obtenues des équations proposées par Théoret (Massicotte et al., 2016). Pour les rapports de rigidité supérieurs à 1, cela est réaliste, car ça permet de pouvoir considérer l'effet de la fissuration qui a pour effet de réduire la rigidité. L'équation pour la rigidité en flexion est donc adéquate pour l'étude paramétrique.

Ensuite, les rigidités torsionnelles seront validées. Comme pour la flexion, à l'aide de plans de ponts réels, des rigidités pour différents types de ponts ont été calculées. L'expression générale pour calculer l'inertie torsionnelle telle que présenté par Roark et Young (1982) est donnée par la relation suivante :

$$J = \frac{a_i t_i^3}{3}\left[1 - 0.63\frac{t_i}{a_i}\left(1 - \frac{t_i^4}{12a_i^4}\right)\right] \tag{3.1}$$

Cependant, tel que présenté par Massicotte (2018), cette équation peut se simplifier pour les sections rectangulaires moyennement élancées. L'expression proposée, retenue pour calculer la rigidité en torsion, s'exprime comme suit :

$$J = \frac{a_i t_i^3}{3}\left[1 - 0.63\frac{t_i}{a_i}\right] \tag{3.2}$$

Pour obtenir la rigidité en torsion, il suffit alors de multiplier l'inertie en torsion par le module de cisaillement *G* du matériau de référence. Cependant, puisque la rigidité en torsion est présente dans deux directions pour les dalles, il faut diviser la rigidité torsionnelle des dalles en 2 pour représenter cet effet. Cependant, pour les poutres, toute la rigidité torsionnelle est considérée, car il n'y a pas cette répartition.

À l'aide de cette équation, les rigidités des ponts ont été calculées et elles sont présentées au Tableau 3-10. Les rigidités sont exprimées en kN-m par mètre de tablier et le matériau de référence est le béton dans le cas présent.

Tableau 3-10 Validation des rigidités torsionnelles obtenues par les équations

Id Pont	**Type**	**D_{xy} réel**	**D_{xy} équation**	**$D_{xyreel}/D_{xyéq.}$**
P-85	Béton T	97×10^3	78×10^3	1.239
P-16	Béton T	149×10^3	101×10^3	1.474
P-13	Béton T	173×10^3	154×10^3	1.119
P-80	Acier	11×10^3	11×10^3	1.026
P-09	Acier	13×10^3	11×10^3	1.106
P-02	Béton I	59×10^3	67×10^3	0.875
P-91	Béton I	111×10^3	83×10^3	1.331

Les rigidités torsionnelles obtenues par les équations représentent bien les ponts réels. L'équation pour la rigidité en torsion est donc adéquate pour l'étude paramétrique.

3.9 Application des charges vives

Les charges vives appliquées sur les modèles sont la charge routière normalisée de conception CL-625 prescrit dans la norme CSA S6-14. Ce camion possède un poids total de 625 kN réparti

sur cinq essieux. Après analyse des différentes configurations des camions réels observés sur les routes, notamment quant à leur poids par essieu et leur nombre d'essieux, le Code définit le CL-625 comme celui représentatif des charges routières autorisées sur le réseau routier au Canada. Cette charge, qui s'applique à tous les états limites, doit être majorée d'un coefficient d'amplification dynamique variant selon le nombre d'essieux causant les efforts. De plus, dans le code CSA S6-14, une charge de voie est également définie afin de représenter la présence de plusieurs camions. Cette charge de voie est idéalisée par une charge uniformément répartie de 9 kN/m qui s'ajoute à 80% de la charge de camion CL-625. Cette charge s'applique à l'état limite ultime et à l'état limite de service pour le calcul des contraintes et inclut le coefficient de majoration dynamique. La Figure 3.6 illustre la charge de camion CL-625 du Code et la Figure 3.7 montre la surcharge de voie qui doit être considérée à l'état limite ultime. Toutes les combinaisons d'essieux et leur coefficient d'amplification dynamique associé ont été considérés lors des analyses.

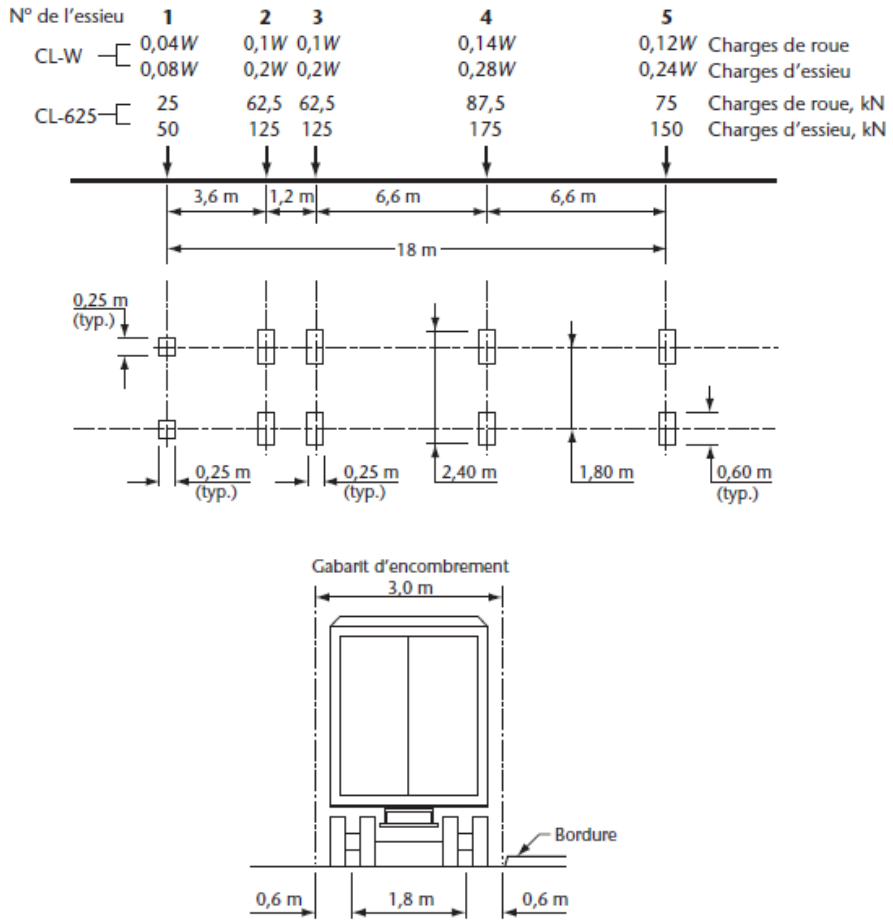


Figure 3.6 : Charge de camion CL-625 définie dans le Code S6-14

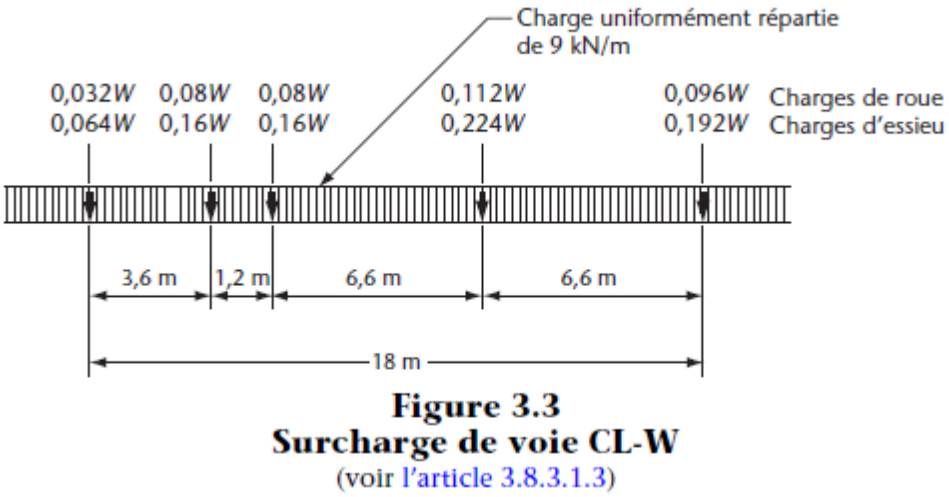


Figure 3.7 : Surcharge de voie définie dans le Code S6-14

Le calcul de l'effet des charges vives s'est fait selon le principe d'une ligne d'influence transversale. Pour la flexion et pour l'effort tranchant, pour chaque poutre, une ligne d'influence transversale associée à l'effort maximal causée par une ligne de roue du CL-625 sur chaque élément longitudinal est tracée. Un exemple de ligne d'influence transversale en flexion pour une poutre intérieure d'une portée simple à poutre en acier présenté à la Figure 3.8 où le moment de flexion en kN-m est représenté sur l'axe des ordonnées.

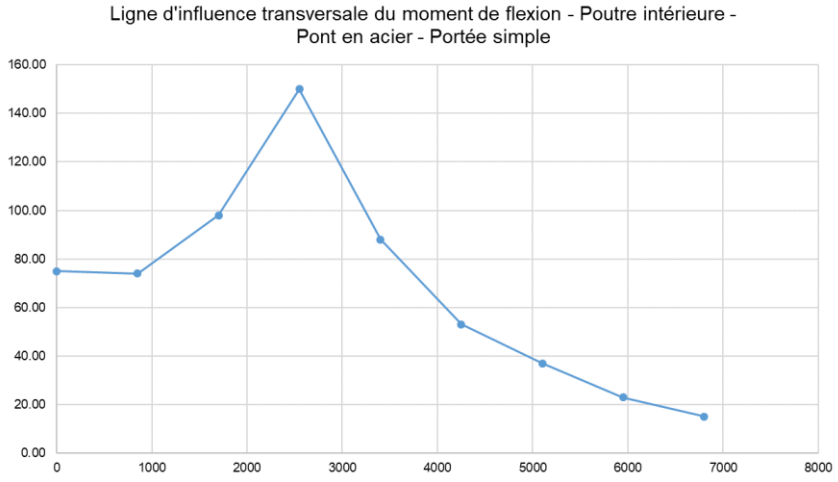


Figure 3.8 Exemple de ligne d'influence transversale utilisée pour l'application des charges vives

Sur cette ligne d'influence transversale sont ensuite placés les camions CL-625. Chaque ligne de roues génère des efforts sur la poutre analysée selon cette ligne d'influence. En sommant la contribution de chacune des lignes de roue, un effort maximal est obtenu pour la poutre. Les différentes configurations de positions de camions considérées sont décrites plus bas.

Une autre méthode qui est possible d'utiliser pour appliquer les charges vives est celle de la surface d'influence. Cette méthode consiste à trouver le coefficient d'influence d'une charge ponctuelle unitaire sur un élément structural à un point précis. En positionnant la charge ponctuelle à différentes positions, une surface d'influence peut alors être tracée, car un coefficient est associé à chacune des positions. Les coefficients d'influence sont différents pour chaque type d'effort (flexion positive, flexion négative et cisaillement) et pour chaque élément structural. Une surface est donc tracée pour chacun des types d'efforts et pour chaque élément structural. Cette méthode s'apparente à la méthode de la ligne d'influence transversale sauf qu'il faut également déterminer la localisation longitudinale du chargement CL-625 en plus de sa position transversale. Cela rend cette méthode plus difficilement programmable, car il faudrait à la fois placer le camion longitudinalement et transversalement. Cela génère un grand nombre de points à considérer pour chacune des positions de camion. Un exemple de surface d'influence est présenté à la Figure 3.9.

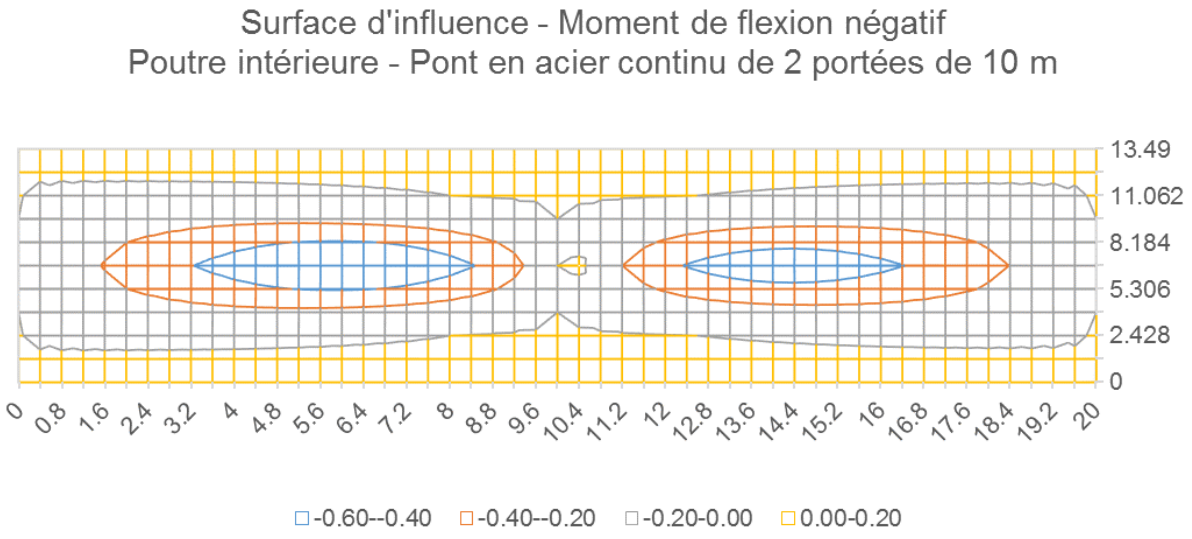


Figure 3.9 Exemple de surface d'influence utilisée pour l'application des charges vive

Tel que mentionné, contrairement à une surface d'influence, l'information de la position longitudinale critique n'est considérée avec l'utilisation d'une ligne d'influence. Une position longitudinale unique est prise pour déterminer les efforts. Dans ce contexte, l'effort de flexion positif longitudinal maximal est pris à 0.46*L* pour une portée simple et à 0.4*L* pour une portée continue. En effet, les enveloppes de moment fléchissant ne sont pas centrées à 0.5*L* et celles-ci sont plutôt un peu décalées. Ces valeurs respectent donc l'allure de l'enveloppe de moment. Ces localisations s'approchent également de celles proposées par l'étude de calibration des charges vives par Kwon (2010) présentées au Tableau 3-11. Cependant, ces valeurs avaient été déterminées avec le camion issu de l'AASHTO alors elles servent à titre comparatif.

Tableau 3-11 : Localisation la plus fréquente du moment maximum positif (Tiré de Kwon 2011)

Nombre de travées	**Numéro de la portée**	**Position proposée du moment fléchissant maximal**
1 travée	1	*0.46 L*
2 travées	1	*0.4 L*
	2	*0.6 L*
3 travées	1	*0.4 L*
	2	*0.5 L*
	3	*0.6 L*

Pour les travées continues, le moment fléchissant négatif est pris à l'appui intermédiaire, car la localisation du moment fléchissant négatif maximal est toujours située à cet endroit pour les portées continues. L'effort de cisaillement maximal se situe aux appuis pour les portées simples et aux appuis intérieurs pour les portées continues. Les camions sont ensuite positionnés transversalement sur ces lignes d'influence et les efforts sont trouvés pour chaque élément porteur. Puisque le nombre de positions transversales des camions est infini, il faut restreindre le nombre de positions critiques à considérer. Pour simplifier le nombre de positions possibles, les trois positions considérées pour chacune des voies sont le camion à gauche de la voie, au centre de la voie et à droite de la voie. Un exemple de chargement pour 3 voies est présenté sur la Figure 3.10 :

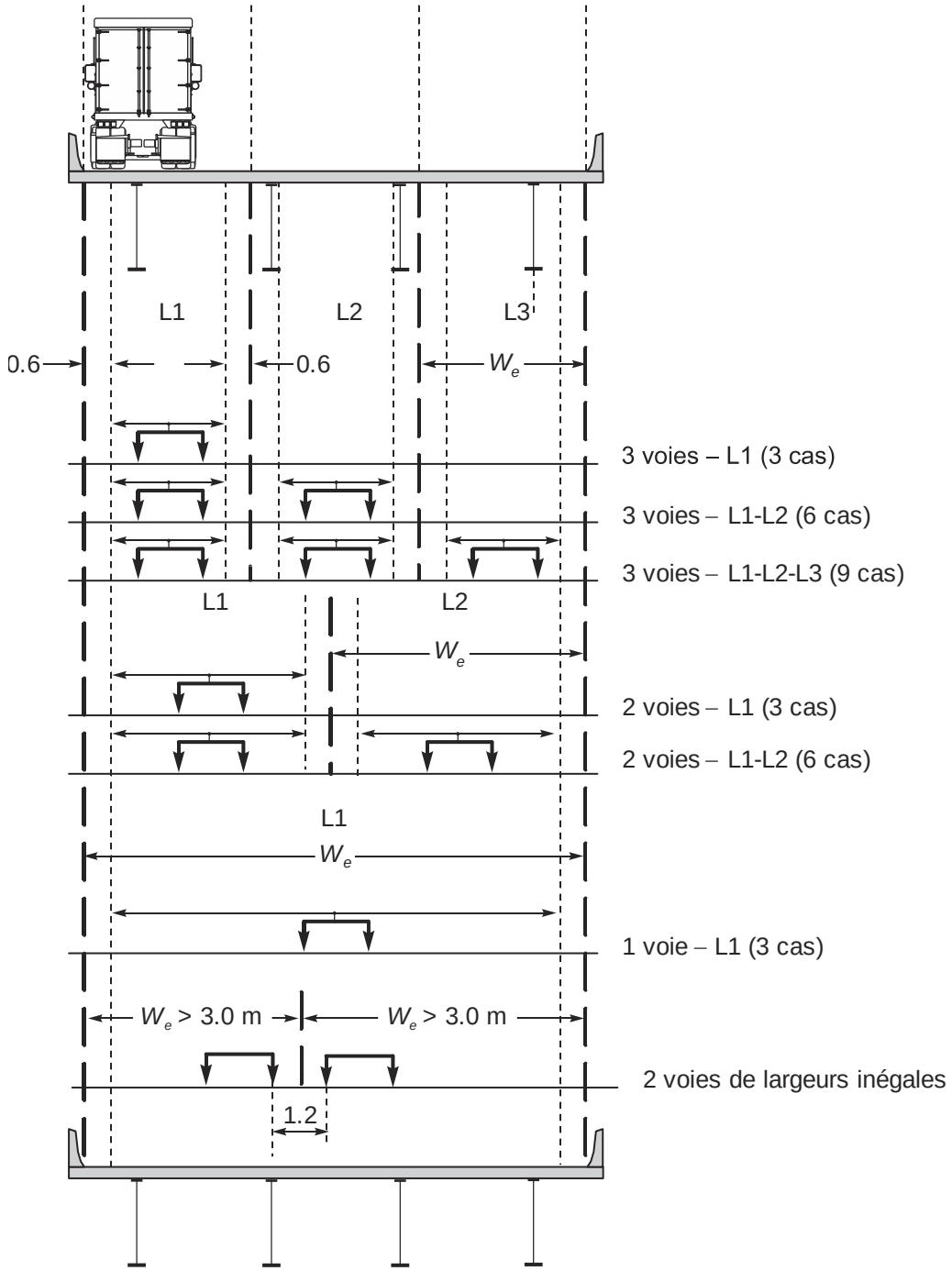


Figure 3.10 Cas de chargements considérés pour un pont à 3 voies (Tiré de Massicotte, 2018)

Lorsqu'il y a la possibilité d'avoir plusieurs voies, toutes les combinaisons de voies sont considérées et le facteur de simultanéité R_L de la norme CSA S6-14 est appliqué en fonction de ces

combinaisons. De plus, tous les nombres de voies sont également considérés jusqu'à la valeur maximale du nombre de voies.

À cause du type de modèle choisi qui sont les grillages, il faut tenir compte du fait que ce type de modèle présente une grande concentration locale de cisaillement autour des appuis. En effet, sur des éléments poutres, un appui induit une grande rigidité à un point et ainsi une grande concentration d'efforts de cisaillement. Afin d'éviter ce phénomène, il a été choisi de prendre l'effort tranchant au deuxième élément longitudinal. De cette façon, l'effort de cisaillement peut se transmettre aux éléments transversaux de dalle et de diaphragme et la distance à l'appui est suffisante pour éviter la concentration de contraintes aux appuis. De plus, le modèle de grillage entraîne également le fait que la charge mobile peut être appliquée directement sur l'appui. Cela cause aussi une grande concentration d'efforts de cisaillement à l'appui qui reflète mal la réalité, car les efforts cisaillement devraient cheminer entre la dalle vers l'appui. Pour simuler le patron de cheminement des efforts vers l'appui, le camion CL-625 ne circulera qu'à partir de la distance à laquelle l'effort de cisaillement atteindra la poutre.

3.10 Programmation du logiciel de création et d'analyse des grillages

3.10.1 Approche choisie

Puisque l'objectif de ce projet consiste à réaliser une étude paramétrique sur des modèles de grillages, une grande quantité de ponts devra être analysée. Un outil informatique a donc été développé à cette fin.

Tout d'abord, le logiciel SAP2000 a été choisi comme logiciel d'analyse, car celui-ci permet une interaction avec d'autres logiciels de programmation tels que Matlab, Python ou Microsoft Visual Basic à travers son interface de programmation (API). Il est donc possible de lancer des commandes sur le logiciel SAP2000 sans passer par l'interface graphique grâce aux logiciels de programmation. L'utilisation de boucles *for* et *while* peuvent être employées pour créer et lancer plusieurs modèles de façon automatisée. De plus, ce logiciel permet d'effectuer des analyses de type charge mobile (*Moving Load*) par ligne d'influence. Avec cette fonctionnalité, les enveloppes d'efforts peuvent être calculées par le logiciel et ensuite utilisées pour tracer les lignes d'influence transversales. Le

guide d'utilisation de SAP2000 est également robuste et les éléments y sont bien expliqués. Les méthodes de résolution ainsi que la théorie derrière les différents types d'éléments sont décrites dans le guide. Cela permet d'avoir un contrôle sur les modèles et les hypothèses à prendre. Un autre avantage de ce logiciel est le fait qu'il permet d'exporter ses résultats sous forme de tables ou de matrices, ce qui facilite le traitement des résultats. Finalement, SAP2000 permet une flexibilité quant à son solveur. Il est possible d'optimiser les calculs en utilisant la fonction *Multi-cœur* de son solveur. Une utilisation plus optimale des CPU (Computer processing unit) est donc possible avec SAP2000.

Pour le logiciel de programmation, le logiciel de programmation Matlab de MathWorks a été choisi. Tout d'abord, ce logiciel est compatible avec l'interface de programmation de SAP2000. Ensuite, ce logiciel de programmation scientifique intègre plusieurs fonctions mathématiques, statistiques et de traitement de données qui seront utiles pour l'étape de post-traitement. Le logiciel possède également des fonctions graphiques avancées. Un autre avantage important avec Matlab est le fait qu'il est possible de travailler en langage objet. Le langage objet offre un avantage quant à la performance des codes, car celui-ci permet de réduire l'utilisation de mémoire vive pour emmagasiner l'information. Finalement, la compatibilité des bases de données de Matlab vers Microsoft Excel offre une grande flexibilité pour le traitement des données.

3.10.2 Création des modèles de grillage

Avec les lignes directrices de modélisation de grillage liées par exemple aux propriétés des membrures, à la géométrie du grillage ou encore à l'application des charges vives, un logiciel a été programmé sur Matlab. Celui-ci est en mesure de générer la géométrie du modèle, de calculer les propriétés des éléments et de créer les différents cas de charges vives du Code CSA S6-14. Trois modules ont donc été développés pour ces étapes.

Le premier module permet tout d'abord de créer la géométrie du grillage à partir de la portée, de la largeur de la travée et du nombre de poutres. Les coordonnées de chaque nœud sont automatiquement calculées et des poutres sont ensuite assignées à chaque paire de nœuds. Un système de numérotation des poutres et des nœuds a été mis en place afin de faciliter le processus d'assignation des propriétés de sections des membrures et l'étape d'extraction des résultats.

Le deuxième module sert à calculer les propriétés de sections pour les différents types de poutres. Le calcul de ces propriétés se fait selon les équations décrites à la section 3.6. Pour chaque poutre, des propriétés sont alors assignées selon la section que celles-ci représentent.

Le troisième module définit tous les cas de charges prescrits dans la norme CSA S6-14. Toutes les combinaisons d'essieux du CL-625 avec le facteur d'amplification dynamique qui y sont associés sont alors définies dans le modèle. Ces combinaisons sont ensuite regroupées sous une classe de camion. Cela permet d'obtenir l'enveloppe la plus critique pour toutes les combinaisons.

Finalement, avec l'interface de programmation (API) du logiciel d'analyse de structures SAP2000 (CSI, 2017), tous les paramètres du grillage sont alors importés dans le logiciel SAP2000. Le logiciel SAP2000 procède ensuite à l'analyse et les résultats sont exportés.

La Figure 3.11 résume le processus d'analyse des données et la Figure 3.12 présente le post-traitement des résultats.

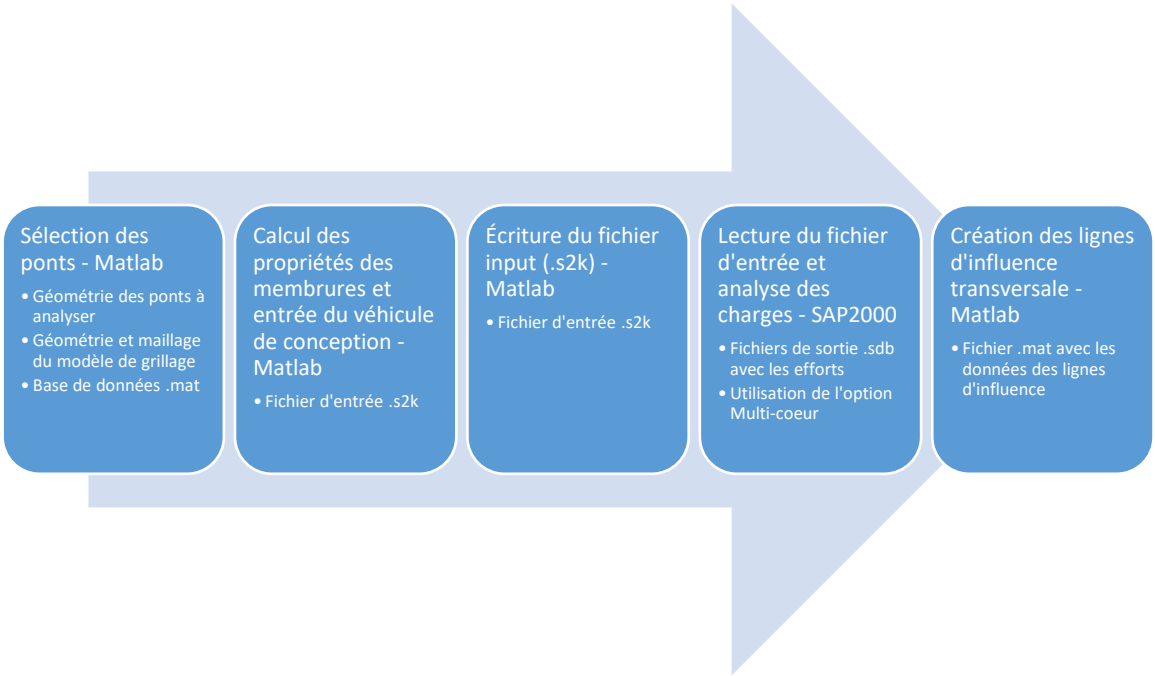


Figure 3.11 Processus de création et d'analyse des ponts

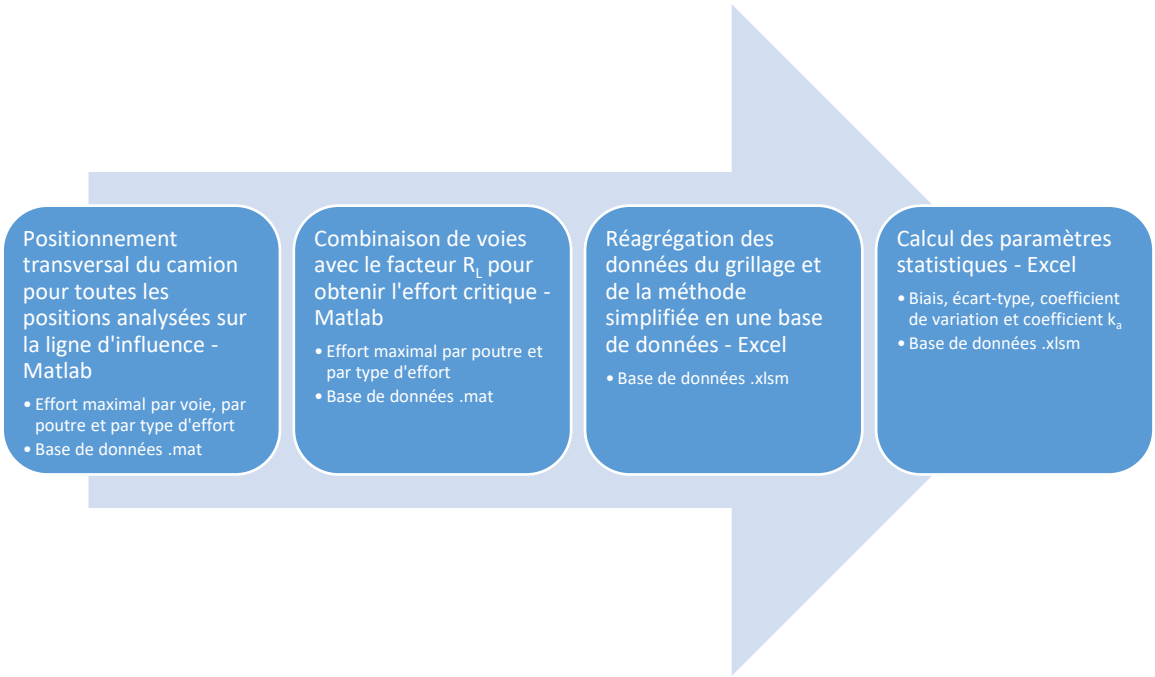


Figure 3.12 Processus de post-traitement des résultats

3.10.3 Paramètres d'analyse

Le logiciel SAP2000 permet d'optimiser plusieurs paramètres de son algorithme d'analyse. Tout d'abord, les points de sortie du logiciel ont été définis à 0.1 m. Cela permet d'obtenir avec précision la valeur d'effort tranchant et de moment fléchissant positif. Un autre paramètre qui a été modifié est la discrétisation de la voie. En effet, le calcul par ligne d'influence nécessite de calculer l'influence à des points précis pour obtenir ses enveloppes d'efforts. SAP2000 définit par défaut ce paramètre comme la valeur minimale entre 3 m et 1/10 de la longueur de la voie. Pour des portées courtes telles que les portées considérées dans l'analyse de 3 m et 5 m, le nombre de points de calcul est insuffisant pour obtenir une bonne précision des enveloppes d'efforts. Il est possible que la position critique longitudinale fixée de 0.46L ne soit considérée avec une discrétisation trop grossière. Une valeur minimale entre 1 m et 1/40 de la longueur de la voie a donc été considérée dans les analyses afin d'obtenir une précision satisfaisante.

3.10.4 Post-traitement des résultats

Puisque seulement des enveloppes brutes sont obtenues du logiciel SAP2000, un module de post-traitement est également implanté dans le logiciel. Tout d'abord, pour chacune des poutres, le logiciel prend les maximums des enveloppes de chaque rangée d'élément longitudinal pour chacun des cas de charge afin de construire les lignes d'influence transversales. Une ligne d'influence transversale est donc tracée pour chacun des types d'effort (effort tranchant, moment fléchissant positif à chaque travée et moment fléchissant négatif à l'appui), et ce, pour chacune des poutres. Ensuite, le module permet de générer pour chacun des modèles les différentes positions que les essieux du camion CL-625 peuvent prendre. Pour un même pont, le Code ne précise qu'un nombre maximal de voies. Par pont, il faut donc considérer tous les nombres de voies jusqu'à la valeur maximale. Ensuite, par voies, trois positions sont possibles : à gauche, au centre et à droite de la voie. Pour chacune des positions d'essieu, il est alors possible de faire une association entre sa position et l'effort causé à l'élément porteur à cette position. À l'aide de la fonction *nchoosek* disponible dans Matlab (Mathworks, 2018) qui détermine toutes les combinaisons possibles entre les différentes voies, il est alors possible de recombiner toutes les possibilités de positions d'essieu entre les voies et de déterminer l'effort total causé pour le type d'effort et pour la poutre analysée en incluant le facteur de simultanéité. Tous les résultats sont alors emmagasinés dans un fichier.mat.

3.10.5 Validation de la méthode de grillage

Puisque la méthode de grillage a été choisie plutôt que la méthode des éléments finis pour cette étude, il est pertinent de pouvoir comparer les deux méthodes. Les détails des modèles d'éléments finis sont présentés à l'Annexe 1. Les résultats sont présentés au Tableau 3-12.

Tableau 3-12 : Comparaison des efforts entre la méthode du grillage et la méthode des éléments finis – Pont à poutres en acier – P80

	Grillage	**CSIBridge**	**Ratio CSI/Grillage**
Moment de flexion – Poutre extérieure	733	681	0.93
Moment de flexion – Poutre intérieure	782	736	0.94
Effort tranchant – Poutre extérieure	241	195	0.81
Effort tranchant – Poutre intérieure	271	258	0.95
Effort tranchant – Poutre intérieure 2	264	256	0.97

Pont à poutres en béton – P85

	Grillage	**CSIBridge**	**Ratio CSI/Grillage**
Moment de flexion – Poutre extérieure	567	567	1.00
Moment de flexion – Poutre intérieure	773	750	0.97
Effort tranchant – Poutre extérieure	151	146	0.97
Effort tranchant – Poutre intérieure	246	244	0.99
Effort tranchant – Poutre intérieure 2	256	240	0.94

Il est possible d'observer que la méthode du grillage donne des résultats satisfaisants. Les résultats sont à la fois tous sécuritaires puisque les efforts obtenus sont supérieurs à ceux de la méthode des éléments finis et relativement précis. Seul l'effort tranchant de la poutre extérieure pour le pont à poutres en acier cause problème. Puisque cette méthode est plus rapide en termes de temps de calcul et qu'elle donne des résultats semblables à la méthode plus raffinée des éléments finis, celle-ci peut être utilisée dans le cadre de cette étude.

CHAPITRE 4 ANALYSE DES PONTS À PORTÉE SIMPLE

4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'évaluation de la précision et de la justesse de la méthode simplifiée pour les ponts à portée simple.

4.2 Étude paramétrique

4.2.1 Résumé des paramètres considérés

Les résultats de l'analyse paramétrique ont été basés sur les ponts synthétiques ayant les paramètres suivants :

- nombre de voies n : 1 à 4;
- portée L, ponts à une voie (n = 1) : 3, 5, 10, 15, 20 et 30 m;
- portée L, ponts de deux à quatre voies (n = 2, 3 et 4) : 3, 5, 10, 20, 30, 40 et 60 m;
- nombre de poutres N : 3, 4, 5, 6 et 8 poutres;
- type de poutres mixtes : en acier en I, en béton précontraint en I, en béton monolithique en T;
- largeur carrossable W_c :
    - 1 voie : 3.3 m, 4.8 m et 5.9 m;
    - 2 voies : 6 m, 8.0 m et 9.9 m;
    - 3 voies : 10 m, 11.75 m, et 13.4 m;
    - 4 voies : 13.5 m, 15.25 m et 16.9 m;
- longueur du porte-à-faux S_c : 0.3S, 0.5S et 0.6S;
- conditions de chargement : 1 à n voies pour l'état limite ultime et l'état limite de service de type 1 (ÉLU et ÉLS-1) et une voie chargée pour l'état limite de fatigue et l'état limite de service de type 2 (ÉLF et ÉLS-2).

Après les filtres, un total de 866 ponts distincts a été analysés dans cette étude paramétrique : 248 ponts à 1 voie et 618 ponts à deux voies et plus.

4.2.2 Traitement statistique des résultats

Pour dresser des tendances liées à chaque paramètre, il est nécessaire d'analyser les résultats selon l'approche utilisée pour le développement des coefficients de pondération des charges dans les codes. En utilisant la nomenclature adoptée par le code CSA-S6, la précision de la méthode d'analyse est identifiée par le paramètre A défini comme le rapport de l'effort réel ($E_{Réel}$) sur celui de la méthode d'analyse choisie, soit la méthode simplifiée dans le cadre de ce travail, (E_{MS}). On a donc :

$$A = \frac{E_{Réel}}{E_{MS}} \tag{4.1}$$

En supposant que l'effort réel est celui obtenu d'une analyse par éléments finis raffinée 3D $\left(E_{EF} \approx E_{Réel}\right)$ et que la méthode du grillage constitue une approximation, on obtient :

$$A = \frac{E_{EF}}{E_{MS}} = \left(\frac{E_{EF}}{E_G}\right)\left(\frac{E_G}{E_{MS}}\right) = A_{EG} A_{GS} \tag{4.2}$$

Le ratio A_{GS} est celui déterminé dans ce travail, identifié comme A dans ce qui suit pour alléger la notation. Pour chacun des types d'efforts considérés, la comparaison statistique des résultats s'exprime à l'aide de deux paramètres : le biais et le coefficient de variation. Le biais (δ_A) est la moyenne de A alors que le coefficient de variation (V_A), qui est égal au rapport de l'écart type de A (σ_A) sur la moyenne de A ($\bar{A}$), est défini comme suit :

$$\delta_A = \overline{A} = \overline{\frac{E_G}{E_{MS}}} \tag{4.3}$$

$$V_A = \frac{\sigma_A}{\delta_A} \tag{4.4}$$

Les biais et coefficients de variation de chacun des types d'efforts seront analysés. Ces valeurs permettent de caractériser la justesse et la précision de la méthode simplifiée. De plus, ces paramètres sont également liés à la fiabilité de la méthode de calcul. Pour chacun des efforts, deux groupes d'analyses sont réalisées : à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de fatigue (ÉLF) sachant que selon le code CSA-S6 les mêmes conditions de chargement prévalent pour

respectivement l'état limite de service applicable au calcul des contraintes ($F_{T_ÉLU} = F_{T_ÉLS1}$), et l'état limite de calcul des flèches ($F_{T_ÉLF} = F_{T_ÉLS2}$).

On ne peut garantir que toutes les valeurs de la méthode simplifiée se soient sécuritaires. Toutefois, il est courant que l'on établisse les équations de calcul de sorte qu'une large portion le soit. Le paramètre qui permet d'établir le pourcentage de valeurs qui se situent du côté sécuritaire est k_A défini comme suit :

$$k_A = \frac{1-\delta_A}{\sigma_A} \tag{4.5}$$

La valeur de k_A donne le nombre d'écart type entre la moyenne et la condition correspondant à l'égalité entre la méthode simplifiée et la méthode du grillage. Typiquement une valeur de 5% est adoptée en structures, ce qui correspond dans le cas d'une loi normale à une valeur de k_A égale à 1.65.

4.3 Moment fléchissant à l'ÉLU et ÉLS-1

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour les moments fléchissants à l'état limite ultime (ÉLU) et l'état limite de service 1 (ÉLS-1).

4.3.1 Ensemble des résultats

La comparaison est illustrée dans la Figure 4.1 qui oppose directement les efforts issus de la méthode raffinée d'analyse et ceux issus de la méthode du code S6-14 pour l'ensemble des ponts analysés dans le cadre de la présente étude paramétrique, pour les poutres intérieures et extérieures.

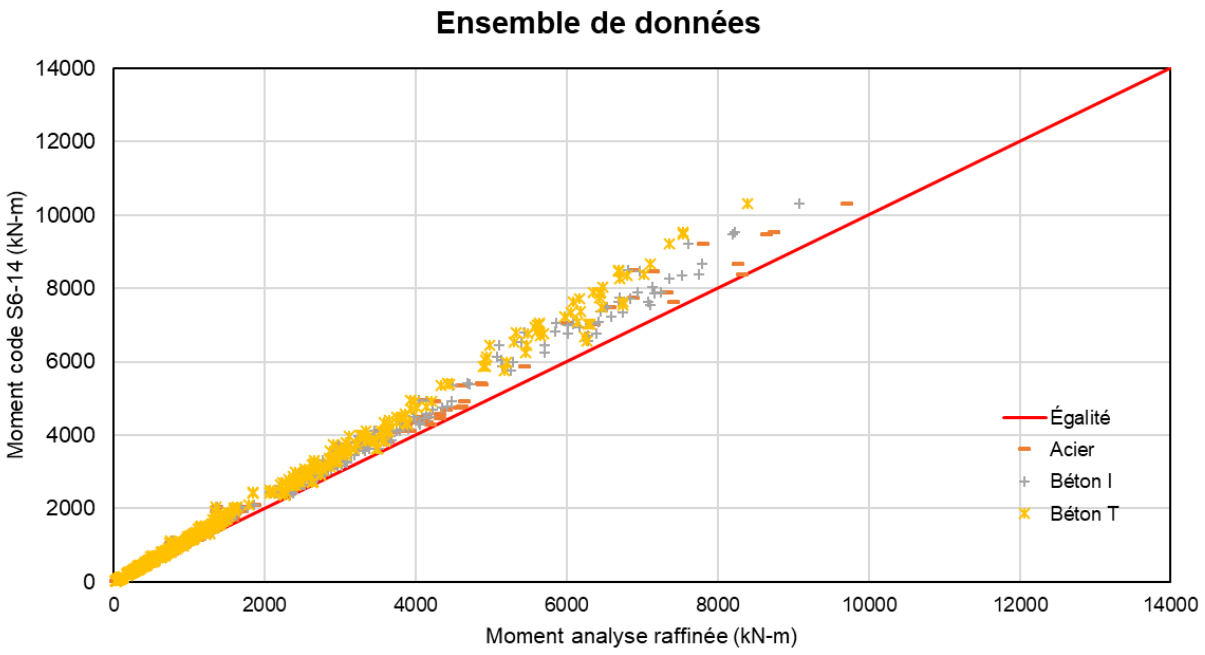


Figure 4.1 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU/ELS-1 – Portées simples – Ensemble des données

Sur la Figure 4.1, il est possible d'observer qu'il y a peu de valeurs qui sont non-sécuritaires. En effet, la grande majorité des points sont au-dessus de ligne qui désigne l'égalité entre le moment fléchissant trouvé par la méthode du grillage et celle par la méthode simplifiée. Cela indique donc que les efforts de flexion issus de la méthode simplifiée sont généralement supérieurs à ceux issus de la méthode raffinée. La méthode simplifiée du code S6-14 est donc sécuritaire. Ce constat peut être établi pour les trois types de ponts analysés. Cependant, il est également possible de constater que la méthode est trop conservatrice pour plusieurs cas. En effet, il y a plusieurs ponts pour lesquels les efforts de flexion de la méthode simplifiée sont grandement supérieurs à ceux du grillage. Pour les ponts avec des poutres en béton, en I et en T, la majorité des points pour ces ponts est située plus haut que la droite qui désigne l'égalité. De plus, le fuseau des résultats est diffus et il s'écarte de l'égalité, particulièrement pour les valeurs de moments les plus élevées, donc pour les plus longues portées. Pour les ponts avec des poutres en acier, les résultats sont généralement proches de l'égalité ce qui est attendu car les équations du code S6 ont été essentiellement obtenues pour des ponts en acier (Smith 1996). Néanmoins, ces ponts présentent également quelques points

bien au-dessus de l'égalité, ce qui indique que cette catégorie de ponts inclut également des cas trop conservateurs.

Le Tableau 4-1 présente les résultats statistiques selon la position des poutres (intérieure ou extérieure). Cela permet de mesurer l'impact de la position des poutres sur la qualité des prédictions du Code.

Tableau 4-1 Résultats statistiques pour la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Type de poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.907	0.044	0.049	2.113
	Intérieure	0.901	0.076	0.084	1.302
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.898	0.032	0.035	3.187
	Intérieure	0.892	0.056	0.063	1.928
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.854	0.039	0.045	3.743
	Intérieure	0.878	0.067	0.076	1.821

Les résultats montrent que les efforts de flexion sont correctement estimés par la méthode simplifiée. En effet, tel que voulu, la méthode simplifiée donne en moyenne des résultats sécuritaire. Les biais, autant pour les poutres extérieures que les poutres intérieures, sont inférieurs à 1. Les résultats ne sont également pas trop conservateurs, car les biais sont supérieurs à 0.85. De plus, le coefficient de variation est faible, ce qui signifie que la méthode simplifiée est consistante. Par contre, les résultats diffèrent légèrement selon les différents types de poutres. Le cas le plus significatif est la différence entre le biais pour les poutres extérieures des ponts à poutres en acier et celui des ponts à poutres en béton T. L'écart entre les deux valeurs est de 5.8%. La dispersion des prédictions de la méthode simplifiée varie également entre les types de ponts. Il y a un écart entre les coefficients de variation des ponts à poutres en acier et ceux à poutres en béton I. Cette différence est présente pour les poutres extérieures et intérieures. Cependant, tel que mentionné au Chapitre 3, les ponts à poutres en béton I ne comportent pas de résultats pour les portées de 3 m et 5 m. Les ponts à poutres en acier présentent les résultats avec le plus de dispersion. De plus, la différence de biais entre les poutres extérieures et intérieures pour les poutres en béton T montre qu'il pourrait être avantageux de modifier les équations afin de ramener les biais à des valeurs similaires pour les poutres extérieures et intérieures. La différence entre les biais pour les ponts à poutres en béton T se situe à 0.024 ce qui représente un écart de 2.7%. Pour les poutres en acier,

les biais sont presque identiques et ceux-ci ne divergent que de 0,6% entre les positions des poutres. Cela peut être expliqué par la différence entre la rigidité en torsion de la dalle et celle des poutres. Cette différence est la plus faible pour les poutres en acier, car les équations de la méthode simplifiée du Code CSA S6-14 ont été principalement obtenues pour ce type de poutres. La norme AASHTO, tel que mentionné au Chapitre 2, propose entre autres un paramètre pour considérer la différence de rigidité entre la dalle et les poutres afin de considérer ce phénomène.

Un autre paramètre qui possède une influence sur le calcul du facteur d'essieu est le nombre de voies. En effet, dépendamment du nombre de voies, différentes équations sont établies pour le calcul des paramètres D_T et λ du la méthode simplifiée du code. La Figure 4.2 présente la comparaison des efforts de flexion obtenus par les 2 méthodes selon le nombre de voies.

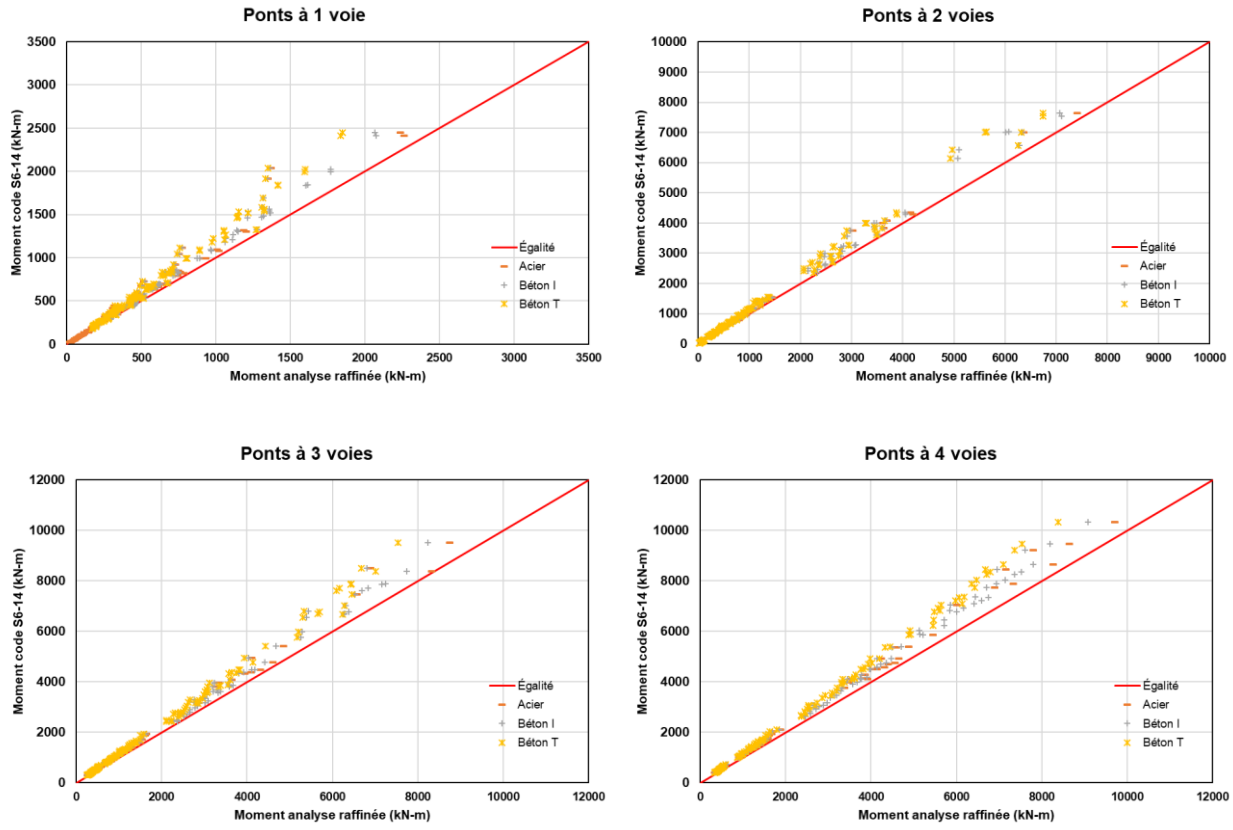


Figure 4.2 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLU/ÉLS-1 – Étude par nombre de voies – Portées simples

Sur la Figure 4.2, il est possible d'observer que, pour un nombre de voies de 1 à 4, les valeurs de moments fléchissants obtenus par la méthode simplifiée du Code CSA S6-14 sont généralement sécuritaires. Comme le montre également l'ensemble des données statistiques présenté au Tableau 4-2, la méthode simplifiée est adéquate pour évaluer le moment fléchissant pour un nombre de voies de 1 à 4 pour des ponts à poutres en acier, en béton précontraint en I et en béton en T. Cependant, la méthode est trop conservatrice pour les ponts ayant trois voies et plus, notamment pour les ponts avec des poutres en béton I et en béton T.

Tableau 4-2 Comparaison des statistiques pour la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Étude par nombre de voies – Portées simples

	Types de poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.899	0.049	0.055	2.061
		Intérieure	0.929	0.110	0.118	0.645
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.885	0.021	0.024	5.476
		Intérieure	0.893	0.083	0.093	1.289
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.828	0.023	0.028	7.478
		Intérieure	0.860	0.078	0.091	1.795
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.922	0.046	0.049	1.696
		Intérieure	0.904	0.052	0.058	1.846
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.911	0.039	0.043	2.282
		Intérieure	0.905	0.047	0.052	2.021
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.875	0.045	0.052	2.778
		Intérieure	0.909	0.064	0.070	1.422
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.899	0.040	0.045	2.525
		Intérieure	0.877	0.037	0.042	3.324
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.903	0.031	0.034	3.129
		Intérieure	0.890	0.039	0.044	2.821
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.855	0.026	0.031	5.577
		Intérieure	0.859	0.036	0.042	3.917
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.896	0.041	0.046	2.537
		Intérieure	0.871	0.030	0.034	4.300
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.894	0.025	0.028	4.240
		Intérieure	0.879	0.028	0.032	4.321
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.847	0.024	0.028	6.375
		Intérieure	0.844	0.027	0.032	5.778

Pour les trois types de ponts, il est possible de voir pour les ponts comportant deux voies et plus que le biais diminue avec le nombre de voies. Cela s'explique par le fait que le paramètre du nombre

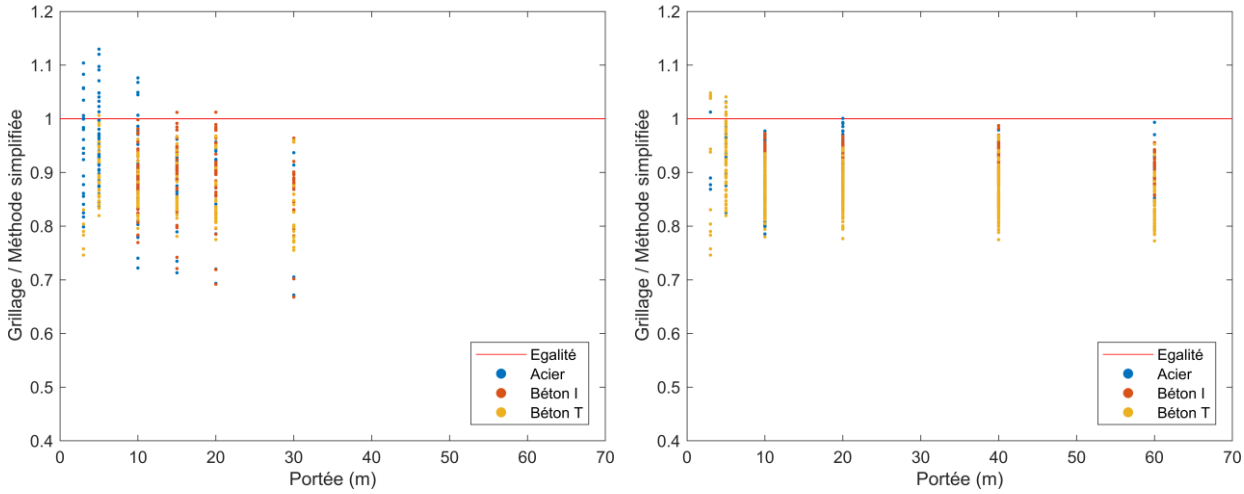
de voies a une incidence sur le nombre de camions qu'il est possible de placer sur le pont ainsi que sur les largeurs des ponts considérés. Le code CSA S6-14 spécifie une seule équation pour évaluer la distribution des efforts de flexion entre les éléments porteurs intérieurs pour tous les ponts ayant un nombre de voies supérieur à deux. Cependant, la distribution est différente pour les ponts à deux, trois et quatre voies comme en témoignent les différences au niveau du biais. Par contre, pour les ponts à trois et quatre voies, le coefficient de variation est relativement constant. Avec les résultats, il est donc possible d'observer que le nombre de voies influence la distribution des efforts. Il serait donc intéressant d'ajouter des équations dans le Code CSA S6-14 pour prendre en compte cet effet. Une équation similaire à celle déjà incluse dans la norme pourrait être développée pour améliorer la précision des prédictions des poutres intérieures pour les ponts à trois voies et plus. Pour les poutres extérieures, le Code présente une équation pour les ponts à trois voies et plus en plus d'une équation pour les ponts à deux voies. Cela semble approprié, car les valeurs sont similaires pour les poutres extérieures des ponts à trois et quatre voies. Il n'est donc pas nécessaire d'ajouter une autre équation pour les poutres extérieures.

4.3.2 Analyse de l'effet des paramètres géométriques

Cette section présente l'effet des différents paramètres étudiés sur les valeurs du moment de flexion des portées simples de la méthode simplifiée à l'état limite ultime (ÉLU) et l'état limite de service 1 (ÉLS-1).

4.3.2.1 Effet de la portée

La portée L_e est un paramètre important dans la méthode simplifiée car il intervient dans plusieurs coefficients dans le calcul du facteur d'essieu. L'influence de ce paramètre est présentée sur la Figure 4.3 .



1 voie 2 voies et plus

Figure 4.3 Influence de la portée pour le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – Ensemble des données

Il est d'abord possible d'observer que la méthode simplifiée est généralement sécuritaire pour toutes les portées. Pour les ponts avec des poutres en béton en I et en T, la méthode simplifiée donne des efforts de flexion supérieurs à la méthode raffinée dans la très grande majorité des cas. Seules les portées courtes démontrent certains cas où les valeurs sont supérieures à 1. Ces cas sont principalement présents pour les portées de 3 m, 5 m et 10 m. Pour les portées de 10 m, il y a des cas non-sécuritaires seulement pour les ponts à une voie. Pour les ponts à deux voies et plus, la méthode est sécuritaire. Tel qu'illustré au Tableau 4-2, les poutres intérieures des ponts en acier à une voie présentent les biais et les coefficients de variation les plus élevés, notamment pour les portées courtes des ponts à une voie présentés à la Figure 4.3. Cependant, la méthode simplifiée est généralement appropriée avec des coefficients de variation très faibles et des biais près de 1. Pour caractériser l'échantillon, les Tableau 4-3 et Tableau 4-4 présente les paramètres statistiques associés à chaque type de poutres.

Tableau 4-3 Influence de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3 m	0.94	0.086	0.092	0.698
5 m	0.95	0.065	0.069	0.769
10 m	0.90	0.071	0.079	1.408
15 m	0.90	0.062	0.069	1.613
20 m	0.88	0.076	0.086	1.579
30 m	0.81	0.119	0.148	1.597

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.89	0.051	0.058	2.157
15 m	0.90	0.059	0.066	1.695
20 m	0.90	0.064	0.071	1.563
30 m	0.86	0.067	0.078	2.090

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3 m	0.86	0.050	0.059	2.800
5 m	0.85	0.056	0.065	2.679
10 m	0.85	0.056	0.065	2.679
15 m	0.85	0.056	0.065	2.679
20 m	0.84	0.060	0.072	2.667
30 m	0.80	0.066	0.082	3.030

Tableau 4-4 Influence de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3 m	0.91	0.059	0.064	1.525
5 m	0.94	0.050	0.053	1.200
10 m	0.87	0.044	0.050	2.955
20 m	0.91	0.033	0.037	2.727
40 m	0.91	0.043	0.047	2.093
60 m	0.90	0.051	0.056	1.961

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.90	0.039	0.044	2.564
20 m	0.90	0.032	0.035	3.125
40 m	0.91	0.039	0.044	2.308
60 m	0.88	0.039	0.045	3.077

	Ponts avec poutres en béton enT			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3 m	0.90	0.119	0.132	0.840
5 m	0.93	0.054	0.059	1.296
10 m	0.86	0.035	0.040	4.000
20 m	0.87	0.031	0.036	4.194
40 m	0.86	0.041	0.047	3.415
60 m	0.83	0.040	0.049	4.250

Pour les portées courtes, la méthode simplifiée présente un biais plus élevé alors que pour les portées de 3 m, le coefficient de variation est très élevé pour les trois types de ponts. Pour les portées égales et supérieures à 10 m, la méthode simplifiée est adéquate car les valeurs prédites par

la méthode du code CSA S6-14 sont similaires à celles du grillage et leur dispersion est moins grande. Les biais et les coefficients de variation plus élevés pour des portées courtes démontrent que les équations de la méthode sont inconsistantes.

4.3.2.2 Effet de l'espacement des poutres

L'espacement des poutres est un paramètre qui est considéré dans le calcul du facteur d'essieu. Il intervient notamment directement dans le calcul de F_T. La Figure 4.4 présente l'influence de l'espacement des poutres sur les valeurs les résultats d'analyse.

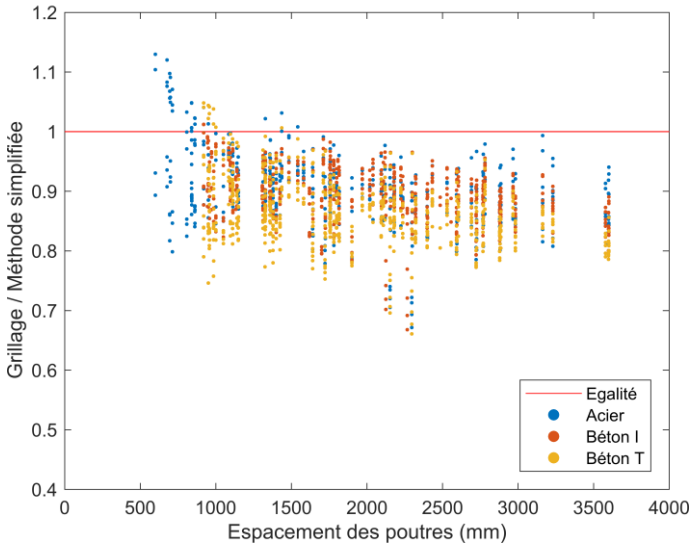


Figure 4.4 Influence de l'espacement des poutres pour le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée simple – Ensemble des données

En général, la méthode simplifiée donne des résultats conservateurs. Pour des poutres rapprochées, la méthode simplifiée de la norme CSA S6-14 donne des résultats peu satisfaisants. En effet, les points sont très dispersés et il y a des cas de dépassement de la limite de 1 du rapport grillage sur méthode simplifiée pour le cas des ponts avec poutres en acier. Cet effet est présent pour des espacements entre 0.6 et 1.2 m. Pour des espacements supérieurs, les résultats de la méthode simplifiée sont plus compacts. Les résultats s'améliorent ensuite à mesure que l'espacement des poutres augmente. La répartition des efforts entre les méthodes se rapproche donc avec l'augmentation de l'espacement. Le Tableau 4-5 met en relation la variation de l'espacement des poutres avec les paramètres statistiques.

Tableau 4-5 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques du moment à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en acier**			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
0.6 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.95	0.083	0.088	0.602
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.92	0.041	0.044	1.951
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.90	0.052	0.058	1.923
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.87	0.062	0.071	2.097
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.88	0.045	0.051	2.667
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.89	0.053	0.059	2.075
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.87	0.036	0.041	3.611

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en béton I**			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.92	0.053	0.057	1.509
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.91	0.037	0.041	2.432
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.90	0.046	0.051	2.174
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.89	0.053	0.060	2.075
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.88	0.035	0.039	3.429
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.88	0.025	0.028	4.800
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.85	0.024	0.029	6.250

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en béton T**			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.89	0.077	0.087	1.429
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.89	0.051	0.057	2.157
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.86	0.048	0.056	2.917
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.85	0.052	0.061	2.885
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.85	0.036	0.042	4.167
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.85	0.017	0.020	8.824
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.81	0.017	0.022	11.176

Les tendances sont donc confirmées avec les résultats du Tableau 4-5 et de la Figure 4.1. Pour les espacements de poutres inférieurs à 1.0 m, le coefficient de variation est élevé pour les ponts à poutres en acier et à poutres en béton T. Pour les poutres en béton I, la tendance est différente, car ces ponts ne comportent pas de portées de 3 et 5 m.

4.3.2.3 Effet de la largeur du porte-à-faux sur le moment de la poutre extérieure

Présentement dans la norme CSA S6-14, un facteur est proposé pour prendre en considération l'amplification de la flexion dans la poutre extérieure en fonction de la largeur du porte-à-faux (S_c). Le facteur qui permet de considérer cet effet est γ_c. Deux plages de valeurs en fonction de la largeur du rapport entre la largeur du porte-à-faux et l'espacement des poutres définissent ce paramètre :

$$\gamma_c = 1.0 \qquad \text{pour } S_c \leq 0.5S \tag{4.5}$$

$$\gamma_c = 1.25 - 0.5\left(\frac{S_c}{S}\right) \leq 1.0 \qquad \text{pour } 0.5S < S_c \leq 0.6S \tag{4.6}$$

Pour la première plage, la valeur est constante, car le paramètre γ_c prend la valeur de 1 peu importe la largeur du porte-à-faux. Il est donc supposé que la répartition des efforts de flexion sur la poutre extérieure soit identique pour toutes largeurs de porte-à-faux inférieures ou égales à 0.5S, ce qui conduit à des résultats conservateurs dans le cas courant où le porte-à-faux a une largeur moindre.

L'analyse paramétrique effectuée dans le cadre de ce projet couvre trois types de longueurs de porte-à-faux afin d'étudier la possibilité d'étendre la considération de la largeur du porte-à-faux pour les valeurs moindres : 0.3S, 0.5S et 0.6S. Cependant, le cas des porte-à-faux de 0.3S est traité séparément car il vient biaiser les statistiques, la méthode simplifiée du Code n'ayant pas été développée pour prendre en considération cette condition. Toutefois, dans la perspective d'améliorer la méthode simplifiée, il est intéressant de voir l'effet de ce paramètre. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.5 pour les poutres en acier.

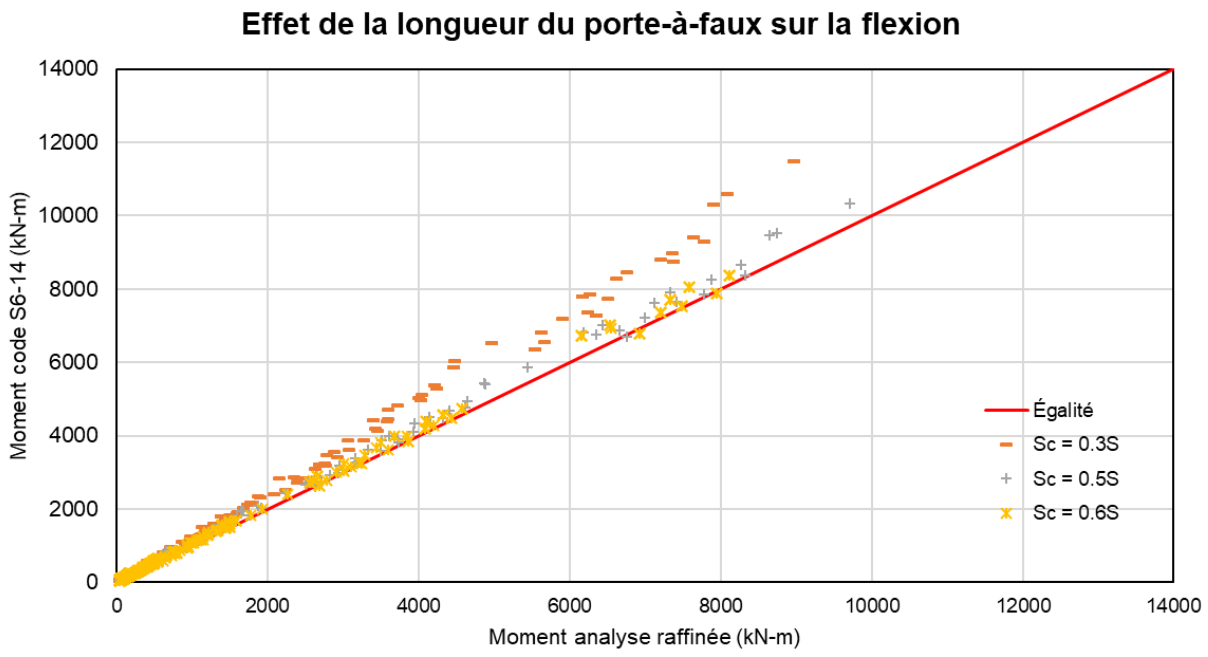


Figure 4.5 Effet de la largeur du porte-à-faux pour les poutres extérieures des ponts avec poutres en acier à l'ÉLU/ÉLS-1 – Flexion – Portées simples

Il est d'abord possible d'observer que pour des valeurs de S_c de 0.5S et de 0.6S, les efforts sont très similaires entre les deux méthodes. Ces deux valeurs de S_c partagent également les mêmes tendances. Cependant, pour des valeurs de porte-à-faux de 0.3S, la méthode simplifiée donne des résultats beaucoup plus élevés que la méthode raffinée, tel qu'anticipé. Les résultats sont donc trop conservateurs dû au fait que la méthode raffinée est affectée par la variation de la largeur du porte-à-faux pour des valeurs inférieures à 0.5S tandis que la norme suppose une même valeur de γ_c pour celles-ci. Dans les méthodes raffinées, plus la largeur du porte-à-faux est faible, plus l'effort de flexion dans la poutre extérieure diminue. Les biais pour les trois largeurs de porte-à-faux sont présentés au Tableau 4-6.

Tableau 4-6 Biais du moment pour la poutre extérieure à l'ÉLU/ÉLS-1 en fonction de la largeur du porte-à-faux – Portées simples

S_c	δ_{MU}
0.3*S*	0.815
0.5*S*	0.908
0.6*S*	0.915

Comme ce qui est attendu, les biais pour les porte-à-faux de 0.5S et de 0.6S sont très similaires avec un écart de 0.77%. De plus, les biais sont près de 1, alors les équations prédisent bien les efforts. Pour les porte-à-faux de 0.3S, le biais est quant à lui différent des deux autres valeurs. De plus, le biais de 0.815 confirme que la norme surestime les efforts de flexion dans les poutres extérieures pour les porte-à-faux courts. Puisque le Code n'avait pas été développé pour considérer ce paramètre, il serait intéressant de calibrer ce paramètre afin de réduire la surestimation des efforts de flexion sur la poutre extérieure.

4.3.3 Analyse des valeurs maximales

Pour la conception des ponts avec la méthode simplifiée, des poutres de même dimension doivent être utilisées pour l'ensemble du tablier. Ainsi, la distinction entre la poutre intérieure et la poutre extérieure au niveau de l'analyse ne s'applique pas à l'étape de conception. Pour cela, une analyse est faite seulement avec les valeurs extrêmes pour chaque modèle de pont, c'est-à-dire en retenant la valeur maximale de l'effort entre la poutre intérieure et la poutre extérieure. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.6 pour les ponts ayant des porte-à-faux de 0.5 ou 0.6 *S*.

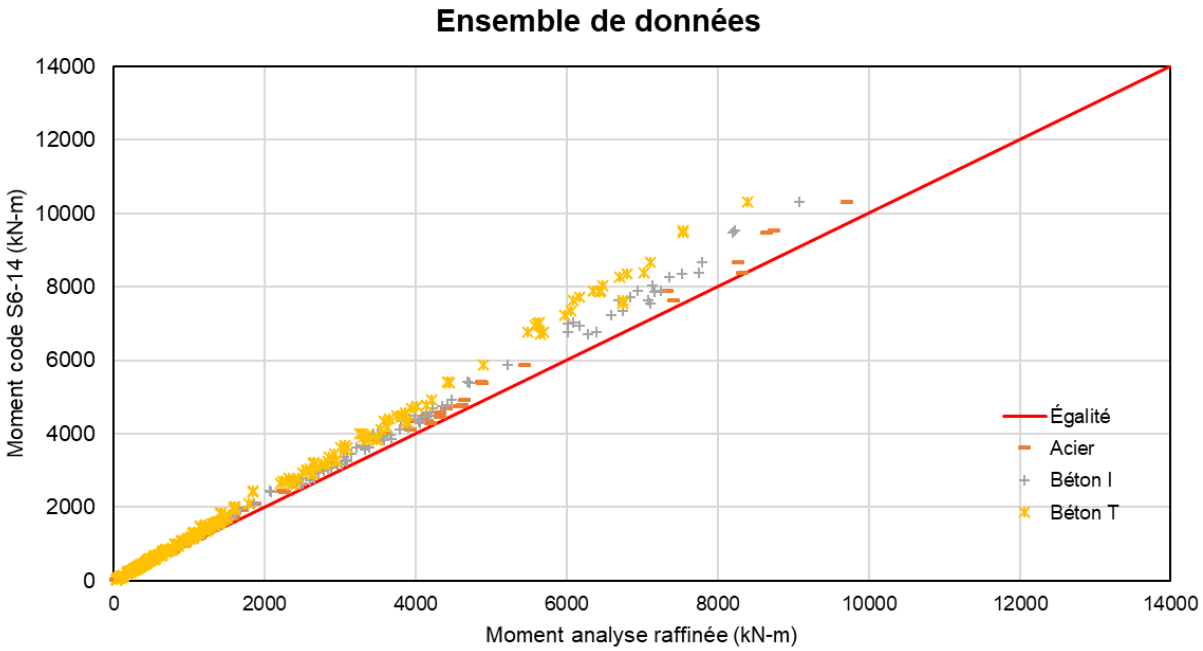


Figure 4.6 Comparaison des valeurs maximales du moment à l'ÉLU/ÉLS-1 – Ensemble des données – Portées simples

Il est possible de voir que les tendances sont similaires lorsqu'on se penche sur l'échantillon au complet. En effet, les résultats sont encore sécuritaires et les ponts en béton en T sont toujours un peu plus conservateurs que les autres types de poutres. Le Tableau 4-7 présente l'effet de prendre en compte les efforts maximaux sur les paramètres statistiques.

Tableau 4-7 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.909	0.044	0.048	2.068
Poutres en béton I	**Max**	0.900	0.029	0.033	3.448
Poutres en béton T	**Max**	0.860	0.040	0.046	3.500

Tout d'abord, il est possible de voir que le biais pour les valeurs extrêmes des ponts à poutres en acier est légèrement supérieur aux moyennes de la poutre intérieure et extérieure du Tableau 4-1. Cependant, le coefficient de variation est inférieur dans le cas présent.

Pour les ponts à poutres en béton en I et en T, le biais des valeurs maximales se situe entre celui de la poutre intérieure et celui de la poutre extérieure. Cette valeur se situe également à mi-chemin entre le biais de la poutre intérieure et celui de la poutre extérieure. Ceci est dû au fait que pour les ponts considérés, les cas critiques qui gouvernent la flexion sont bien répartis entre la poutre intérieure et la poutre extérieure. Le Tableau 4-8 illustre la répartition des cas où chacune des poutres gouverne la conception.

Tableau 4-8 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Flexion – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Poutres en acier	**Extérieure**	165	256	64%
	Intérieure	91		36%
Poutres en béton I	**Extérieure**	221	285	77%
	Intérieure	64		23%
Poutres en béton T	**Extérieure**	226	325	70%
	Intérieure	99		30%

À la lumière des résultats, on retrouve la même tendance pour les trois types de ponts considérés. Pour tous les cas, c'est la poutre extérieure qui gouverne. Cela peut donc expliquer la raison pour laquelle le biais avec les efforts maximaux se situe plus près de celui de la poutre extérieure que de celui de la poutre intérieure. De plus, en considérant cet échantillon, le coefficient de variation est réduit par rapport au cas précédent. Les résultats des analyses sont donc plus compacts et consistants en plus de prédire avec plus de justesse les efforts de flexion. Selon ces résultats, il ne semble donc pas nécessaire d'apporter des modifications significatives à la méthode simplifiée de la norme CSA S6-14 pour l'analyse des ponts à la flexion au niveau de la conception où la distinction entre les différentes positions intérieur-extérieur des poutres est moins importante. Cependant, pour l'évaluation, puisque les poutres peuvent être distinctes, la méthode doit être le plus exacte possible pour toutes les deux positions de poutre.

4.4 Effort tranchant à l'ÉLU et ÉLS-1

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour l'effort tranchant à l'état limite ultime (ÉLU) et l'état limite de service 1 (ÉLS-1).

4.4.1 Ensemble des résultats

Comme pour la flexion, l'évaluation de la précision de la méthode simplifiée d'analyse du Code S6-14 pour le calcul des efforts de cisaillement est faite par une comparaison entre les efforts

obtenus par cette méthode et ceux obtenus par une méthode raffinée. Les résultats pour l'ensemble des données sont présentés sur la Figure 4.7.

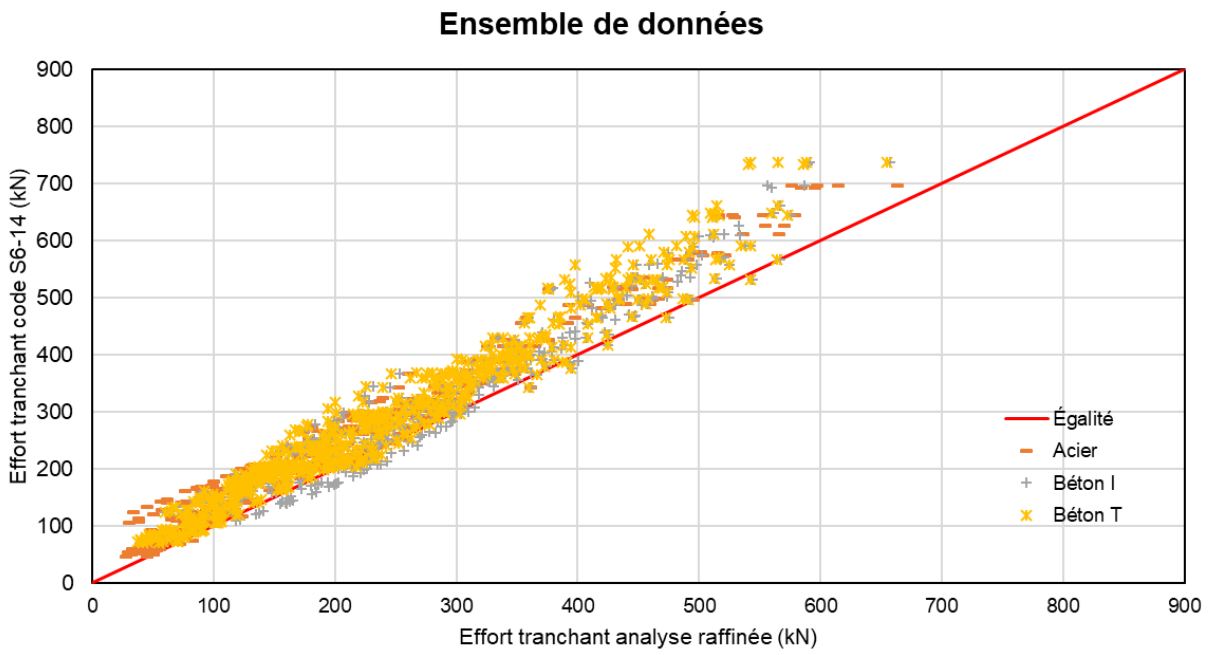


Figure 4.7 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Portées simples – Ensemble des données

Sur la Figure 4.7, il est d'abord possible d'observer que la méthode simplifiée donne généralement des résultats conservateurs pour le cisaillement. Elle est donc généralement sécuritaire. Cependant, il y a un nombre important de cas spécifiques où la méthode simplifiée n'est pas sécuritaire. Particulièrement pour les ponts à poutres en béton T, il y a un groupe de ponts pour lequel la méthode d'analyse raffinée est plus critique que la méthode simplifiée. Les plus importants cas de dépassement se produisent pour des efforts tranchants entre 100 kN et 400 kN. Il est donc pertinent de pouvoir lier les caractéristiques qui peuvent causer ces dépassements. Les paramètres statistiques associés aux résultats pour le cisaillement (voir la section précédent) sont présentés au Tableau 4-9. Dans ce contexte, les efforts tranchants sont sous-estimés pour les poutres extérieures tandis que pour les poutres intérieures, la marge de sécurité est plus faible en moyenne.

Tableau 4-9 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.744	0.135	0.181	1.896
	Intérieure	0.858	0.094	0.109	1.511
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.828	0.102	0.123	1.686
	Intérieure	0.914	0.129	0.141	0.667
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.811	0.110	0.136	1.718
	Intérieure	0.836	0.103	0.123	1.592

Contrairement à la flexion, pour les trois types de poutres, il y a une grande différence entre le biais pour les poutres extérieures et celui des poutres intérieures. Cette différence va jusqu'à 13% pour les poutres en acier. Pour les autres matériaux, elle est respectivement de 9% pour les poutres en béton I et de 3% pour les poutres en béton T. Une raison expliquant cette tendance est le fait que la norme CSA S6-14 ne distingue pas la poutre intérieure de la poutre extérieure pour le calcul du facteur d'essieu pour le cisaillement. Le même facteur d'essieu est appliqué dans les deux cas tandis que pour la flexion, il y a une distinction entre les poutres intérieures et les poutres extérieures. À la lumière de ces résultats, il serait avantageux de séparer les poutres extérieures et les poutres intérieures dans le calcul du facteur de répartition pour le cisaillement également, particulièrement pour l'évaluation. De plus, il est à constater que le coefficient de variation est élevé pour les poutres extérieures et donc qu'il y a une grande variabilité dans la précision des prédictions. Un faible coefficient de variation des ratios est souhaitable et dans le cas présent ce critère n'est pas atteint.

Le nombre de voies est une autre caractéristique des ponts qui a directement un impact sur le facteur d'essieu. En effet, le calcul du paramètre D_T ne dépend que du nombre de voies. Il prend une valeur différente pour les ponts à une voie et ceux à deux voies et plus. La Figure 4.8 présente l'influence de ce paramètre sur les valeurs d'efforts issus des deux méthodes.

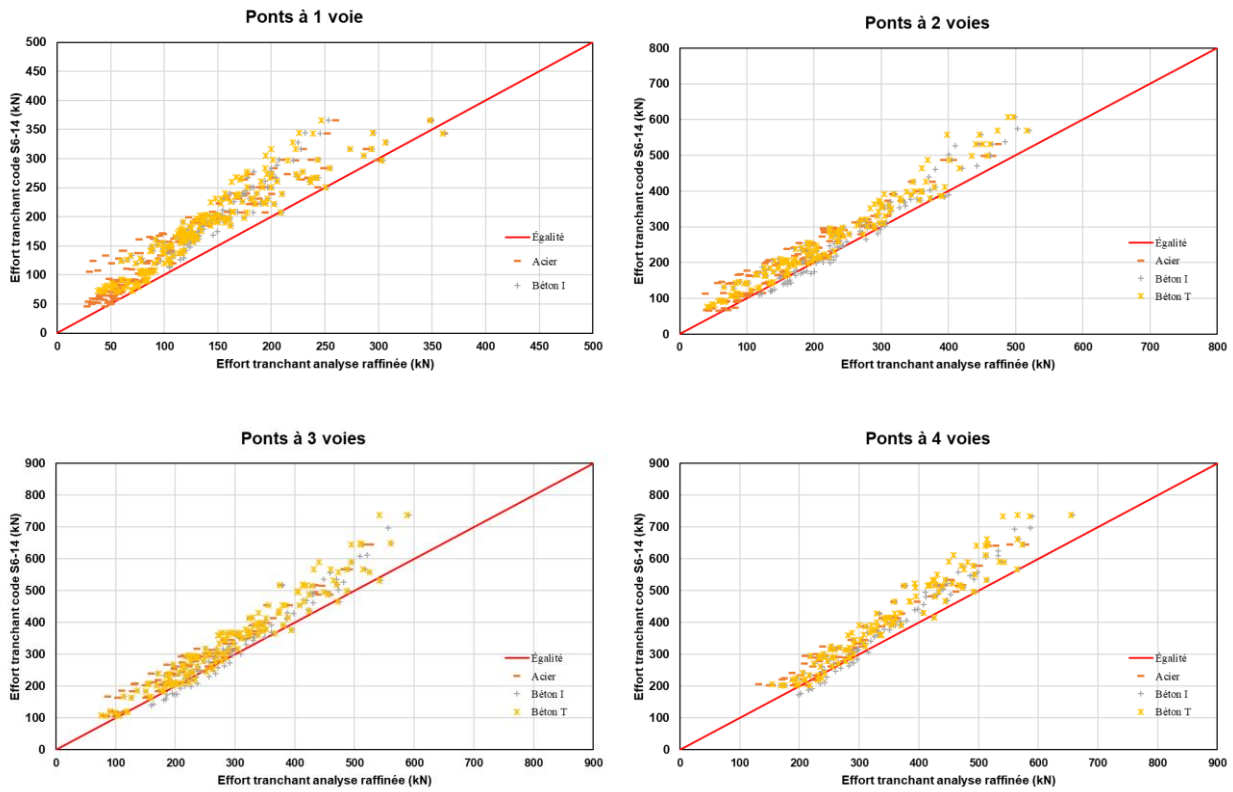


Figure 4.8 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Étude par nombre de voies – Portées simples

La Figure 4.8 montre que la méthode simplifiée donne des tendances différentes selon le nombre de voies présentes sur le pont. En effet, pour les ponts à une voie, la méthode est généralement trop sécuritaire. En excluant un petit groupe de ponts avec des poutres en béton T, la majorité des points se situent bien au-delà de la ligne d'égalité. Aussi, plus les efforts sont élevés, plus le fuseau de points a tendance à se décoller de l'égalité entre les deux méthodes. Pour les ponts à plus de deux voies, il est possible d'observer que la tendance est similaire. En effet, les valeurs calculées par les deux méthodes sont plus près l'une de l'autre. Cependant, pour tous les types de ponts, il y a un nombre important de ponts qui sont non-sécuritaires. Pour les valeurs moyennes de cisaillement, la méthode simplifiée semble avoir tendance à sous-estimer les efforts. Une estimation non conservatrice n'est pas souhaitable pour une méthode simplifiée. Pour vérifier ces tendances, le Tableau 4-10 montre l'effet du nombre de voies sur les paramètres statistiques.

Tableau 4-10 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 selon le nombre de voies – Portées simples

	Type des poutres	Position des poutres	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.681	0.150	0.220	2.127
		Intérieure	0.772	0.077	0.100	2.961
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.774	0.120	0.155	1.883
		Intérieure	0.758	0.062	0.082	3.903
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.754	0.122	0.161	2.016
		Intérieure	0.747	0.085	0.113	2.976
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.734	0.134	0.183	1.985
		Intérieure	0.903	0.068	0.075	1.426
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.820	0.100	0.122	1.800
		Intérieure	0.985	0.093	0.095	0.161
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.798	0.108	0.135	1.870
		Intérieure	0.872	0.074	0.085	1.730
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.787	0.089	0.113	2.393
		Intérieure	0.910	0.061	0.067	1.475
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.862	0.080	0.093	1.725
		Intérieure	0.972	0.094	0.097	0.298
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.856	0.080	0.094	1.800
		Intérieure	0.877	0.087	0.099	1.414
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.816	0.067	0.082	2.746
		Intérieure	0.909	0.060	0.066	1.517
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.869	0.062	0.071	2.113
		Intérieure	0.952	0.092	0.097	0.522
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.867	0.063	0.072	2.111
		Intérieure	0.863	0.085	0.099	1.612

Tout d'abord, il est possible d'observer qu'il y a une influence du type de poutres sur la répartition des efforts. En effet, selon chaque type, la répartition des efforts de cisaillement est différente. Pour chacun des types de ponts, le paramètre qui change dépendamment des poutres est la rigidité de torsion. Ce paramètre a donc une influence sur la répartition transversale des efforts. La théorie stipule qu'une meilleure rigidité en torsion aide la répartition des charges. Les résultats montrent cet effet, car les biais des poutres en béton T sont similaires pour les deux positions de poutres tandis que la tendance est opposée pour les ponts à poutres en acier. Pour ceux-ci, les valeurs de biais des poutres intérieures et extérieures diffèrent notablement.

Ensuite, pour les poutres intérieures, il est possible de confirmer avec le Tableau 4-10 que la méthode simplifiée n'est pas assez sécuritaire. Cependant, à partir du tableau, il est possible de

déterminer que seulement les ponts de plus de deux voies sont affectés. Les ponts à une voie sont quant à eux trop sécuritaires. Dans ce contexte, il serait intéressant de différencier les équations pour les poutres intérieures et extérieures dans le calcul du facteur d'essieu. En effet, les résultats des analyses pour la poutre intérieure sont près de 1 pour tous les types de ponts de plus de deux voies. Cela signifie que ces valeurs sont près de la marge de sécurité en plus d'avoir certains dépassements. Cependant, pour les poutres intérieures, les prédictions sont consistantes, car les écarts-types et les coefficients de variation qui y sont associés sont faibles. Le biais devrait donc être abaissé sans changer la dispersion qui est déjà satisfaisante. Pour les poutres extérieures, la moyenne est trop conservatrice. En observant la Figure 4.7, il est possible de voir que c'est dû au fait qu'il y a plusieurs ponts dont l'effort du grillage est largement en-dessous de l'effort issu de la norme S6-14 pour les poutres extérieures. Cela est dû à la largeur du porte-à-faux pour les poutres faiblement espacées. En effet, lorsque le porte-à-faux est très court et que l'espacement des poutres est faible, la poutre extérieure peut se trouver sous le chasse-roue. Ainsi, la première ligne de roue se retrouve donc près de la poutre intérieure et les efforts sont donc répartis de façon à ce que la poutre extérieure reprenne peu d'efforts par rapport à la poutre intérieure. La Figure 4.9 présente la géométrie qui cause ce problème.

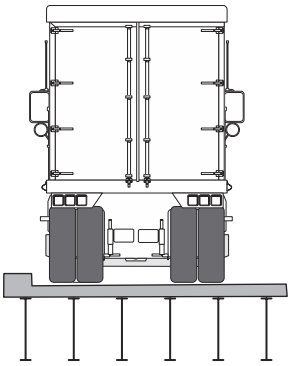


Figure 4.9 Géométrie problématique pour le cisaillement de poutre extérieure

La norme canadienne CSA S6-14 ne possède pas de réserve pour ce type de géométrie. Cependant, la norme américaine AASHTO possède un paramètre pour prendre considération de ce facteur. Dans la section 4 de la norme AASHTO, le paramètre d_e est inclus dans le calcul du facteur d'essieu. Ce paramètre représente la distance entre l'âme de la poutre extérieure et la fin du chasse-

roue. Cette valeur peut donc être négative dans le cas où la poutre se retrouve sous le chasse-roue ce qui vient donc compenser pour ces géométries.

4.4.2 Analyse des paramètres géométriques

Cette section présente l'effet des différents paramètres étudiés sur les résultats pour l'effort tranchant des portées simples de la méthode simplifiée à l'état limite ultime (ÉLU) et l'état limite de service 1 (ÉLS-1).

4.4.2.1 Effet de la portée

Dans l'édition actuelle de la norme CSA S6-14, le facteur d'essieu pour le cisaillement ne dépend pas de la portée du pont. En effet, la portée équivalente L_e n'apparaît dans aucune équation du facteur d'essieu pour le cisaillement. Cependant, ce paramètre pourrait avoir un effet sur la distribution des efforts de cisaillement puisque le cas de regroupement d'essieux du CL-625 qui gouverne change selon la portée. La portée pourrait donc avoir une influence sur la répartition des efforts de cisaillement et cet effet pourrait être caractérisé par une analyse de l'effet de la portée sur les résultats. Pour être en mesure de qualifier l'influence de ce paramètre, les résultats sont présentés sur la Figure 4.10.

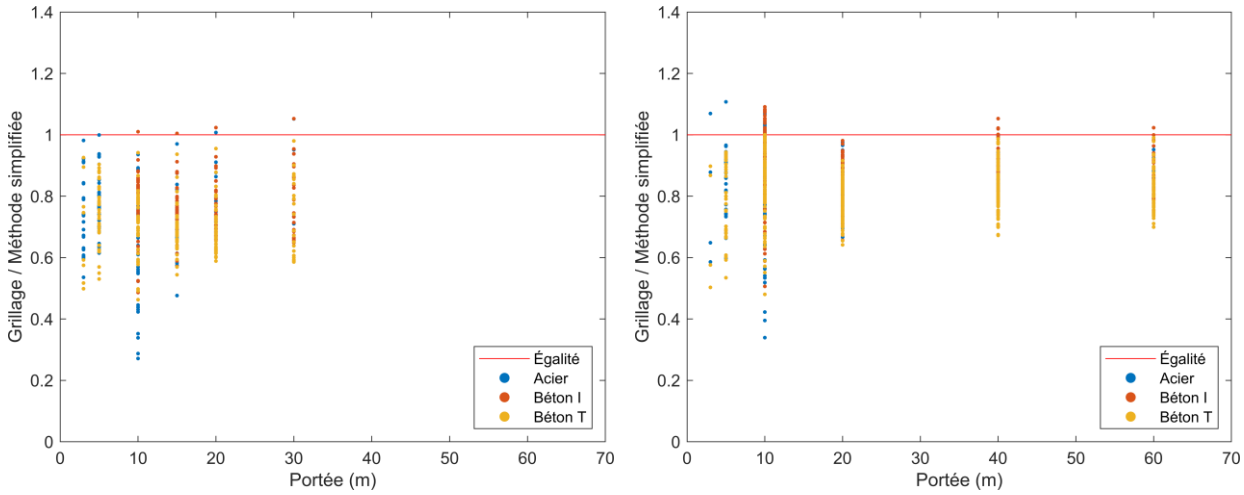


Figure 4.10 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1
- Portées simples – Ensemble des données

Pour les portées inférieures à 10 m, il est possible de voir que la méthode simplifiée n'est pas précise. En effet, les valeurs sont très dispersées. Il y a quelques ponts avec poutres en béton T non-sécuritaires avec des résultats supérieurs à 1, mais également un large échantillon de ponts qui sont trop conservateurs. Pour les portées supérieures à 10 m, la méthode simplifiée prédit mieux les efforts de cisaillement, car les points se retrouvent dans un faisceau plus fin. De plus, les valeurs de ratio se situent près de 1. Cependant, à ces portées, il y a également un nombre important de ponts dont les valeurs dépassent 1. Il serait donc favorable de ramener ces ponts du côté sécuritaire, car la méthode simplifiée doit généralement donner des efforts conservateurs.

Afin de mieux caractériser l'échantillon, le Tableau 4-11 et le Tableau 4-12 présentent les paramètres statistiques associés à chaque type de poutres en fonction de la portée. Il est alors possible de décortiquer l'effet de la variation de la portée sur la qualité de la méthode simplifiée. De plus, de cette façon, il est également possible de mieux caractériser l'effet de la portée sur chacun des types de poutres.

Tableau 4-11 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
3 m	0.72	0.164	0.227	1.707
5 m	0.78	0.106	0.136	2.075
10 m	0.67	0.155	0.231	2.129
15 m	0.71	0.085	0.120	3.412
20 m	0.76	0.091	0.120	2.637
30 m	0.86	0.144	0.168	0.972

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.78	0.114	0.146	1.930
15 m	0.75	0.078	0.104	3.205
20 m	0.75	0.077	0.103	3.247
30 m	0.79	0.108	0.136	1.944

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
3 m	0.75	0.125	0.167	2.000
5 m	0.77	0.093	0.121	2.473
10 m	0.76	0.105	0.139	2.286
15 m	0.73	0.079	0.108	3.418
20 m	0.73	0.089	0.122	3.034
30 m	0.77	0.126	0.163	1.825

Tableau 4-12 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
3 m	0.80	0.192	0.241	1.042
5 m	0.85	0.110	0.129	1.364
10 m	0.84	0.149	0.178	1.074
20 m	0.84	0.064	0.077	2.500
40 m	0.87	0.045	0.051	2.889
60 m	0.88	0.032	0.037	3.750

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.90	0.112	0.124	0.893
20 m	0.88	0.082	0.094	1.463
40 m	0.91	0.056	0.061	1.607
60 m	0.87	0.055	0.063	2.364

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
3 m	0.74	0.182	0.244	1.429
5 m	0.85	0.132	0.155	1.136
10 m	0.89	0.107	0.120	1.028
20 m	0.83	0.057	0.069	2.982
40 m	0.86	0.070	0.081	2.000
60 m	0.84	0.075	0.090	2.133

Pour les portées courtes, la méthode simplifiée présente un coefficient de variation élevé. Cet effet est particulière observable pour les ponts à poutres en acier. Au niveau des moyennes, les ponts à poutres en acier présentent un comportement différent de ceux à poutres en béton. En effet, les ponts à poutres en béton I et T ont des biais similaires pour toutes les portées tandis que les valeurs pour les poutres en acier diffèrent grandement pour les portées courtes. À partir de 15 m, les trois types de ponts présentent des moyennes similaires, donc le même comportement en cisaillement. La norme semble donc adéquate pour évaluer les efforts de cisaillement des portées supérieures à 15 m, mais celle-ci devrait être améliorée pour tenir compte de la portée pour les portées plus courtes que 15 m.

4.4.2.2 Effet de l'espacement des poutres

L'espacement des poutres est un paramètre qui est considéré dans le calcul du facteur d'essieu du cisaillement. Il intervient notamment directement dans le calcul de γ_c pour les poutres espacées de moins de 2 m. La Figure 4.11 présente l'influence de l'espacement des poutres sur les valeurs des analyses pour l'effort tranchant tandis que le Tableau 4-13 présente les résultats statistiques en fonction de l'espacement des poutres.

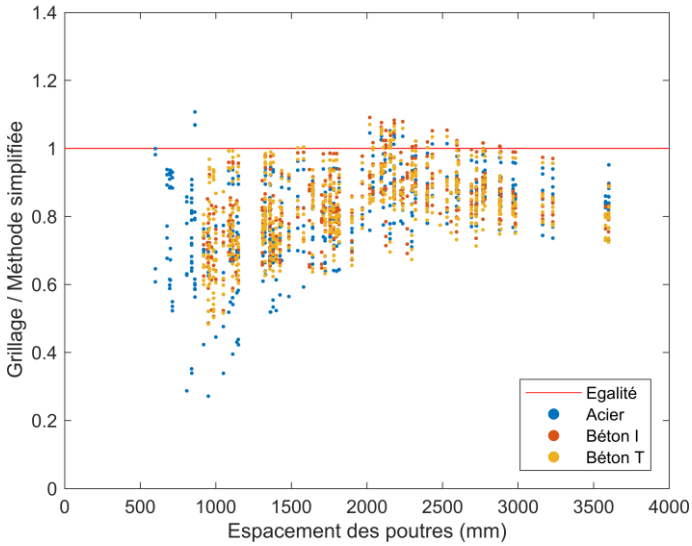


Figure 4.11 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée simple – Ensemble des données

Tableau 4-13 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en acier**			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
0.6 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.73	0.172	0.235	1.570
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.73	0.128	0.175	2.109
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.79	0.089	0.112	2.360
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.89	0.083	0.093	1.325
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.87	0.069	0.079	1.884
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.85	0.064	0.074	2.344
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.84	0.045	0.054	3.556

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en béton I**			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.70	0.099	0.140	3.030
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.76	0.090	0.119	2.667
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.82	0.078	0.095	2.308
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.92	0.078	0.085	1.026
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.88	0.067	0.076	1.791
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.84	0.057	0.068	2.807
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.81	0.043	0.053	4.419

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en béton T**			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.71	0.126	0.177	2.302
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.77	0.101	0.131	2.277
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.82	0.081	0.098	2.222
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.91	0.080	0.088	1.125
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.87	0.069	0.080	1.884
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.83	0.056	0.068	3.036
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.79	0.045	0.057	4.667

Dans le cas présent, il est possible d'observer que la méthode simplifiée n'est pas assez conservatrice pour les espacements de poutres entre 2 m à 2.5 m. En effet, il y a un nombre de ponts pour lesquels le ratio dépasse 1 et les statistiques à ces portées montrent des ratios élevés. Il serait envisageable d'améliorer la méthode simplifiée en étendant l'application de γ_c jusqu'aux espacements de 2.5 m. Cependant, pour les autres espacements la méthode simplifiée est conservatrice. De même, la quantité de cas trop conservateurs baisse également avec l'espacement des poutres. Cette tendance est due au fait qu'à ces portées, la géométrie de porte-à-faux problématique présentée à Figure 4.9 est présente qu'à ces espacements. En effet, un espacement court des poutres signifie une présence de beaucoup de poutres et la poutre extérieure peut donc se

trouver sous le chasse-roue. Une tendance peut être dressée autant pour les valeurs maximales que les valeurs minimales des ratios en fonction de l'espacement des poutres. La précision de la méthode simplifiée est donc corrélée à l'espacement des poutres.

4.4.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour la flexion, une analyse des efforts maximaux est effectuée. En effet, pour la conception à l'effort tranchant, un seul type de poutre est choisi pour le tablier. La comparaison des résultats maximaux issus des deux méthodes est présentée sur la Figure 4.12.

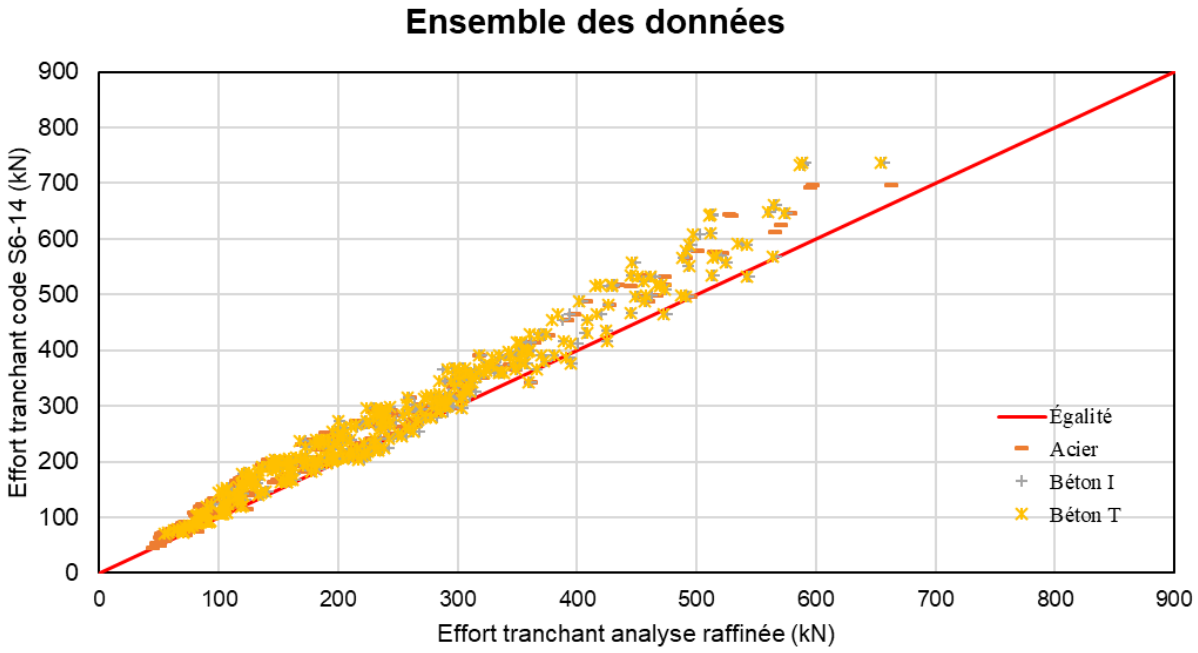


Figure 4.12 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Ensemble des données – Portées simples

Il est d'abord possible d'observer que la tendance globale des valeurs maximales se rapproche plus de la ligne d'égalité en ne considérant que les valeurs maximales. De plus, les cas où la méthode simplifiée donnait des efforts beaucoup plus grands que le grillage ont disparus. Cette tendance est due au fait que les efforts de poutres extérieure avec la géométrie problématique associée à la ligne de roue sous le chasse-roue sont absents. Dans ces cas, seule la poutre intérieure est représentée sur le graphique. Ensuite, l'effet des valeurs maximales à l'effort tranchant sur les paramètres statistiques est présenté au Tableau 4-14.

Tableau 4-14 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.874	0.087	0.099	1.448
Poutres en béton I	**Max**	0.887	0.087	0.098	1.299
Poutres en béton T	**Max**	0.882	0.084	0.095	1.405

En analysant les statistiques, il est d'abord possible d'observer que ceux-ci sont meilleurs que les résultats des poutres que lorsqu'on analyse les poutres séparément. Les coefficients de variation dans le cas présent sont tous en dessous de 0.1 ce qui indique que la méthode est relativement précise. De plus, pour les tabliers avec poutres en acier, les valeurs des statistiques sont plus près de celles de la poutre intérieure. Cela est dû à la répartition des cas critiques. Les poutres intérieures sont plus critiques que les poutres extérieures dans une majorité de cas pour les tabliers en acier. Pour valider cela, la répartition est présentée au Tableau 4-15.

Tableau 4-15 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception – Effort tranchant – Portée Simple

Type des poutres	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Poutres en acier	**Extérieure**	57	256	22%
	Intérieure	199		78%
Poutres en béton I	**Extérieure**	174	285	61%
	Intérieure	111		39%
Poutres en béton T	**Extérieure**	154	325	47%
	Intérieure	171		52%

La répartition des cas critiques est différente dans le cas présent. En effet, c'est la poutre intérieure qui gouverne majoritairement le cisaillement sauf pour les poutres en béton I. Les ponts à poutres en béton I sont particuliers, car ceux-ci ne comportent pas de portées courtes. Pour les ponts à poutres en béton T, les deux positions gouvernent un nombre de cas presque égal. Tel que mentionné plus tôt, ces ponts ont des inerties en torsion plus élevées ce qui aide la distribution des

efforts entre les poutres. Pour les autres types de ponts, c'est une des raisons pour lesquelles les biais des cas critiques sont plus près de la valeur de la poutre intérieure. En ajoutant les cas critiques des poutres extérieures, le biais est plus élevé que celui de la poutre intérieure.

4.5 Moment fléchissant à l'ÉLF et l'ÉLS-2

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour les moments fléchissants à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2).

4.5.1 Ensemble des résultats

Les résultats des analyses permettent d'évaluer la précision de la méthode simplifiée du Code en comparant les efforts de flexion obtenus par la méthode raffinée du grillage et ceux issus de la méthode simplifiée du Code. Les résultats pour l'ensemble des données sont présentés sur la Figure 4.13. La comparaison est illustrée dans la Tableau 4-16 qui oppose directement les efforts issus de la méthode raffinée d'analyse et ceux issus de la méthode du code S6-14 pour l'ensemble des ponts analysés dans le cadre de la présente étude paramétrique.

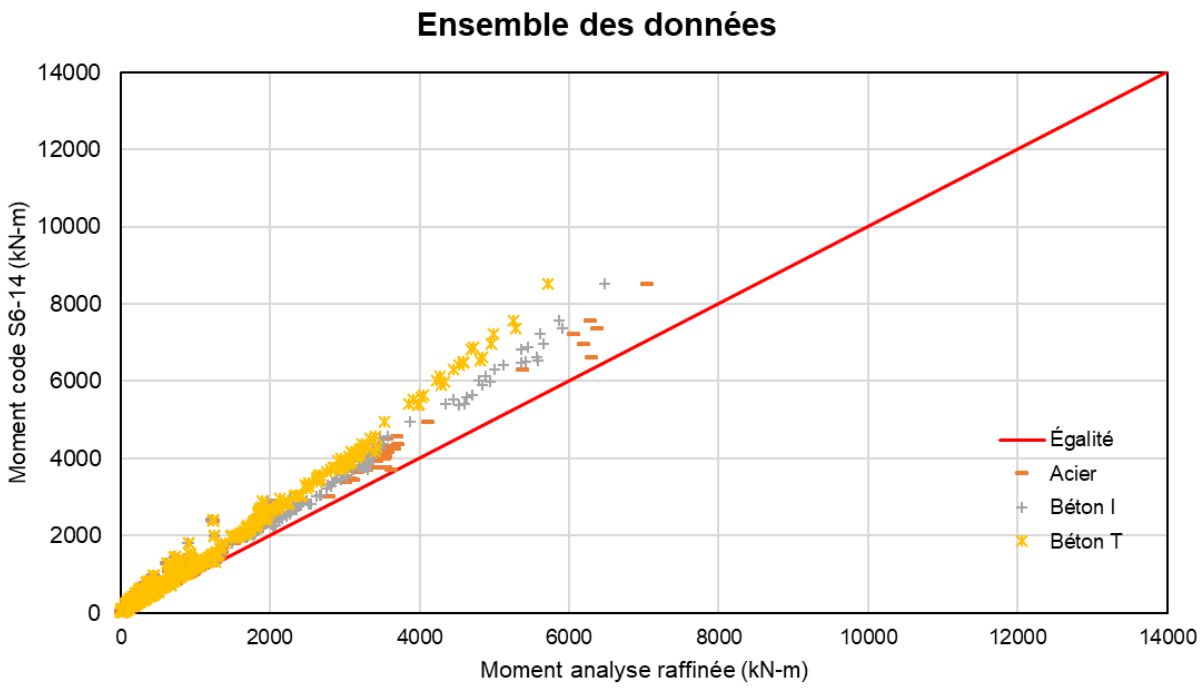


Figure 4.13 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données

Sur la Figure 4.13, il est possible d'observer que les tendances sont similaires à celles de l'ÉLU. Les mêmes observations peuvent donc être dressées :

- la méthode simplifiée est sécuritaire pour la grande majorité des ponts à l'ÉLF ;
- la méthode simplifiée est trop conservatrice.

Il y a néanmoins quelques différences avec l'ÉLU :

- les trois types de ponts analysés présentent les mêmes tendances ;
- le nuage de points ne suit pas la courbe linéairement.

Comme pour l'ÉLU, une comparaison statistique des résultats se fait à travers les paramètres statistiques du rapport des efforts. Les valeurs des moyennes, d'écarts-types et de variance de ce paramètre seront analysées. Ces valeurs permettent de caractériser la justesse et la précision de la méthode simplifiée. Le Tableau 4-16 présente les résultats au niveau des statistiques selon la position des poutres. Cela permet de mesurer l'impact de la position des poutres sur la qualité des prédictions du Code.

Tableau 4-16 Résultats statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.742	0.227	0.305	1.137
	Intérieure	0.791	0.101	0.128	2.069
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.773	0.180	0.233	1.261
	Intérieure	0.787	0.084	0.107	2.536
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.710	0.192	0.270	1.510
	Intérieure	0.778	0.099	0.128	2.242

À l'ÉLF, la méthode simplifiée estime mal les efforts de flexion pour tous les types de ponts. En effet, les biais sont trop faibles et les écarts-types sont trop élevés. La méthode simplifiée a donc tendance à grandement surestimer les efforts de flexion à l'ÉLF pour les trois types de ponts analysés. Cette surestimation est plus élevée pour les poutres extérieures des ponts à poutres en béton T où ça atteint près de 29%. Pour les autres types de ponts, cette surestimation oscille entre 23% et 26%. De plus, la méthode n'est pas consistante, car les écart-types sont élevés. Cela est particulièrement présent pour les poutres extérieures, car les biais sont faibles et les écarts-types sont élevés.

Comme à l'ÉLU, il y a des différences dans les tendances entre les trois types de ponts. Les statistiques associées à chacune sont différentes. Les résultats montrent que la méthode simplifiée tend à se dégrader avec une plus grande rigidité en torsion. En effet, les poutres en béton T possèdent la plus grande rigidité en torsion et ceux-ci présentent des résultats les plus loin de 1 que les poutres en acier. Pour les ponts à poutres en béton I, le fait que ces ponts ne sont pas considérés pour des portées courtes fait qu'ils présentent de meilleurs résultats. Ce paramètre devrait donc être considéré dans le calcul des facteurs d'essieux à l'ÉLF.

Un autre paramètre qui possède une influence sur le calcul du facteur d'essieu est le nombre de voies. En effet, dépendamment du nombre de voies, différentes équations sont établies pour le calcul du paramètre D_t et λ. À l'ÉLF, la méthode simplifiée est encore plus précise pour la poutre intérieure, car elle considère des équations différentes pour les ponts à 2, 3 et 4 voies. À l'ÉLU, il n'y a que deux équations pour couvrir tous les ponts. La Figure 4.14 présente la comparaison des efforts de flexion obtenus par les 2 méthodes selon le nombre de voies.

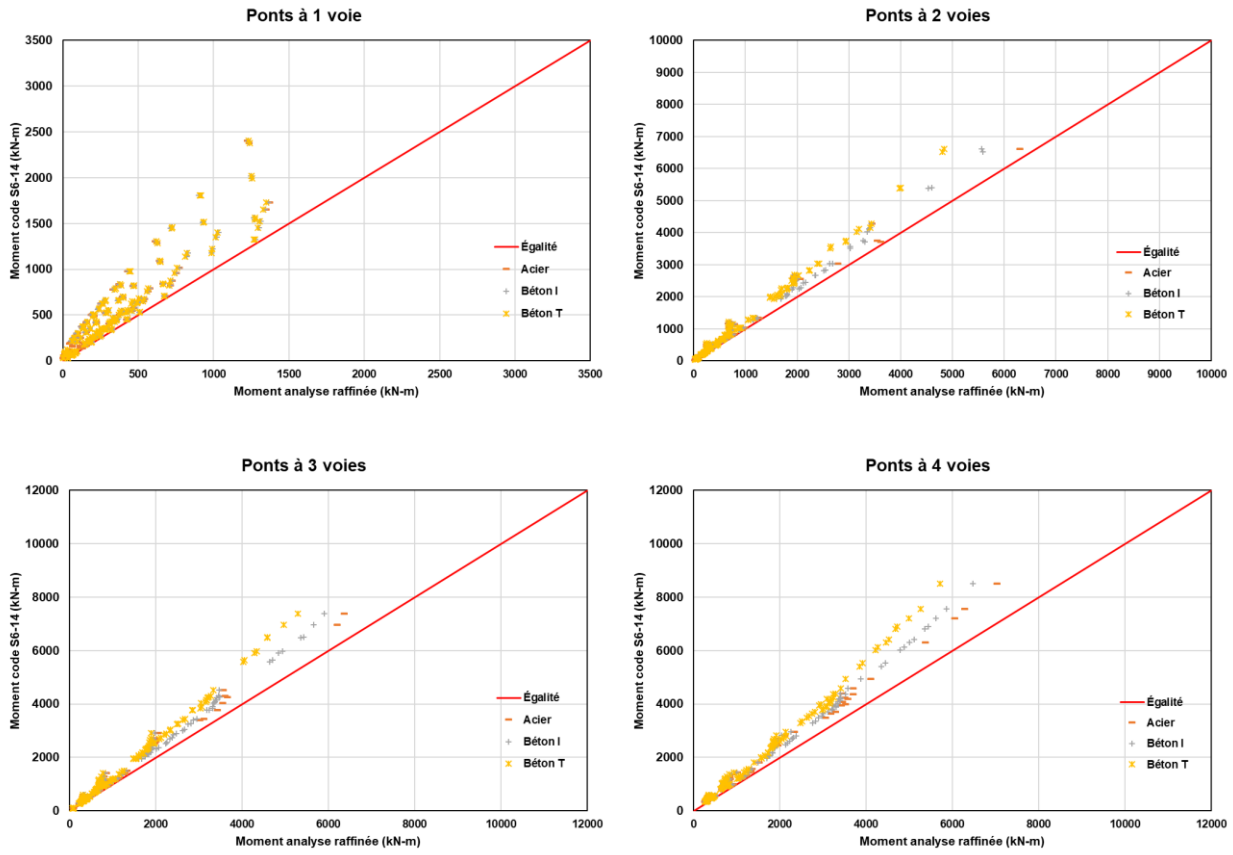


Figure 4.14 Comparaison des valeurs pour le moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Étude par nombre de voies – Portée simple

Sur la Figure 4.13, il est possible d'observer que, pour un nombre de voies de 1 à 4, les valeurs de moments fléchissants obtenus par la méthode simplifiée du Code CSA S6-14 sont généralement sécuritaires. Comme le montre également l'ensemble des données statistiques présenté au Tableau 4-17, la méthode simplifiée est adéquate pour évaluer le moment fléchissant pour un nombre de voies de 1 à 4 pour des ponts à poutres en acier, en béton précontraint en I et en béton armé en T. Cependant, la méthode est trop conservatrice pour les ponts ayant trois voies et plus, notamment pour les ponts avec des poutres en béton I et en béton T.

Tableau 4-17 Comparaison des statistiques pour la flexion selon le nombre de voies – Portée simple – ÉLF/ÉLS-2

	Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.491	0.229	0.467	2.223
		Intérieure	0.827	0.072	0.086	2.403
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.526	0.174	0.330	2.724
		Intérieure	0.812	0.063	0.078	2.984
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.512	0.128	0.251	3.813
		Intérieure	0.755	0.245	0.324	1.000
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.889	0.067	0.076	1.657
		Intérieure	0.774	0.107	0.138	2.112
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.860	0.081	0.094	1.728
		Intérieure	0.803	0.094	0.117	2.096
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.800	0.095	0.119	2.105
		Intérieure	0.798	0.072	0.090	2.806
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.879	0.073	0.083	1.658
		Intérieure	0.745	0.074	0.099	3.446
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.855	0.073	0.085	1.986
		Intérieure	0.778	0.068	0.087	3.265
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.809	0.068	0.084	2.809
		Intérieure	0.741	0.073	0.098	3.548
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.856	0.080	0.094	1.800
		Intérieure	0.731	0.060	0.082	4.483
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.845	0.062	0.074	2.500
		Intérieure	0.762	0.066	0.086	3.606
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.786	0.072	0.092	2.972
		Intérieure	0.724	0.062	0.085	4.452

Pour les trois types de ponts, il est possible de voir que les écart-type des résultats des analyses diminuent avec le nombre de voies. Cela s'explique par le fait que le paramètre du nombre de voies a une incidence sur le nombre de positions sur lesquelles il est possible de placer le camion. À l'ÉLF, puisqu'il est seulement possible de placer un camion au centre de la voie, certaines poutres ne sont pas sollicitées lorsque le nombre de voies est faible. Par exemple, pour des ponts à une voie, la poutre extérieure sera peu sollicitée s'il y a plusieurs poutres intérieures. Dans ces cas, la charge se situe loin de cette poutre et ce sont plutôt les poutres intérieures à proximité qui reprendront l'essentiel de l'effort. Cela explique les faibles biais pour les poutres extérieures des ponts à une voie.

À l'ÉLF, le code CSA S6-14 est plus précis et dispose de plus équations qu'à l'ÉLU. Pour les poutres intérieures, le Code considère les cas d'une voie, deux voies, trois voies et quatre voies et plus. Pour les poutres extérieures, les cas considérés sont une voie, deux voies et trois et plus. Avec l'augmentation du nombre de voies, il est possible de voir une diminution de l'écart-type autant pour la poutre extérieure que la poutre intérieure.

Les poutres intérieures pour tous les types de ponts ont également un très faible écart-type, particulièrement pour les poutres en béton. La méthode est donc consistante pour évaluer les efforts de ces poutres.

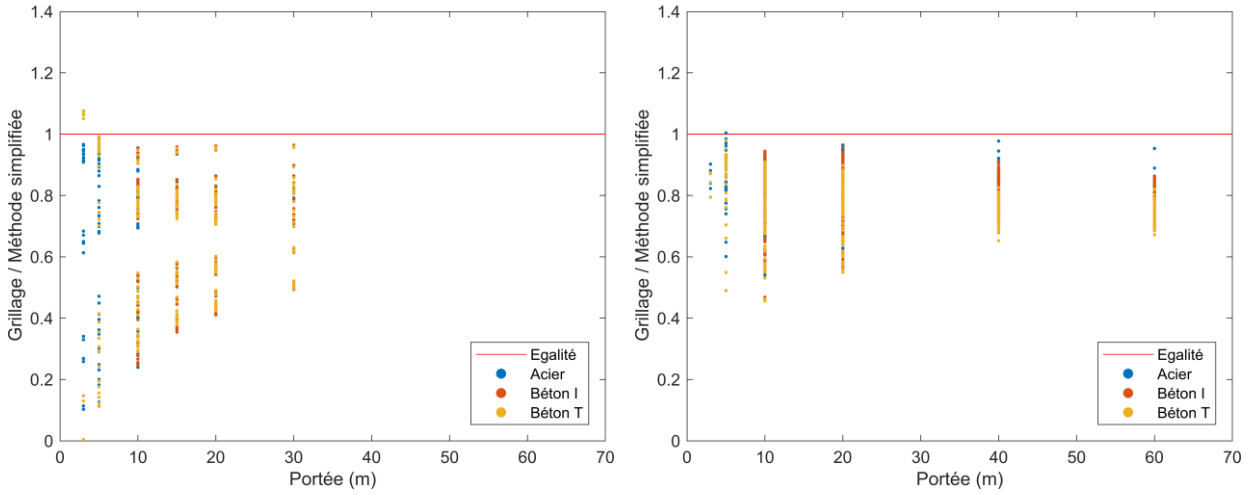
Les poutres extérieures des ponts à une voie sont mal représentées par la méthode simplifiée. En effet, le biais s'approche de 0.5 et ils présentent des écarts-types les plus élevés. Cet effet est observé malgré le fait qu'une équation leur soit dédiée. Celle-ci semble donc mal calibrée.

4.5.2 Analyse des paramètres géométriques

Cette section présente l'effet des différents paramètres étudiés sur les résultats des analyses pour le du moment de flexion des portées simples de la méthode simplifiée à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2).

4.5.2.1 Effet de la portée

Un paramètre pouvant influer sur la précision de la méthode simplifiée est la portée des ponts analysés. La portée L_e est un paramètre qui intervient dans plusieurs coefficients dans le calcul du facteur d'essieu. L'influence de ce paramètre est présentée à la Figure 4.15 :



1 voie 2 voies et plus

Figure 4.15 Influence de la portée pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Ensemble des données

Il est d'abord possible d'observer que la méthode simplifiée est généralement sécuritaire pour toutes les portées. Pour les ponts avec des poutres en béton I et en béton T, la méthode simplifiée donne des efforts de flexion toujours supérieurs à la méthode raffinée. Seuls quelques ponts à poutres en béton T avec une portée de 3 m présentent de légers dépassements. Tel qu'illustré au Tableau 4-17, les poutres extérieures de tous les types de ponts à une voie présentent les valeurs les plus faibles et les coefficients de variation les plus élevés. Cet effet s'observe sur Figure 4.15 où il y a un grand nombre de ponts à une voie dont le biais est faible pour les trois types de ponts. Cet effet est particulièrement présent pour les portées plus courtes et celui-ci s'atténue avec l'augmentation de la portée. Pour caractériser l'échantillon, le Tableau 4-18 et le Tableau 4-19 présentent les paramètres statistiques associés à chaque type de poutres.

Tableau 4-18 Influence de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
3 m	0.68	0.298	0.439	1.074
5 m	0.69	0.286	0.414	1.084
10 m	0.66	0.214	0.323	1.589
15 m	0.66	0.182	0.273	1.868
20 m	0.67	0.159	0.237	2.075
30 m	0.66	0.145	0.220	2.345

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.64	0.231	0.358	1.558
15 m	0.67	0.188	0.283	1.755
20 m	0.68	0.168	0.248	1.905
30 m	0.71	0.151	0.213	1.921

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
3 m	0.57	0.500	0.881	0.860
5 m	0.66	0.336	0.510	1.012
10 m	0.64	0.207	0.323	1.739
15 m	0.66	0.176	0.266	1.932
20 m	0.68	0.161	0.239	1.988
30 m	0.71	0.148	0.210	1.959

Tableau 4-19 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
3 m	0.86	0.032	0.037	4.375
5 m	0.86	0.086	0.101	1.628
10 m	0.79	0.107	0.136	1.963
20 m	0.83	0.105	0.126	1.619
40 m	0.82	0.073	0.088	2.466
60 m	0.84	0.042	0.050	3.810

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.81	0.101	0.125	1.881
20 m	0.83	0.097	0.117	1.753
40 m	0.83	0.049	0.059	3.469
60 m	0.82	0.025	0.031	7.200

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
3 m	0.85	0.032	0.038	4.688
5 m	0.85	0.106	0.125	1.415
10 m	0.79	0.099	0.126	2.121
20 m	0.78	0.086	0.110	2.558
40 m	0.76	0.030	0.039	8.000
60 m	0.74	0.037	0.050	7.027

Les tendances sont différentes entre les ponts à une voie et ceux à deux voies et plus. Pour les ponts à une voie, comme à l'ÉLU, pour les portées courtes, la méthode simplifiée présente un coefficient de variation élevé ainsi qu'un biais faible. Les portées de 3 m présentent ces caractéristiques de

façon similaire lorsqu'appliquées aux trois types de ponts. La méthode simplifiée du Code est donc trop conservatrice et trop inconsistante pour ces portées. Cependant, pour les portées égales et supérieures à 10 m, la méthode simplifiée est un peu meilleure.

Pour les ponts à 2 voies, les résultats s'améliorent avec la portée en se rapprochant de l'égalité. Pour les portées de 3 et 5 m, les ratios sont trop faibles, mais à partir de 10 m, ceux-ci deviennent acceptables. L'écart-type de son côté ne varie pas en suivant une tendance avec la portée. Celle-ci reste tout de même faible pour toutes portées.

Les tendances sont les mêmes pour trois types de ponts étudiés. Les coefficients de variation de chacun des types de pont sont très similaires pour chacune des portées.

4.5.2.2 Effet de l'espacement des poutres

L'espacement des poutres est un paramètre qui est considéré dans le calcul du facteur d'essieu. Il intervient notamment directement dans le calcul de F_t. La Figure 4.16 présente l'influence de l'espacement des poutres pour le moment fléchissant alors que le Tableau 4-20 met en relation la variation de l'espacement des poutres avec les paramètres statistiques.

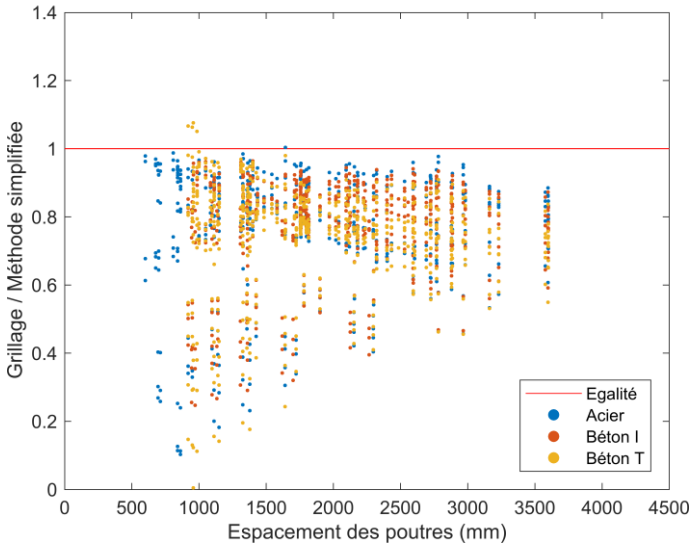


Figure 4.16 Influence de l'espacement des poutres pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Ensemble des données

Tableau 4-20 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples

Espacement des poutres	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
0.6 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.73	0.263	0.360	1.027
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.76	0.194	0.257	1.237
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.78	0.148	0.188	1.486
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.77	0.135	0.175	1.704
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.79	0.125	0.158	1.680
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.78	0.114	0.147	1.930
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.79	0.076	0.096	2.763

Espacement des poutres	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.71	0.219	0.307	1.324
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.76	0.177	0.232	1.356
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.80	0.130	0.163	1.538
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.80	0.113	0.142	1.770
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.80	0.097	0.122	2.062
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.76	0.100	0.131	2.400
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.76	0.070	0.092	3.429

Espacement des poutres	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.70	0.285	0.409	1.053
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.75	0.187	0.250	1.337
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.76	0.119	0.157	2.017
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.76	0.098	0.130	2.449
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.75	0.092	0.124	2.717
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.71	0.097	0.135	2.990
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.71	0.069	0.097	4.203

Comme à l'ÉLU, pour les espacements de poutres inférieurs à 1.5 m, le coefficient de variation est élevé pour les ponts à poutres en acier et à poutres en béton T. Il y a également une forte diminution de ce paramètre entre l'espacement de 1 à 1.5 m et celui de 1.5 à 2 m. Cette augmentation est attribuable à l'augmentation des valeurs calculées entre ces espacements.

Par contre, différemment de l'ÉLU, la méthode simplifiée donne toujours des résultats conservateurs. Sur la Figure 4.16, il est possible de voir qu'il n'y a que deux ponts qui ne sont pas sécuritaires et ceux-ci se trouvent tout de même près de l'égalité. Même pour des poutres rapprochées, il n'y a pas un groupe de ponts non-sécuritaires à l'ÉLF.

Le groupe de cas trop conservateurs dont les valeurs sont inférieures à 0.6 représentent des poutres extérieures dont l'espacement des poutres est faible tel que présenté à la Figure 4.16. Comme pour le cisaillement à l'ÉLU, des ponts à faibles espacement représentent également des ponts avec un grand nombre de poutres. Pour ces configurations, il est possible que le camion soit toujours positionné loin de la poutre extérieure et qu'il y a plusieurs poutres intérieures entre l'essieu et la poutre extérieure. Cela entraîne le fait que la poutre extérieure ne voit alors que très peu d'effort. Le ratio pour ces poutres serait alors très faible.

4.5.3 Analyse des valeurs maximales

Pour la conception des ponts, une même dimension de poutre est utilisée pour l'ensemble du tablier. Ainsi, la distinction entre la poutre intérieure et la poutre extérieure ne s'effectue qu'à l'analyse, mais pas à l'étape de conception. Pour cela, une analyse est faite seulement avec les valeurs extrêmes pour chaque modèle de pont, c'est-à-dire la valeur d'effort maximale entre la poutre intérieure et la poutre extérieure. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.17 tandis que le Tableau 4-21 présente l'effet de prendre en compte les efforts maximaux sur les paramètres statistiques.

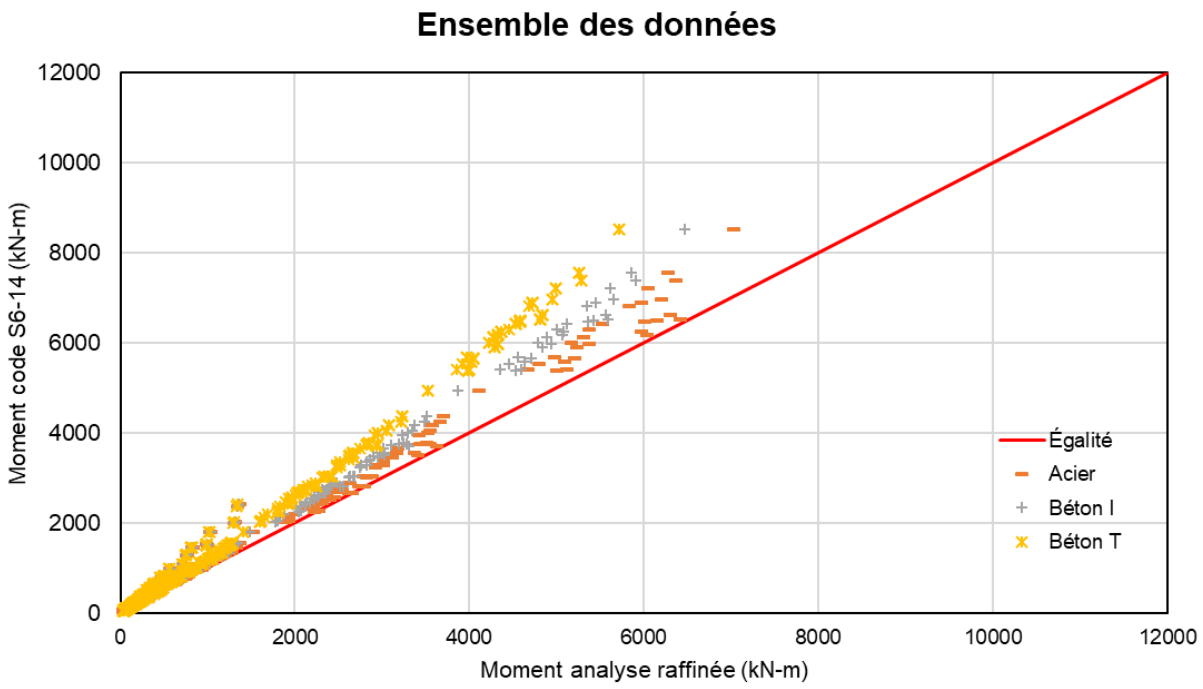


Figure 4.17 Comparaison des valeurs maximales du moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Ensemble des données – Portées simples

Tableau 4-21 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}
Poutres en acier	**Max**	0.823	0.099	0.121
Poutres en béton I	**Max**	0.810	0.100	0.124
Poutres en béton T	**Max**	0.777	0.091	0.118

Il est d'abord possible de voir que la méthode simplifiée donne des résultats conservateurs. Autant les statistiques que la dispersion des points montre que la méthode simplifiée est trop conservatrice pour évaluer la flexion à l'ÉLF. Les biais sont similaires pour les trois types de ponts et les valeurs sont faibles. Par contre, les écarts-types sont satisfaisants surtout pour les ponts à poutres en béton I et ceux à poutres en béton T. Puisque les répartitions des points sont satisfaisantes, mais que les

biais sont trop faibles, seule une amélioration du biais est nécessaire. Le Tableau 4-22 montre ensuite la répartition des cas où chacune des positions de poutres gouverne.

Tableau 4-22 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2 – Flexion – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Poutres en acier	**Extérieure**	135	256	53%
	Intérieure	121		47%
Poutres en béton I	**Extérieure**	185	285	65%
	Intérieure	100		35%
Poutres en béton T	**Extérieure**	192	325	53%
	Intérieure	133		47%

Les résultats sont similaires à ceux à l'ÉLU. Les pourcentages où chacun des cas gouverne sont différents entre l'ÉLU et l'ÉLF. Les pourcentages sont plus près entre chacune des positions qu'à l'ÉLU.

L'effet de l'espacement des poutres est également un paramètre qui est influencé par la considération des valeurs maximales seulement. L'effet de ce paramètre est présenté à la Figure 4.18.

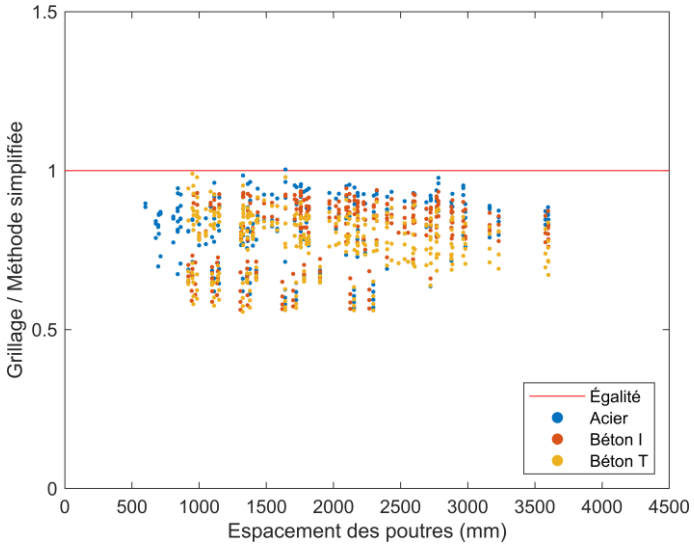


Figure 4.18 Influence de l'espacement des poutres pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Valeurs maximales

Les valeurs très faibles liées au cas illustré sur la Figure 4.9 disparaissent en ne considérant que les valeurs maximales. Les points sont alors plus compacts.

4.6 Effort tranchant à l'ÉLF et l'ÉLS-2

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour l'effort tranchant à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2).

4.6.1 Ensemble des résultats

Comme pour la flexion, l'évaluation de la précision de la méthode simplifiée d'analyse du Code S6-14 pour le calcul de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 est faite par une comparaison entre les efforts obtenus par cette méthode et ceux obtenus par une méthode raffinée. Les résultats pour l'ensemble des données sont présentés sur la Figure 4.19.

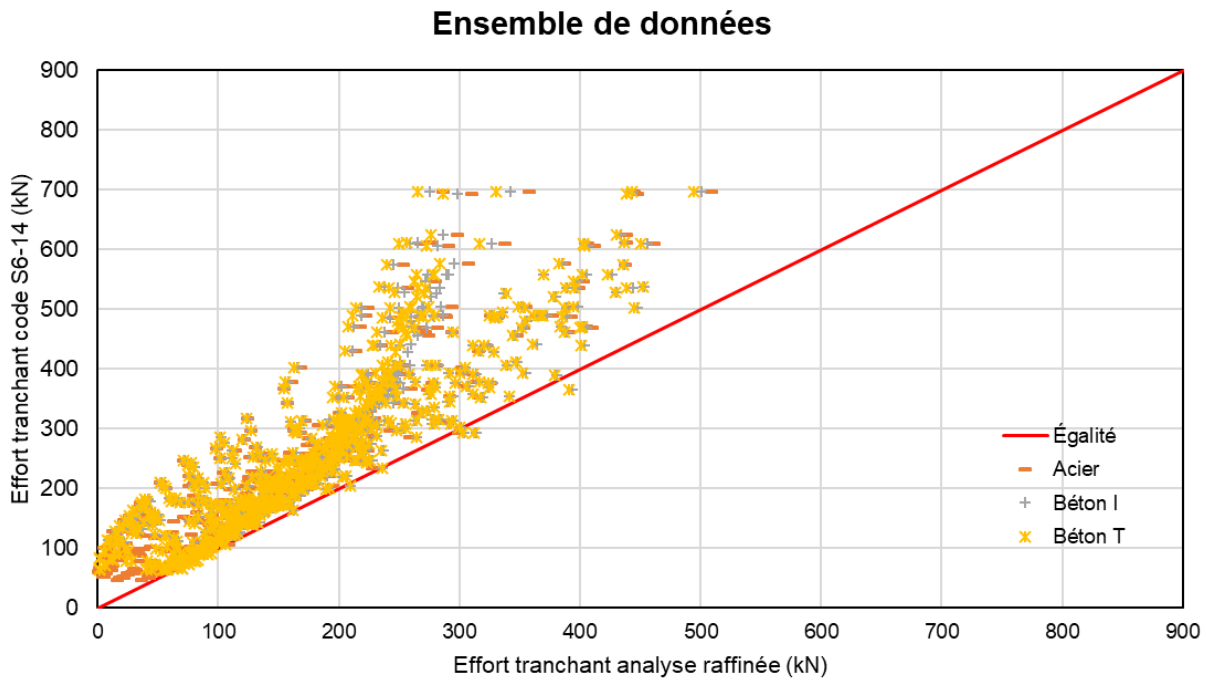


Figure 4.19 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données

Sur la Figure 4.19, il est d'abord possible d'observer que la méthode simplifiée donne des résultats très conservateurs. Contrairement à l'ÉLU, les points ne suivent pas une régression linéaire près de l'égalité. Le nuage suit plutôt la tendance d'un polynôme de degré deux. La méthode surestime donc de plus en plus les efforts tranchants à mesure que les efforts augmentent, c'est-à-dire pour les portées les plus longues. Cette tendance n'est pas voulue, car elle montre que la méthode simplifiée n'est pas consistante avec les méthodes raffinées. Il y serait donc avantageux de calibrer la méthode simplifiée avec d'autres paramètres à l'ÉLF/ÉLS-2.

Une des raisons pouvant expliquer cette tendance est la présence de seulement une seule équation pour évaluer le cisaillement des poutres intérieures et extérieures. La méthode simplifiée du Code ne spécifie que deux cas : les ponts à une voie et les ponts à deux voies et plus. Les Figure 4.20 et Figure 4.21 illustrent l'influence de la position des poutres sur la dispersion des points.

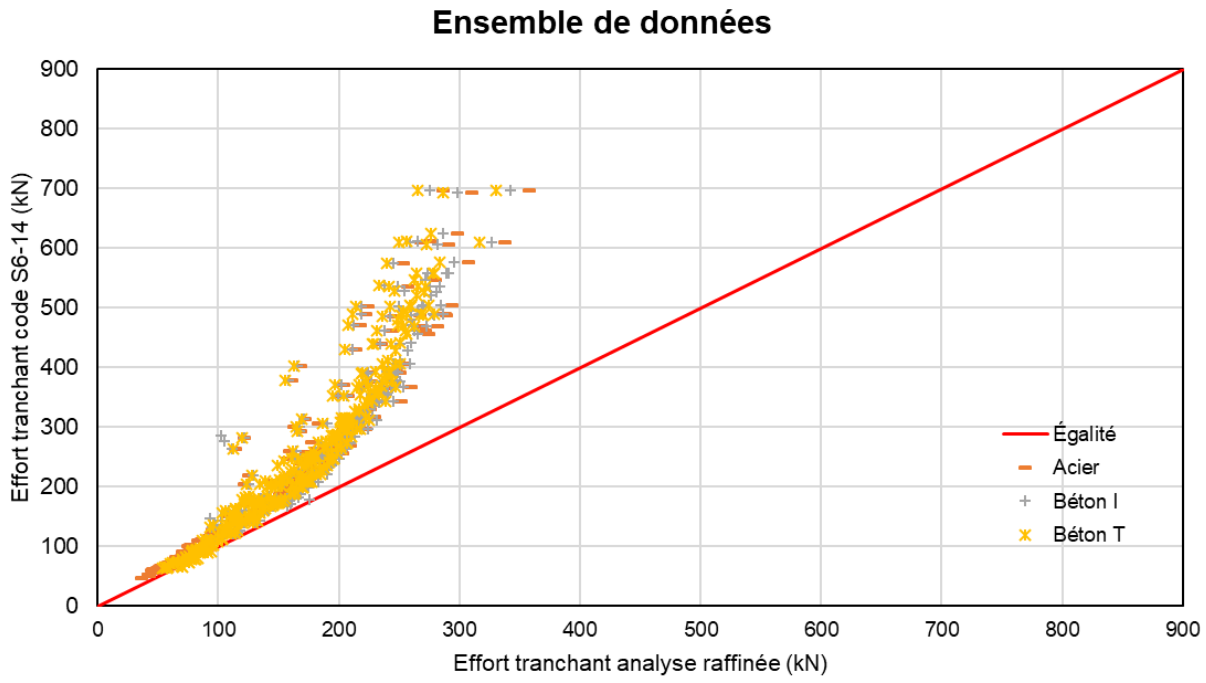


Figure 4.20 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données – Poutres intérieures

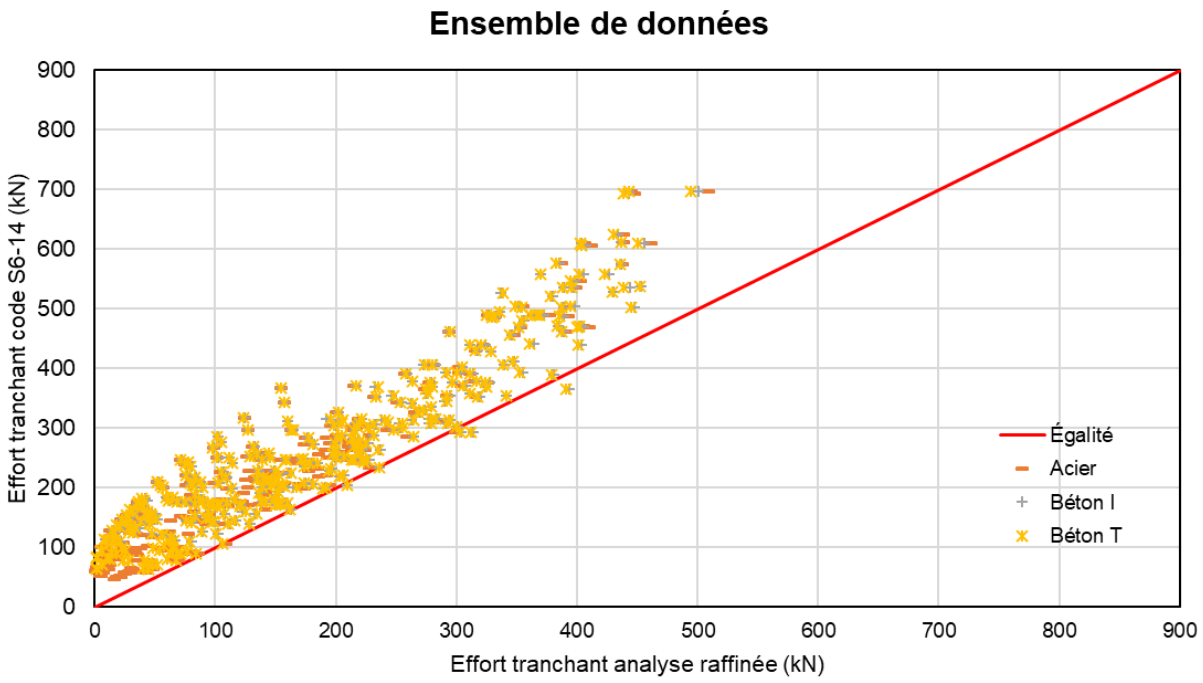


Figure 4.21 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données – Poutres extérieures

Sur les Figure 4.20 et Figure 4.21, il est possible de voir que les points qui ne suivent pas linéairement l'égalité sont les poutres intérieures. C'est celles-ci qui suivent la tendance d'un polynôme de degré deux. Les poutres extérieures ne comportent pas cet effet et suivent la même tendance qu'à l'ÉLU. Ce sont donc pour l'analyse des poutres intérieures qu'il faudrait lier d'autres paramètres. Le Tableau 4-23 présente les résultats statistiques des résultats d'analyse liés à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2.

Tableau 4-23 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.557	0.242	0.435	1.831
	Intérieure	0.743	0.115	0.154	2.235
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.439	0.248	0.565	2.262
	Intérieure	0.657	0.191	0.290	1.796
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.614	0.253	0.413	1.526
	Intérieure	0.722	0.145	0.202	1.917

Les statistiques suivent les mêmes tendances qu'à l'ÉLU :

- grande différence du biais et de l'écart-type entre les poutres extérieures et intérieures;
- la méthode simplifiée performe mieux pour les poutres intérieures que les poutres extérieures;
- les tendances sont similaires entre les trois types de ponts analysés.

Par contre, les statistiques ne montrent pas le problème avec les poutres intérieures identifiées par les Figure 4.20 et Figure 4.21. Puisqu'il y a une portion des points près de l'égalité et que le fuseau de points est compact, les statistiques indiquent que la méthode performe correctement. Cependant, en réalité, la méthode simplifiée ne concorde pas avec la méthode raffinée pour les poutres intérieures.

Le nombre de voies est une autre caractéristique des ponts qui a directement un impact sur le facteur d'essieu à l'ÉLF/ÉLS-2. En effet, le calcul du paramètre D_t ne dépend que du nombre de voies. Il prend une valeur différente pour les ponts à une voie et ceux à deux voies et plus. La Figure 4.22 présente l'influence de ce paramètre sur les valeurs d'efforts issus des deux méthodes.

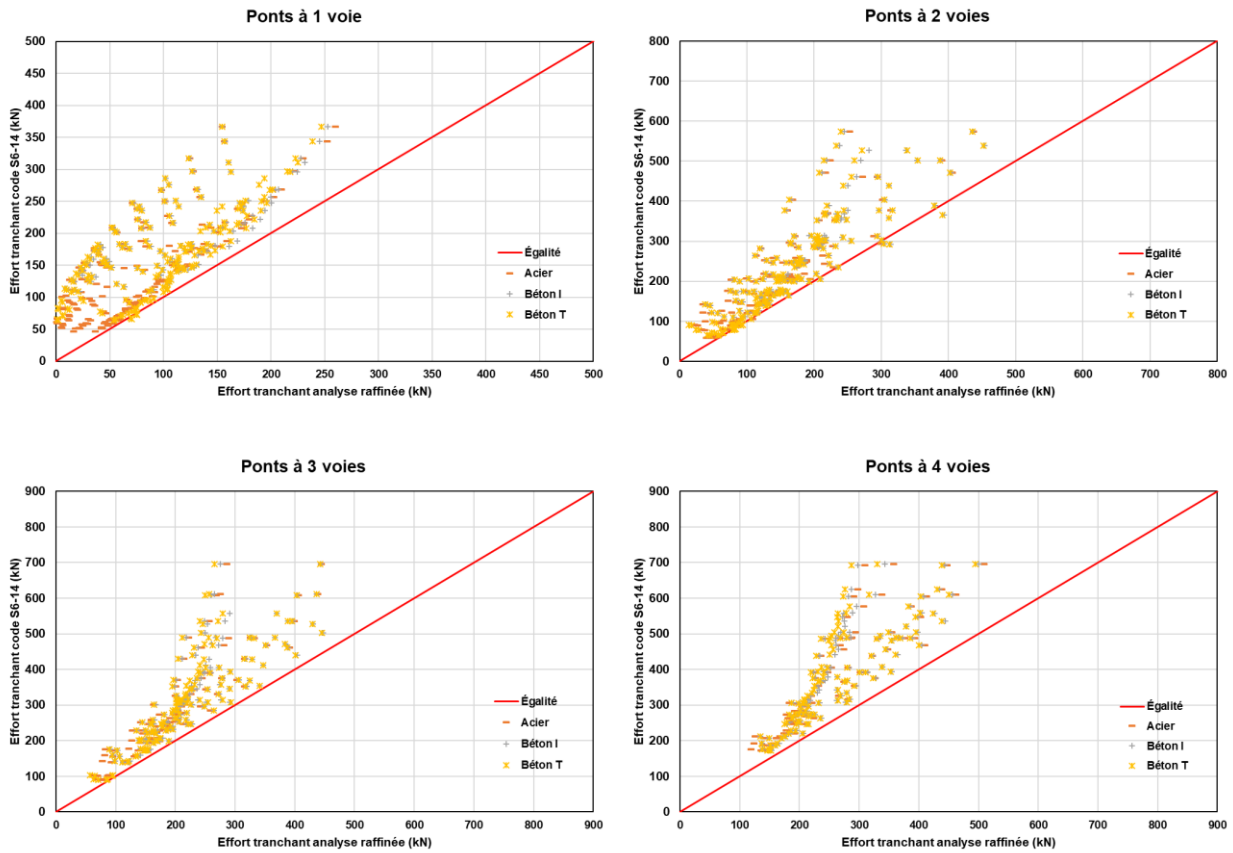


Figure 4.22 Comparaison des valeurs du moment à l'ÉLF/ÉLS-2 – Étude par nombre de voies – Portées simples

La Figure 4.22 montre trois différentes tendances selon le nombre de voies :

- les ponts à 1 voie montrent une tendance linéaire et une importante démarcation entre les poutres extérieures et les poutres intérieures;
- les ponts à 2 voies montrent une tendance linéaire et une faible démarcation entre les poutres extérieures et les poutres intérieures;
- les ponts à 3 et 4 voies montrent une tendance quadratique entre les deux méthodes.

Pour tous les cas, la méthode simplifiée est sécuritaire, mais trop conservatrice. Il n'y a également que quelques ponts non-sécuritaires et ceux-ci sont présents seulement pour les ponts à une et deux voies. Le Tableau 4-24 montre les statistiques des résultats d'analyse pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2.

Tableau 4-24 Comparaison des paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 selon le nombre de voies – Portées simples

	Type des poutres	Position des poutres	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.327	0.255	0.780	2.639
		Intérieure	0.783	0.057	0.073	3.807
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.377	0.186	0.494	3.349
		Intérieure	0.567	0.279	0.492	1.552
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.345	0.152	0.441	4.309
		Intérieure	0.698	0.268	0.384	1.127
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.627	0.177	0.282	2.107
		Intérieure	0.743	0.160	0.216	1.606
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.690	0.164	0.237	1.890
		Intérieure	0.729	0.147	0.201	1.844
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.678	0.183	0.270	1.760
		Intérieure	0.781	0.145	0.186	1.510
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.689	0.094	0.136	3.309
		Intérieure	0.708	0.124	0.175	2.355
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.736	0.108	0.147	2.444
		Intérieure	0.690	0.131	0.189	2.366
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.742	0.103	0.138	2.505
		Intérieure	0.677	0.142	0.209	2.275
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.721	0.078	0.108	3.577
		Intérieure	0.659	0.108	0.164	3.157
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.753	0.092	0.123	2.685
		Intérieure	0.651	0.120	0.184	2.908
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.748	0.095	0.127	2.653
		Intérieure	0.634	0.122	0.192	3.000

Les constats tirés de la Figure 4.21 sont confirmés avec les statistiques. En effet, les trois tendances énumérées sont visibles sur les statistiques. Chacun des trois groupes de nombre de voies comporte des statistiques différentes.

Pour les ponts à une voie, les biais des poutres extérieures sont très faibles. Cela est dû au fait que l'ÉLF ne comporte qu'une seule position de charge de voie transversale. À l'ÉLF, le camion ne peut être placé qu'au centre de la voie. Cette position réduit les efforts de cisaillement sur les poutres extérieures, car sa ligne d'influence est maximale lorsque la charge circule directement sur la poutre, mais les valeurs de la ligne d'influence diminuent rapidement lorsque la charge s'éloigne de la poutre. Les poutres intérieures ne sont pas affectées par cet effet et cela est visible sur les

statistiques à travers les résultats plus près de 1. Il est alors nécessaire de séparer les équations entre les poutres extérieures et les poutres intérieures pour les ponts à une voie.

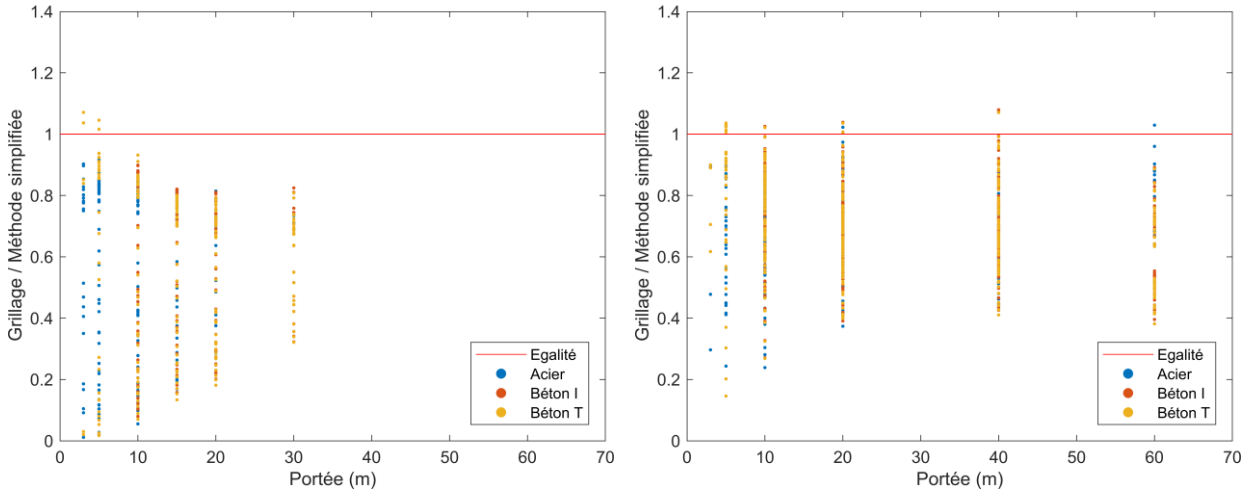
Comme à l'ÉLU, l'ÉLF comporte également une influence du type de poutres sur la répartition des efforts. Les statistiques suivent les mêmes tendances pour les trois types de ponts, mais les valeurs diffèrent entre ces types. Les valeurs obtenues sont toujours plus élevées pour les poutres à béton que pour les poutres en acier. Les recommandations sont donc les mêmes qu'à l'ÉLU.

4.6.2 Analyse des paramètres géométriques

Cette section présente l'effet des différents paramètres étudiés sur les résultats des analyses pour l'effort tranchant des portées simples de la méthode simplifiée à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2).

4.6.2.1 Effet de la portée

La portée équivalente L_e n'apparaît dans aucune équation du facteur d'essieu pour le cisaillement autant à l'ÉLU qu'à l'ÉLF. Cependant, comme pour l'ÉLU, ce paramètre pourrait avoir un effet sur la distribution des efforts de cisaillement puisque la configuration d'essieux critique du CL-625 change selon la portée. Pour être en mesure de qualifier l'influence de ce paramètre, les résultats sont présentés sur la Figure 4.23.



1 voie

2 voies et plus

Figure 4.23 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – Ensemble des données

Pour les portées inférieures à 10 m, il est possible de voir que la méthode simplifiée n'est pas précise. En effet, les valeurs sont très dispersées. Il y a des ponts non-sécuritaires avec des ratios supérieurs à 1, mais également un large échantillon de ponts qui sont trop conservateurs. Pour les portées supérieures à 10 m, la méthode simplifiée prédit mieux les efforts de cisaillement, car les points se retrouvent dans un faisceau plus fin. De plus, les valeurs des ratios se situent près de 1. Cependant, à ces portées, il y a également un nombre important de ponts dont les valeurs des analyses dépassent 1. Il serait donc favorable de ramener ces ponts du côté sécuritaire, car la méthode simplifiée doit généralement donner des efforts conservateurs.

Afin de mieux caractériser l'échantillon, les Tableau 4-25 et Tableau 4-26 présentent les paramètres statistiques associés à chaque type de poutres en fonction de la portée. Il est alors possible de décortiquer l'effet de la variation de la portée sur la qualité de la méthode simplifiée. De plus, de cette façon, il est également possible de mieux caractériser l'effet de la portée sur chacun des types de poutres.

Tableau 4-25 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
3 m	0.53	0.311	0.584	1.511
5 m	0.57	0.307	0.540	1.401
10 m	0.54	0.282	0.524	1.631
15 m	0.55	0.225	0.406	2.000
20 m	0.58	0.185	0.321	2.270
30 m	0.58	0.142	0.245	2.958

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.46	0.310	0.678	1.742
15 m	0.47	0.248	0.534	2.137
20 m	0.48	0.218	0.458	2.385
30 m	0.54	0.177	0.324	2.599

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
3 m	0.64	0.444	0.692	0.811
5 m	0.57	0.386	0.683	1.114
10 m	0.57	0.300	0.522	1.433
15 m	0.55	0.236	0.427	1.907
20 m	0.55	0.201	0.366	2.239
30 m	0.59	0.151	0.256	2.715

Tableau 4-26 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
3 m	0.79	0.090	0.113	2.333
5 m	0.77	0.183	0.236	1.257
10 m	0.71	0.140	0.197	2.071
20 m	0.70	0.111	0.158	2.703
40 m	0.65	0.125	0.194	2.800
60 m	0.58	0.121	0.208	3.471

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
3 m	-	-	-	-
5 m	-	-	-	-
10 m	0.77	0.145	0.188	1.586
20 m	0.71	0.117	0.164	2.479
40 m	0.71	0.131	0.185	2.214
60 m	0.62	0.132	0.214	2.879

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
3 m	0.78	0.121	0.155	1.818
5 m	0.79	0.242	0.308	0.868
10 m	0.76	0.142	0.187	1.690
20 m	0.70	0.118	0.168	2.542
40 m	0.70	0.137	0.196	2.190
60 m	0.61	0.138	0.228	2.826

Plusieurs constats peuvent être dressés à partir des statistiques :

- les portées courtes comportent des écarts-types et des coefficients de variation très élevés;
- les biais sont très faibles pour toutes les portées;
- l'augmentation de la portée n'améliore pas nécessairement le biais;
- les résultats sont similaires pour les trois types de ponts.

4.6.2.2 Effet de l'espacement des poutres

L'espacement des poutres est un paramètre qui est considéré dans le calcul du facteur d'essieu du cisaillement. Il intervient notamment directement dans le calcul de γ_c et dans le calcul même de F_t. La Figure 4.24 présente l'influence de l'espacement des poutres sur les résultats des analyses pour l'effort tranchant alors que le Tableau 4-27 présente les résultats des statistiques en fonction de l'espacement des poutres.

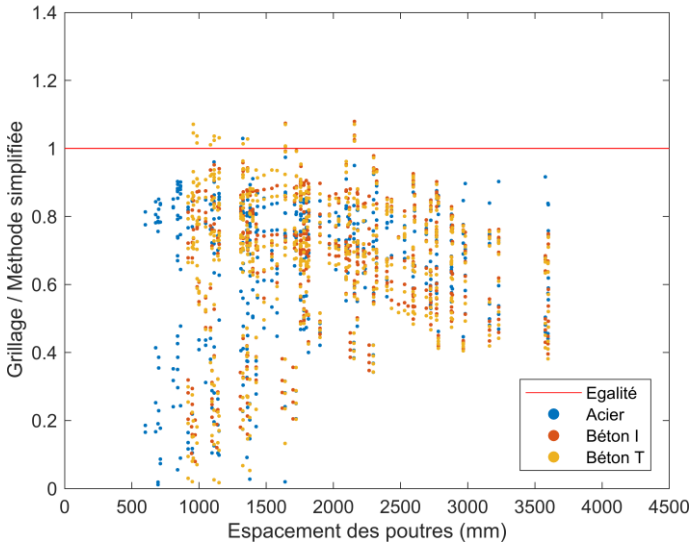


Figure 4.24 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Ensemble des données

Tableau 4-27 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples

Espacement des poutres	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
0.6 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.57	0.302	0.530	1.424
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.62	0.242	0.392	1.570
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.68	0.181	0.266	1.768
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.70	0.135	0.192	2.222
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.68	0.116	0.170	2.759
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.66	0.132	0.201	2.576
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.64	0.139	0.218	2.590

Espacement des poutres	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.48	0.290	0.603	1.793
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.59	0.258	0.436	1.589
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.69	0.199	0.289	1.558
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.73	0.141	0.194	1.915
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.68	0.130	0.192	2.462
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.68	0.116	0.170	2.759
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.62	0.121	0.196	3.140

Espacement des poutres	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.58	0.335	0.577	1.254
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.65	0.256	0.395	1.367
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.71	0.177	0.248	1.638
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.72	0.142	0.197	1.972
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.67	0.133	0.200	2.481
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.61	0.126	0.206	3.095
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.57	0.120	0.211	3.583

Les tendances sont similaires que pour l'ÉLU sauf que le nombre de dépassements de la méthode simplifiée est beaucoup réduit. Les principaux constats sont :

- l'écart-type de la méthode simplifiée s'améliore avec l'augmentation de l'espacement des poutres;
- les dépassements de la méthode simplifiée surviennent seulement pour des espacements inférieurs à 2.5 m;
- les poutres en acier ne comportent pas de dépassements;
- les biais sont faibles pour tous les espacements de poutres.

4.6.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour la flexion, une analyse des efforts maximaux est effectuée. En effet, pour la conception au cisaillement, un seul type de poutre est choisi pour le tablier. La comparaison des résultats maximaux issus des deux méthodes est présentée sur la Figure 4.25.

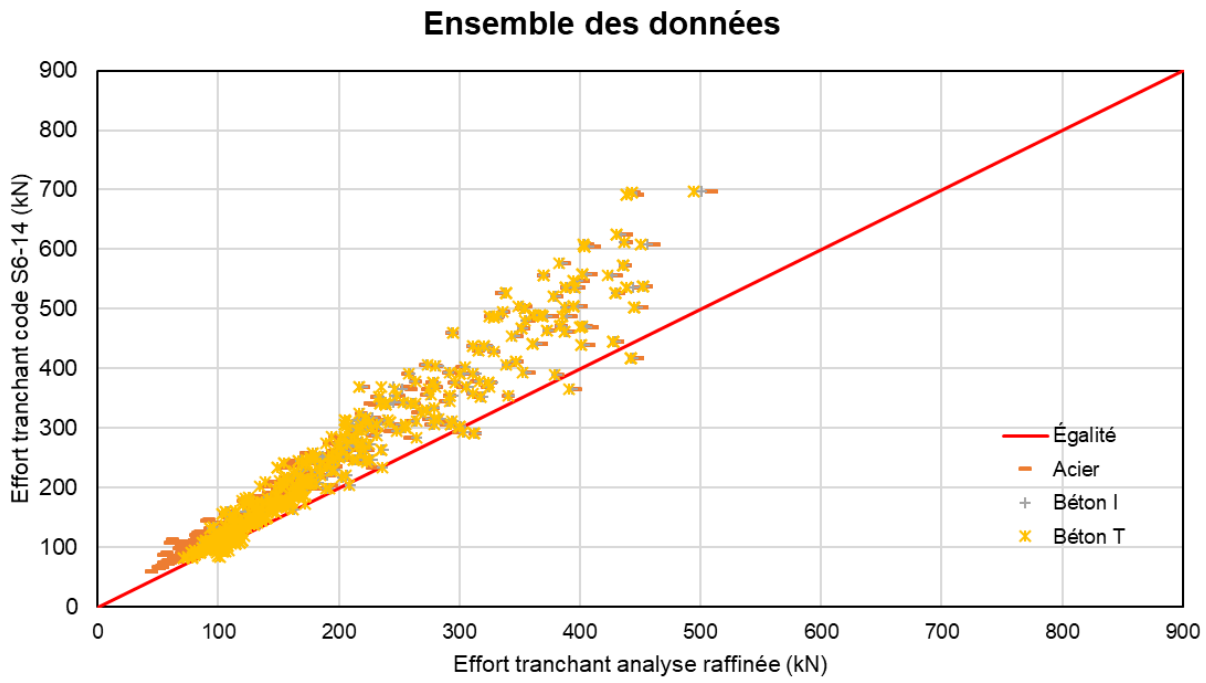


Figure 4.25 Comparaison des valeurs maximales pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Ensemble des données – Portées simples

Il est d'abord possible d'observer que la tendance globale des valeurs maximale se rapproche plus 1 de celle des poutres intérieures que des poutres extérieures. En effet, les cas avec la géométrie problématique sont absents et les cas de dépassements sont présents. L'impact de cet effet sur les paramètres statistiques est présenté au Tableau 4-28.

Tableau 4-28 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples

Types de poutres	Position poutre	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.795	0.068	0.085	3.015
Poutres en béton I	**Max**	0.790	0.083	0.105	2.530
Poutres en béton T	**Max**	0.810	0.098	0.121	1.939

La prise en considération des maximums permet d'atténuer la tendance quadratique des points. En effet, les points suivent plus la courbe d'égalité. Par contre, la dispersion des points reste élevée particulièrement pour les valeurs d'efforts plus grandes. Par contre, en moyenne les écarts-types sont acceptables. De plus, les résultats sont également acceptables en ne considérant que les valeurs maximales. La répartition des cas critiques est présentée au Tableau 4-29.

Tableau 4-29 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception – Effort tranchant – Portée Simple – ÉLF/ÉLS-2

Types de poutres	Positon des poutres	Nombre cas	Nombre cas total	%
Poutres en acier	**Extérieure**	82	226	36%
	Intérieure	174		64%
Poutres en béton I	**Extérieure**	170	285	60%
	Intérieure	115		40%
Poutres en béton T	**Extérieure**	148	325	46%
	Intérieure	177		54%

La répartition des cas critiques est très similaire à celle à l'ÉLU. À l'ÉLF, c'est encore la poutre intérieure qui gouverne le plus souvent. Cela est dû au fait que la poutre extérieure est plus difficilement critique, car le camion est restreint quant à sa position transversale. Il ne peut qu'être positionné au milieu de la voie, alors il peut être loin de la poutre extérieure.

L'effet de l'espacement des poutres est également un paramètre qui est influencé par la considération des valeurs maximales seulement. L'effet de ce paramètre est présenté à la Figure 4.26.

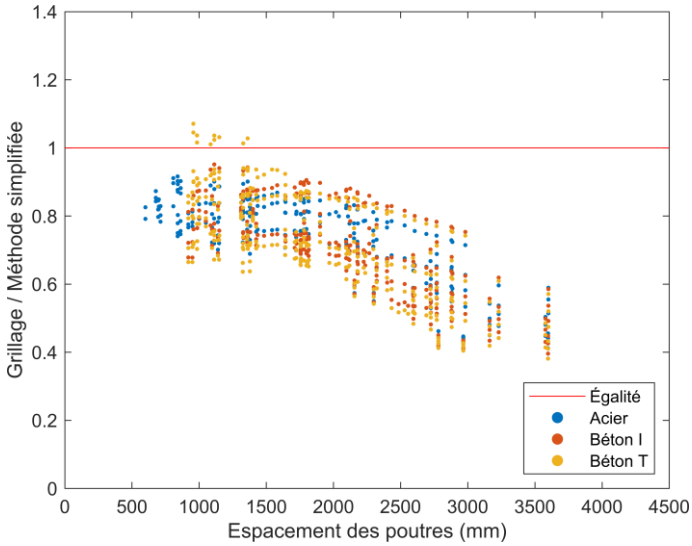


Figure 4.26 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée simple – Valeurs maximales

Il est possible de voir que le fait de considérer seulement les valeurs maximales élimine les cas de biais trop faibles attribuable à une poutre extérieure avec des espacement de poutre longues et des porte-à-faux courts. Les tendances sont alors plus claires tel que pour le fait que le biais diminue avec l'augmentation de l'espacement des poutres.

CHAPITRE 5 ANALYSE DES PORTÉES CONTINUES

5.1 Introduction

Ce chapitre traite de l'analyse des ponts à portées continues. Deux types de portées continues ont été analysés : 2 travées et 3 travées. Le chapitre sera donc divisé selon ces types de portées continues.

5.2 Étude des ponts à deux travées

5.2.1 Résumé des paramètres considérés

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée avec la méthode raffinée du grillage pour les portées continues de deux travées. Les résultats de l'analyse paramétrique ont été basés sur les ponts synthétiques ayant les paramètres suivants :

- nombre de voie n : 1 à 4;
- portée L, ponts à une voie (n = 1) : 10, 15, 20 et 30 m;
- portée L, ponts de deux à quatre voies (n = 2, 3 et 4) : 10, 20, 30, 40 et 60 m;
- nombre de poutres N : 3, 4, 5, 6 et 8 poutres;
- type de poutres : poutres en acier en I, poutres en béton précontraint en I, poutres en béton en T monolithiques;
- largeur carrossable W_c :
    - 1 voie : 3.3 m, 4.8 m et 5.9 m;
    - 2 voies : 6 m, 8.0 m et 9.9 m;
    - 3 voies : 10 m, 11.75 m, et 13.4 m;
    - 4 voies : 13.5 m, 15.25 m et 16.9 m;
- longueur du porte-à-faux S_c : 0.5S et 0.6S;
- conditions de chargement : 1 à n voies pour l'état limite ultime et l'état limite de service de type 1 (ÉLU et ÉLS-1) et une voie chargée pour l'état limite de fatigue et l'état limite de service de type 2 (ÉLF et ÉLS-2);
- rapport des travées L_2/L_1 : 1.0, 1.25 et 1.5.

Après les filtres, 591 ponts à 1 voie et 1584 ponts à deux voies et plus ont été analysés dans cette étude paramétrique, soit un total de 2175 ponts continus de deux travées.

5.2.2 Moment fléchissant à l'ÉLU et ÉLS-1

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour les moments fléchissants à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à deux travées.

5.2.2.1 Ensemble des résultats

Comme au chapitre précédent, les efforts de flexion obtenus par le grillage sont comparés à ceux issus de la méthode simplifiée. Cependant, pour les ponts continus, il y a plusieurs efforts de flexion à considérer : le moment de flexion positif à la travée 1, le moment de flexion positif de la travée 2 et le moment de flexion négatif à l'appui intermédiaire. À cette fin, ces trois moments de flexion ont été déterminés avec la méthode du grillage et la méthode simplifiée. La comparaison des efforts de flexion positifs de la première travée (de portée égale ou plus courte à la seconde travée) est illustrée sur la Figure 5.1 alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-1.

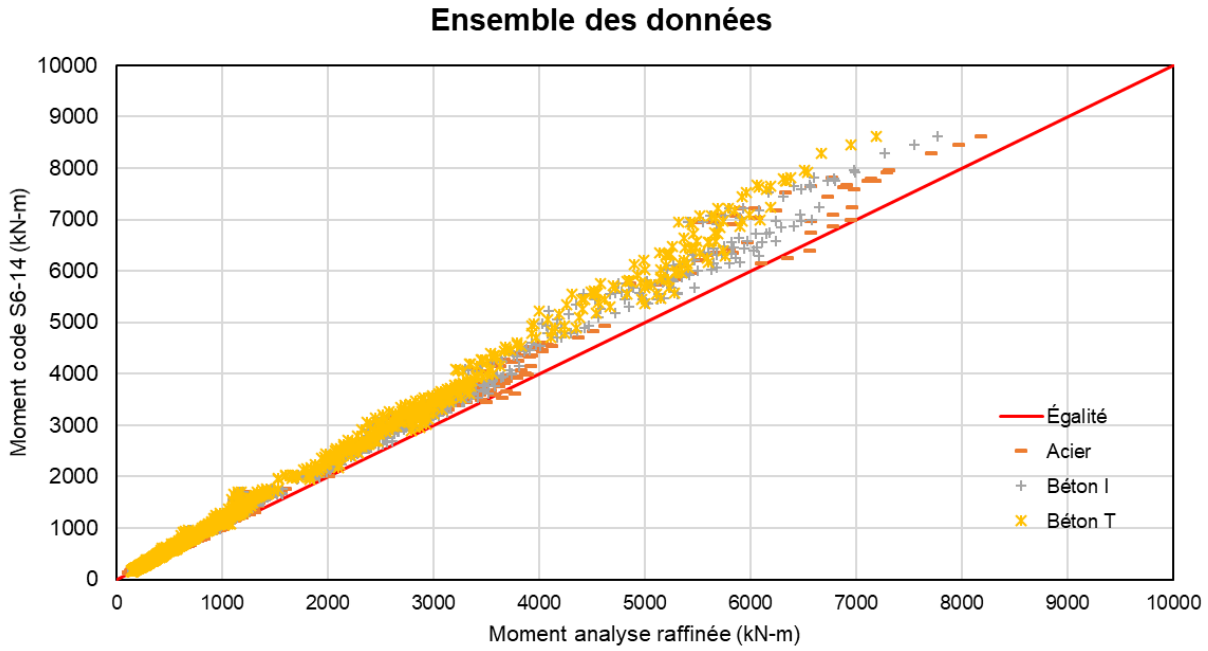


Figure 5.1 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 1 – Ensemble des données

Tableau 5-1 Résultats statistiques pour le moment positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 1

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.920	0.048	0.052	0.920
	Intérieure	0.894	0.057	0.063	0.894
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.904	0.036	0.040	0.904
	Intérieure	0.887	0.052	0.058	0.887
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.861	0.032	0.037	0.861
	Intérieure	0.858	0.051	0.059	0.858

Pour les trois matériaux, il est possible de voir que la méthode simplifiée de la norme CSA S6-14 est généralement légèrement conservatrice, mais elle reflète bien la distribution réelle des efforts. En effet, la majorité des points représentant les ponts se trouve dans la portion sécuritaire de la courbe et ceux-ci suivent bien la ligne d'égalité. Seulement quelques ponts sont non-sécuritaires. Ces ponts sont des ponts avec des poutres très espacées comportant typiquement trois poutres. Les efforts sont alors concentrés dans certaines poutres et il y a peu de répartition entre les poutres ce qui entraîne que le grillage indique des plus grands efforts que la méthode simplifiée.

Le constat que la méthode simplifie du Code canadien S6 est conservatrice est également appuyé par les statistiques. En effet, la moyenne dans tous les cas est inférieure à 1 et la dispersion est relativement faible. Pour les ponts à poutres en béton en I et en T, les efforts fournis par la méthode simplifiée sont même trop conservateurs. Sur la Figure 5.1, ceux-ci sont représentés par la famille de points qui sont les plus éloignés de la droite d'égalité. Cependant, généralement autant pour la poutre intérieure qu'extérieure, la méthode est satisfaisante. Le biais est près de 0.9 et l'écart-type et le coefficient de variation sont faibles. Cependant, il y a des légères différences entre les matériaux. En effet, plus la poutre est rigide en torsion, plus les ratios sont réduits. Les ponts à poutres en béton T ont les valeurs biais les plus faibles tandis que les ponts à poutres en acier ont les biais les plus élevés. Cela est expliqué par le fait qu'une meilleure rigidité en torsion entraîne une meilleure répartition des efforts entre les poutres. Par contre, les valeurs statistiques de dispersion sont très similaires entre les trois types de ponts. Cet effet est présent autant le biais que

le coefficient de variation. La méthode simplifiée est donc bien adaptée aux trois types de ponts, mais elle est plus optimale pour les ponts à poutres en acier.

Ensuite, la précision de la méthode simplifiée sur le moment de flexion positif de la travée 2 est évaluée. Dans la méthode simplifiée, seule la longueur L_e change entre les deux cas. La comparaison des efforts de flexion positifs de la deuxième travée (de longueur égale ou supérieure à la première travée) est illustrée sur la Figure 5.2 alors que les statistiques sont présentées au Tableau 5-2.

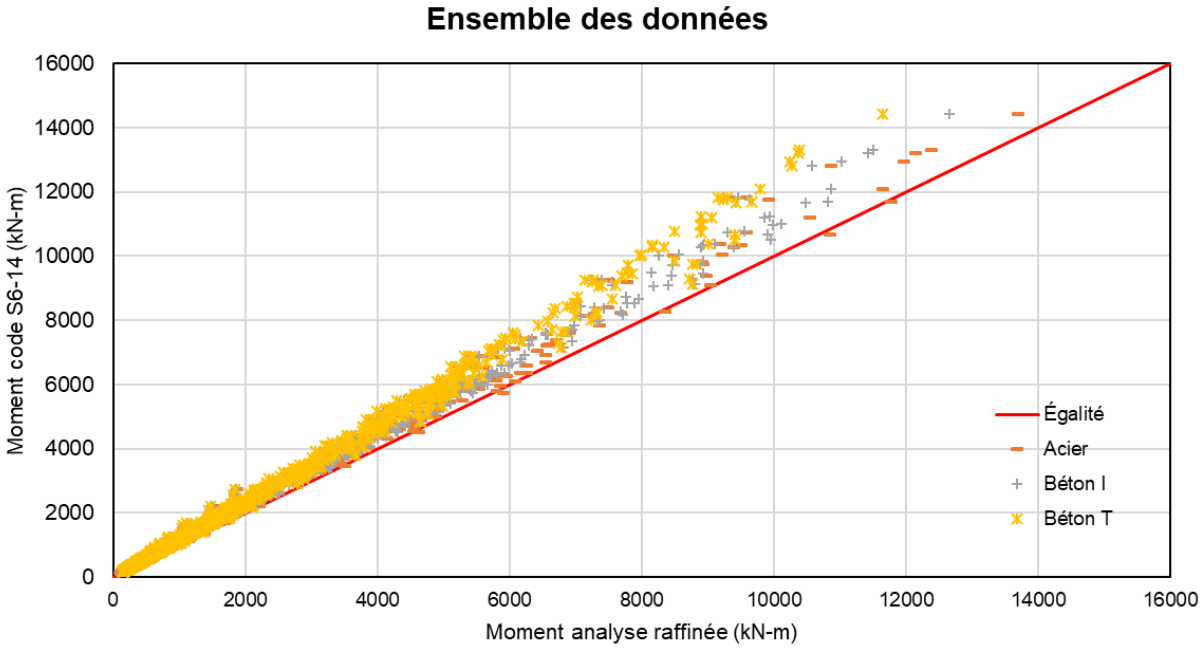


Figure 5.2 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 2 – Ensemble des données

Tableau 5-2 Résultats statistiques pour le moment positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Travée 2

Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.907	0.050	0.055	1.866
	Intérieure	0.878	0.058	0.066	2.095
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.890	0.036	0.041	3.042
	Intérieure	0.874	0.054	0.062	2.347
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.846	0.030	0.036	5.052
	Intérieure	0.845	0.053	0.063	2.917

À travers les résultats, les tendances sont similaires à la flexion de la travée 1. En comparant la Figure 5.1 et la Figure 5.2, il est possible de voir que la dispersion des points se ressemble entre les deux travées. La majorité des ponts restent conservateurs. Par contre, il y a moins de cas de dépassement dans le cas de la travée 2. Pour les paramètres statistiques, les résultats sont également très similaires et les tendances sont identiques.

Les moments de flexion négatifs à l'appui central du grillage sont comparés à ceux obtenus par la méthode simplifiée. La comparaison des efforts est illustrée sur la Figure 5.3 alors que les statistiques sont présentées au Tableau 5-3.

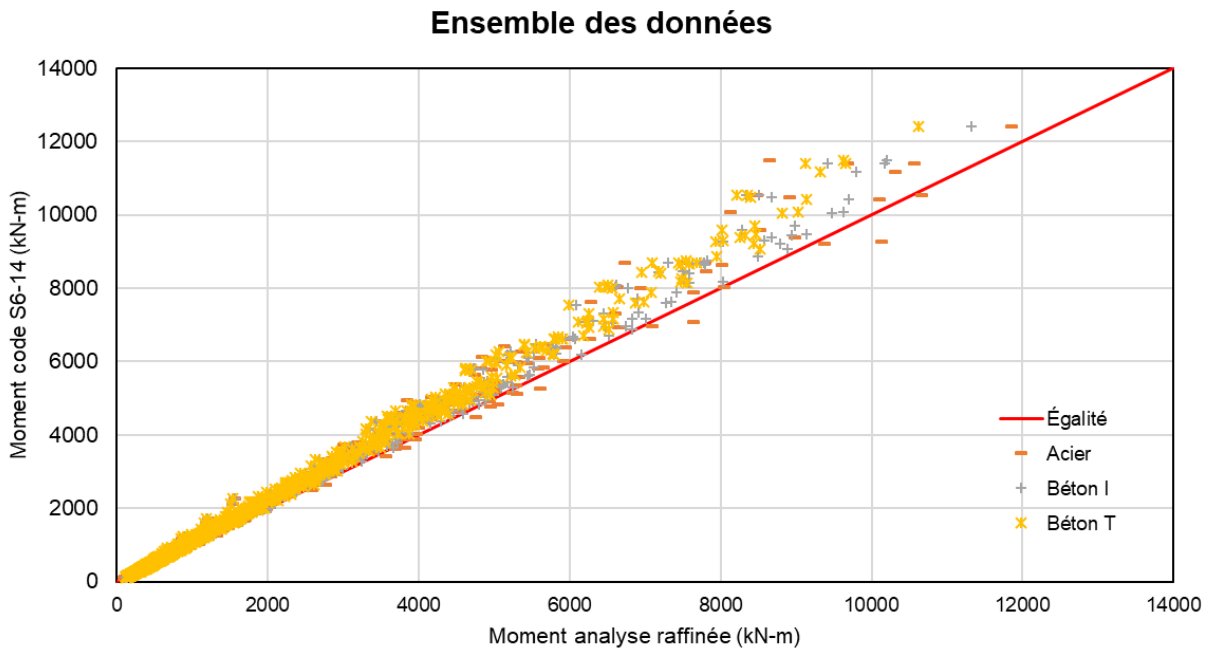


Figure 5.3 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-3 Résultats statistiques pour le moment négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées

Type de poutres	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.961	0.058	0.061	0.672
	Intérieure	0.919	0.076	0.083	1.066
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.970	0.051	0.052	0.588
	Intérieure	0.934	0.070	0.075	0.943
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.941	0.052	0.056	1.135
	Intérieure	0.910	0.069	0.075	1.304

Sur la Figure 5.3, il est possible d'observer que les points sont situés plus près de l'égalité que dans les cas de la flexion positive représentés sur la Figure 5.1 et la Figure 5.2. Il y a également plus de cas de dépassement à la flexion négative qu'à la flexion positive. Cependant, en regardant le Tableau 5-3, il est possible de confirmer ce constat par rapport aux cas de dépassement, car les résultats sont tous très près de 1 pour les trois matériaux. Ce constat est particulièrement observable dans le cas des ponts à poutres en béton I dont les ratios sont les plus élevés. Ces dépassements

sont corrélés avec la portée des ponts analysés. Les tendances associées à ces portées seront abordées à la section 5.2.2.2.1. Les résultats observés sont similaires entre les matériaux. La rigidité torsionnelle ne serait donc pas un paramètre à ajouter à la norme pour l'évaluation de la flexion négative. Les prédictions de la méthode simplifiée en moment négatif sont satisfaisantes pour tous les types de tabliers analysés. Les coefficients de variation sont faibles tandis que le biais s'approche de 1.

5.2.2.2 Analyse des paramètres géométriques

Cette section présente l'effet des différents paramètres étudiés sur les résultats d'analyse pour les 3 moments de flexion des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à deux travées.

5.2.2.2.1 Effet de la portée

Dans les équations de la méthode simplifiée, le concept de portée équivalente L_e est utilisé afin de calibrer le facteur D_T. Cela permet de prendre en compte la différence quant à la répartition des types de moments fléchissant. Par exemple, le code différencie la répartition des moments de flexion positifs et négatifs. La Figure 5.4 présente la façon dont le Code définit ce paramètre.

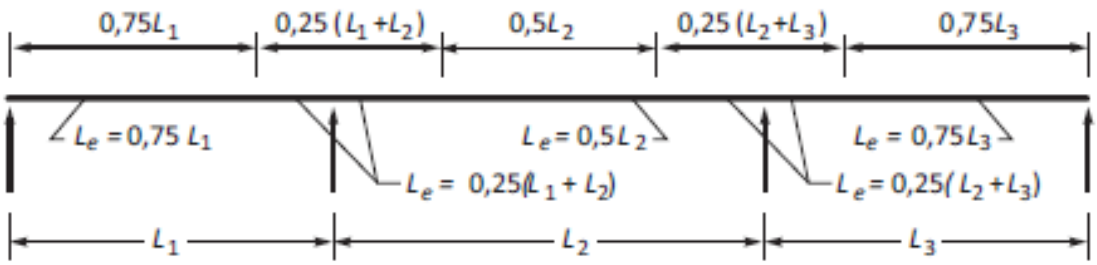
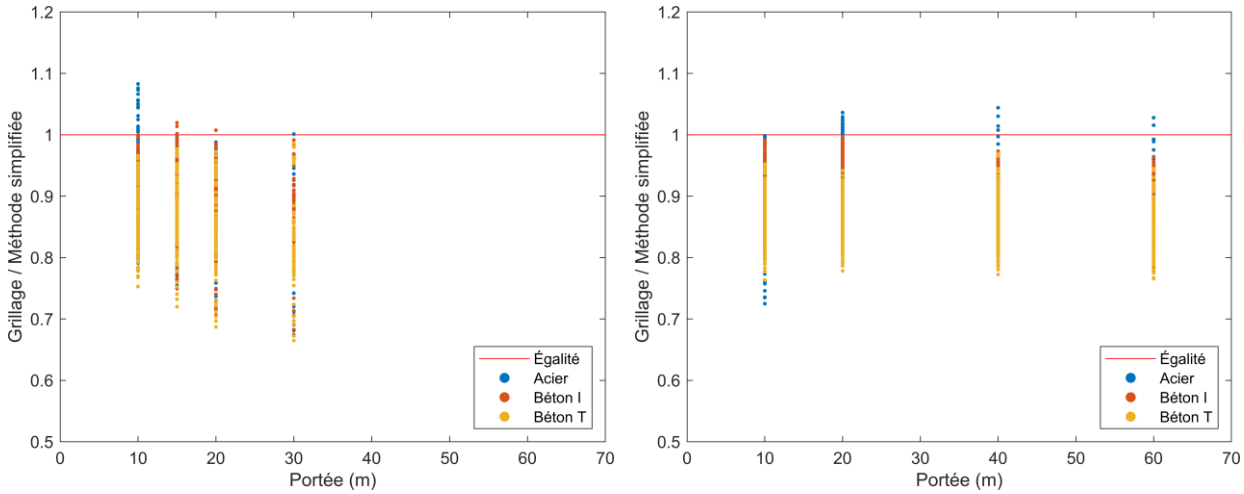


Figure 5.4 Valeur du paramètre L_e pour les portées continues (Tiré de CSA S6-14)

Il est donc pertinent de valider cette approche. Pour chacun des efforts de flexion critiques (moment positif de la travée 1, moment positif de la travée 2 et moment négatif à l'appui), les résultats des analyses sont corrélés à la portée.

Pour le cas présent, puisque les ponts à 1 voie ont été modélisés avec des portées différentes, la présentation des résultats est séparée en 2 : les ponts à 1 voie et les ponts à plus d'une voie.

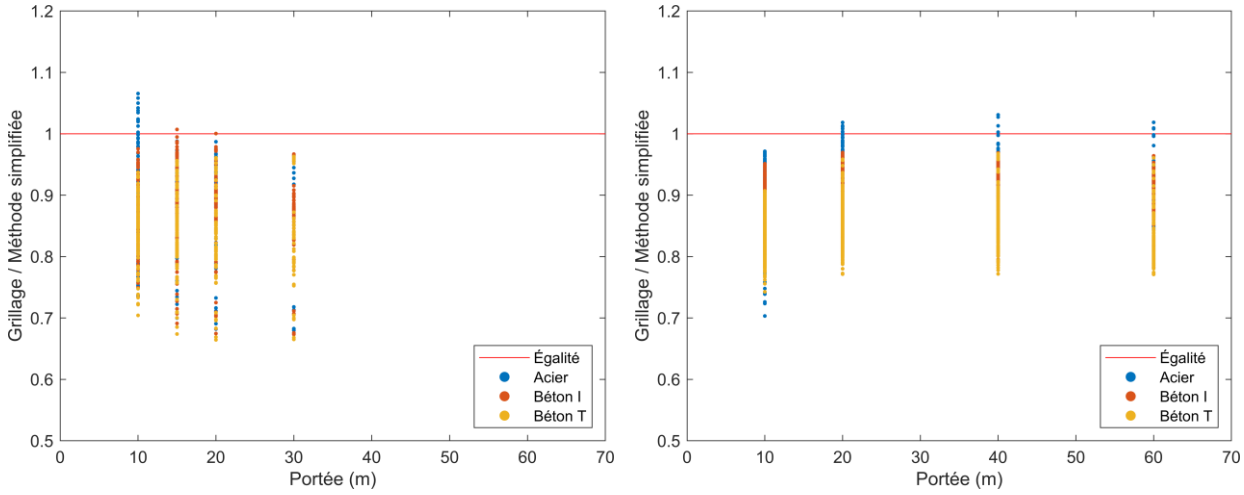
Premièrement, les moments de flexion positifs seront analysés. La Figure 5.5 et la Figure 5.6 présentent la comparaison des efforts de flexion positive entre les deux méthodes.



1 voie

2 voies à 4 voies

Figure 5.5 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 1



1 voie 2 voies à 4 voies

Figure 5.6 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 2

Tout d'abord, il est possible d'observer que les tendances sont similaires entre les travées 1 et 2. Les valeurs de biais entre les graphiques présentent les mêmes tendances. La norme est généralement satisfaisante pour prédire le moment fléchissant positif autant pour la travée 1 que pour la travée 2, car la majorité des points se situent en bas de 1. Il n'y a que certains cas où il y a dépassement et celui-ci est faible avec la plus grande valeur se situant près de 1.05. Ensuite, les résultats montrent que les valeurs maximales du biais pour la flexion positive sont corrélées à la portée pour les trois types de poutres. Pour les ponts à 1 voie, le biais diminue avec l'augmentation de la portée. Cela est autant visible dans les statistiques que sur la distribution des points. Les ponts à une voie présentent aussi la caractéristique que seuls les ponts à poutres en acier ont des cas non conservateurs. Pour les ponts à deux voies et plus, la relation est plutôt linéaire avec les valeurs maximales de biais qui croissent avec la portée. La présence de plusieurs cas non conservateurs pour les ponts à deux voies et plus montre que la méthode simplifiée du Code S6 n'est pas assez critique pour certaines configurations de portées continues de 20 m et plus. Cela est particulièrement observable pour les ponts à poutres en acier. Afin de vérifier ces tendances, les paramètres statistiques en fonction de portée sont présentés du Tableau 5-4 au Tableau 5-7.

Tableau 5-4 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 1 voie – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.91	0.066	0.073	1.428
15 m	0.91	0.054	0.059	1.654
20 m	0.89	0.074	0.082	1.427
30 m	0.83	0.131	0.157	1.278

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.89	0.048	0.054	2.339
15 m	0.90	0.054	0.059	1.790
20 m	0.89	0.061	0.068	1.785
30 m	0.87	0.077	0.089	1.738

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.86	0.046	0.054	2.987
15 m	0.86	0.051	0.060	2.629
20 m	0.85	0.056	0.066	2.780
30 m	0.82	0.073	0.089	2.490

Tableau 5-5 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.89	0.050	0.055	2.140
20 m	0.92	0.042	0.045	1.866
40 m	0.91	0.048	0.052	1.852
60 m	0.97	0.076	0.078	0.437

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.89	0.042	0.047	2.544
20 m	0.90	0.036	0.040	2.683
40 m	0.90	0.037	0.041	2.676
60 m	0.88	0.043	0.049	2.656

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.86	0.038	0.045	3.551
20 m	0.87	0.029	0.034	4.563
40 m	0.86	0.036	0.042	3.804
60 m	0.84	0.040	0.047	4.025

Tableau 5-6 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 1 voie – Travée 2

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.89	0.067	0.076	1.699
15 m	0.90	0.081	0.091	1.277
20 m	0.89	0.081	0.092	1.389
30 m	0.82	0.128	0.156	1.409

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.86	0.050	0.058	2.783
15 m	0.88	0.064	0.073	1.864
20 m	0.88	0.064	0.073	1.864
30 m	0.85	0.075	0.087	1.956

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.85	0.046	0.055	3.348
15 m	0.83	0.060	0.072	2.753
20 m	0.83	0.060	0.072	2.753
30 m	0.82	0.072	0.088	2.538

Tableau 5-7 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 2

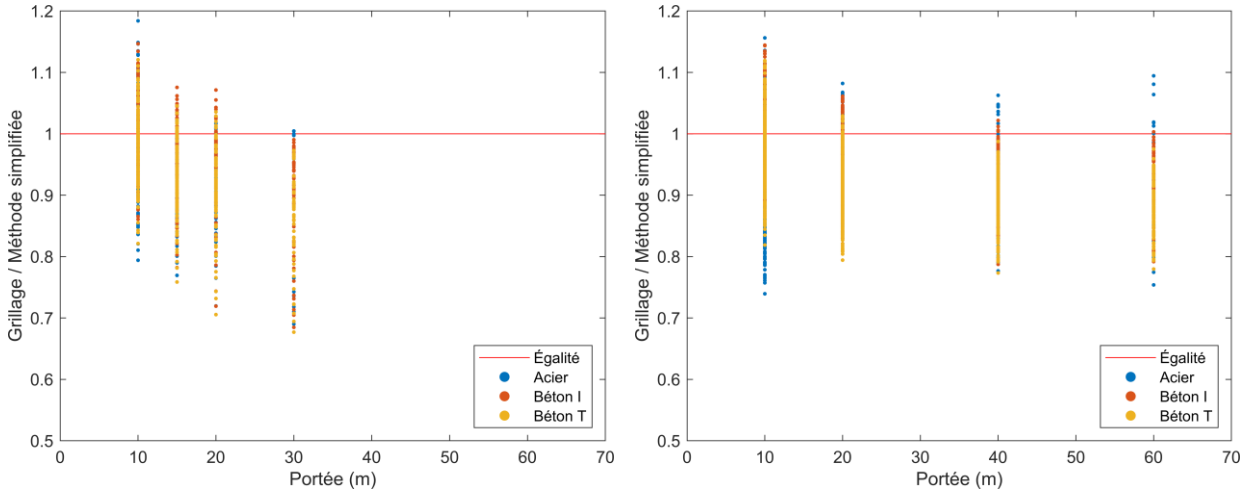
	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.87	0.048	0.055	2.671
20 m	0.91	0.039	0.043	2.231
40 m	0.91	0.052	0.057	1.717
60 m	0.97	0.075	0.077	0.420

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.87	0.039	0.044	3.405
20 m	0.89	0.034	0.038	3.113
40 m	0.90	0.039	0.044	2.599
60 m	0.88	0.043	0.048	2.767

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.84	0.034	0.040	4.841
20 m	0.86	0.032	0.037	4.454
40 m	0.86	0.039	0.045	3.699
60 m	0.83	0.043	0.051	3.916

Les statistiques confirment les tendances observées. Tout d'abord, les valeurs de statistiques pour la flexion positive sont similaires entre les trois types de poutres pour chacune des portées. Les tendances en fonction de la portée se ressemblent également. Pour les trois matériaux de poutres, les prédictions issues de la méthode de la norme CSA S6-14 sont précises avec de faibles coefficients de variation et celles-ci sont justes, car les biais sont près de 1 pour toutes les portées. La performance de la méthode simplifiée semble également peu corrélée à la portée, car autant pour les ponts à une voie que les ponts à deux voies et plus, les statistiques sont similaires entre les portées. Il n'y a donc que peu d'influence entre la portée et la performance de la méthode simplifiée.

Les résultats se ressemblent entre la travée 1 et la travée 2, autant pour les valeurs que pour les tendances. Même lorsque la travée 2 est plus longue que l'autre, la méthode simplifiée parvient tout de même à bien prédire les efforts de flexion. La formulation du paramètre L_e tel que présentée dans la norme CSA S6-14 est donc valide pour analyser la flexion positive des ponts continus à 2 travées. La Figure 5.7 présente graphiquement les résultats pour la flexion en moment négatif en fonction de portée alors que le Tableau 5-8 et le Tableau 5-9 présentent les résultats statistiques.



1 voie

2 voies et plus

Figure 5.7 Influence de la portée sur le moment fléchissant négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-8 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue à 2 travées – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.98	0.058	0.059	0.345
15 m	0.95	0.052	0.055	0.962
20 m	0.94	0.073	0.078	0.822
30 m	0.86	0.129	0.151	1.085

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	1.01	0.057	0.056	-0.175
15 m	0.96	0.051	0.053	0.784
20 m	0.94	0.064	0.067	0.938
30 m	0.89	0.083	0.092	1.325

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.99	0.055	0.056	0.182
15 m	0.93	0.049	0.053	1.429
20 m	0.91	0.061	0.067	1.475
30 m	0.86	0.073	0.085	1.918

Tableau 5-9 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue à 2 travées – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.93	0.078	0.084	0.889
20 m	0.95	0.055	0.058	0.999
40 m	0.92	0.067	0.072	1.170
60 m	0.95	0.095	0.100	0.512

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.99	0.057	0.058	0.148
20 m	0.94	0.050	0.053	1.142
40 m	0.92	0.045	0.049	1.859
60 m	0.91	0.050	0.055	1.860

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.97	0.058	0.060	0.544
20 m	0.92	0.045	0.050	1.856
40 m	0.89	0.042	0.047	2.597
60 m	0.88	0.043	0.049	2.870

Tout d'abord, les résultats montrent que la méthode simplifiée n'est pas performante pour les portées courtes des ponts à 2 voies et plus avec des biais élevés pour les portées de 10 m et 20 m. Les biais à ces portées dépassent la marge de sécurité pour les ponts à poutres en béton. Le biais est également corrélé à la portée, car celui-ci diminue avec l'augmentation de la portée sauf pour les portées de 60 m. Par contre, dans les deux cas, les résultats à ces portées présentent une faible variabilité. Les coefficients de variation et les écarts-types sont faibles pour toutes les portées. Il est également possible d'observer que les valeurs maximales extrêmes observées sur la Figure 5.7

diminuent également avec la portée pour les ponts à une voie. Cet effet est présent sur les types de ponts analysés.

L'analyse des résultats montre que les valeurs les plus grandes sont associées à des poutres extérieures de ponts avec de larges porte-à-faux et des grands espacements de poutres, ce qui a pour effet d'augmenter les efforts dans la poutre extérieure. De plus, le fait que les poutres soient espacées entraîne que les efforts se répartissent mal. Les poutres en acier qui possèdent une faible rigidité en torsion accentuent cet effet. En combinant ces deux éléments, ces géométries amènent beaucoup d'efforts à la poutre extérieure. Le Code S6 couvre ces ponts, mais une réserve pour ces configurations pourrait être nécessaire.

5.2.2.2.2 Effet de l'espacement des poutres

Tel que mentionné, la méthode simplifiée présentée dans le Code Canadien S6 est une méthode de type *S/D* dans laquelle la répartition des efforts entre les poutres varie linéairement en fonction de leur espacement *S*. L'influence de ce paramètre est présentée de la Figure 5.8 à la Figure 5.10.

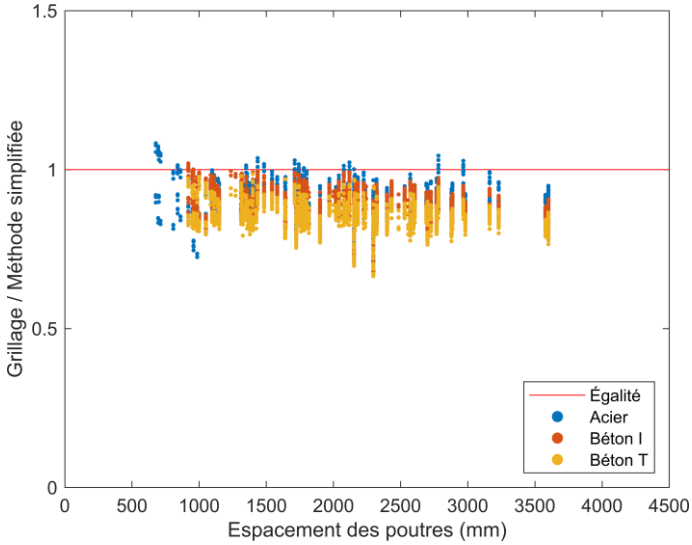


Figure 5.8 Influence de l'espacement des poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données – Travée 1 – positif

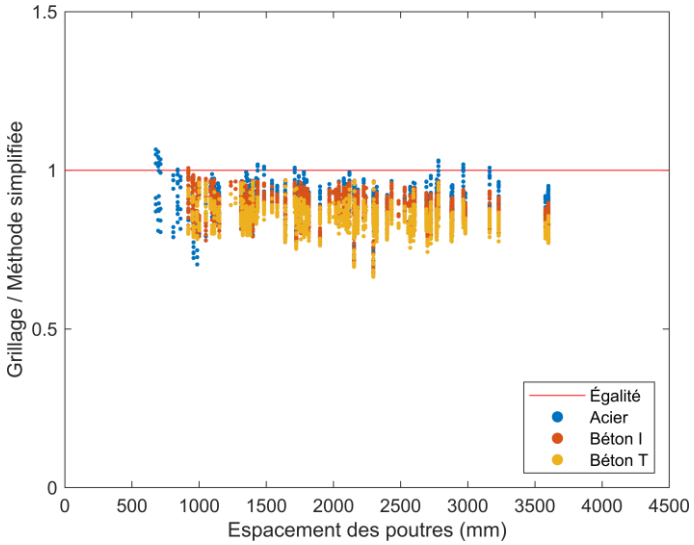


Figure 5.9 Influence de l'espacement des poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS 1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données – Travée 2 – positif

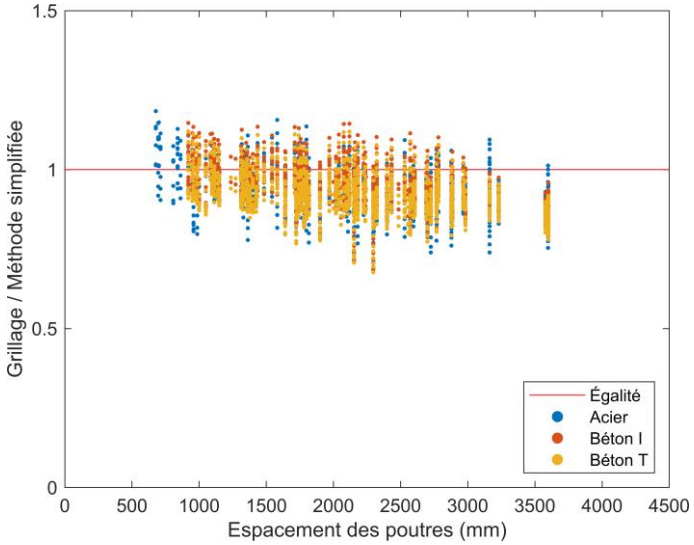


Figure 5.10 Influence de l'espacement des poutres sur le moment fléchissant négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données – Moment négatif

Il est possible de dresser plusieurs constats sur l'influence de l'espacement des poutres sur la qualité de la méthode simplifiée pour le moment fléchissant :

- les résultats sont très similaires en flexion positive entre la travée 1 et la travée 2;
- les résultats sont généralement justes et précis pour la flexion positive;
- la méthode simplifiée estime mal les efforts pour les ponts avec des poutres peu espacées autant pour la flexion positive que la flexion négative;
- les résultats pour la méthode simplifiée sont plus diffus et moins précis en flexion négative;
- la méthode conduit à beaucoup de cas non conservateurs en flexion négative.

La méthode simplifiée est donc bien adaptée pour évaluer le moment positif sauf lorsque les poutres sont peu espacées. Les résultats sont alors très dispersés et il y a plusieurs cas où la méthode n'est pas conservatrice. Pour le moment négatif, la méthode simplifiée présente plus de dispersion qu'au moment positif. La dispersion des points varie peu par contre avec l'augmentation de l'espacement des poutres sauf pour les poutres peu espacées. Dans ce cas, comme pour la flexion positive, la méthode simplifiée perd de sa précision. Une amélioration pour les poutres peu espacées serait donc intéressante à intégrer à la méthode.

5.2.3 Effort tranchant à l'ÉLU et ÉLS-1

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour l'effort tranchant à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à deux travées.

5.2.3.1 Ensemble des résultats

Dans cette section, une analyse comparative de l'effort tranchant à l'appui central issu de la méthode simplifiée et du grillage est présentée. La Figure 5.11 présente la comparaison directe des efforts tranchants exprimés en kN.

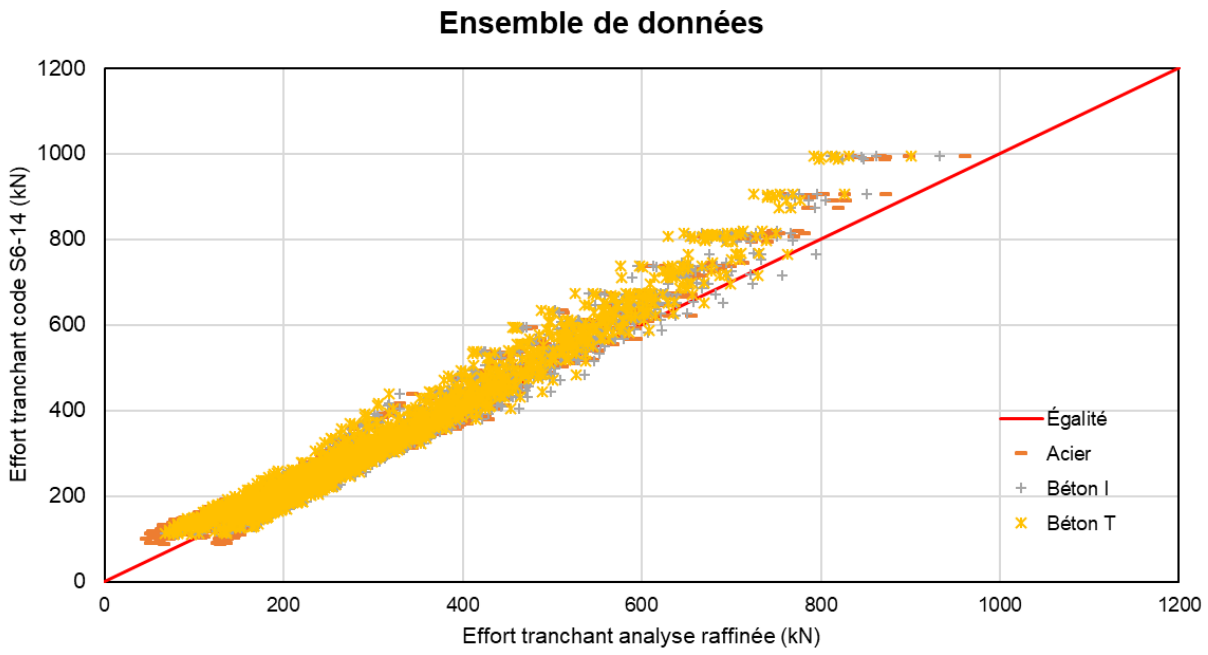


Figure 5.11 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Il est d'abord possible de voir que comme pour les portées simples, les efforts de cisaillement suivent relativement bien la droite d'égalité. La majorité des points sont encore du côté conservateur, mais il y a un plus grand nombre qui sont plutôt du côté non conservateur. Cela a pour impact de donner une moyenne plus près de 1. Il y a également un groupe spécifique de ponts qui est présent dans tous les types et dont l'effort tranchant est beaucoup sous-estimé. Ces points représentent des poutres intérieures de ponts avec peu de poutres, dont l'espacement et la longueur du porte-à-faux sont très longs et dont la portée est également longue. Les points les plus éloignés sont des ponts ayant un porte-à-faux de 1.8 m et un espacement de poutres maximal de 3.6 m. Les portées de ces ponts varient entre 40 à 60 m. Comme pour les portées simples, les paramètres statistiques associés à l'effort tranchant sont analysés et présentés au Tableau 5-10.

Tableau 5-10 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées

Type des poutres	Position des poutres	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.895	0.114	0.127	0.921
	Intérieure	1.004	0.110	0.110	-0.036
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.922	0.091	0.099	0.857
	Intérieure	0.992	0.099	0.099	0.081
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.904	0.089	0.098	1.079
	Intérieure	0.969	0.100	0.104	0.310

Les tendances sont les mêmes que pour les portées simples. Puisque le Code ne contient qu'une seule équation pour calculer l'effort tranchant, qu'il s'agisse d'une poutre extérieure ou intérieure, il n'est pas surprenant que les paramètres de biais diffèrent entre ces deux positions de poutres. En effet, en réalité, la valeur de cisaillement diffère entre ces deux positions et une seule équation ne peut être utilisée pour le calcul du cisaillement des deux poutres. Dans le cas présent, la différence entre les positions est respectivement de 11% pour les poutres en acier, de 7% pour les poutres en béton I et pour les poutres en béton T. Contrairement aux portées simples, les efforts de cisaillement sont moins surestimés par la méthode simplifiée pour les portées continues. Les biais des poutres intérieures sont satisfaisants pour les trois types de ponts analysés. Ceux-ci se situent tous près de 1 et les valeurs sont similaires.

Un paramètre qui est considéré dans le calcul des facteurs d'essieu pour le cisaillement est le nombre de voies sur le pont. Dans le Code, la valeur du paramètre D_T varie pour considérer le nombre de voies. La Figure 5.12 illustre l'influence du nombre de voies sur les efforts de cisaillement.

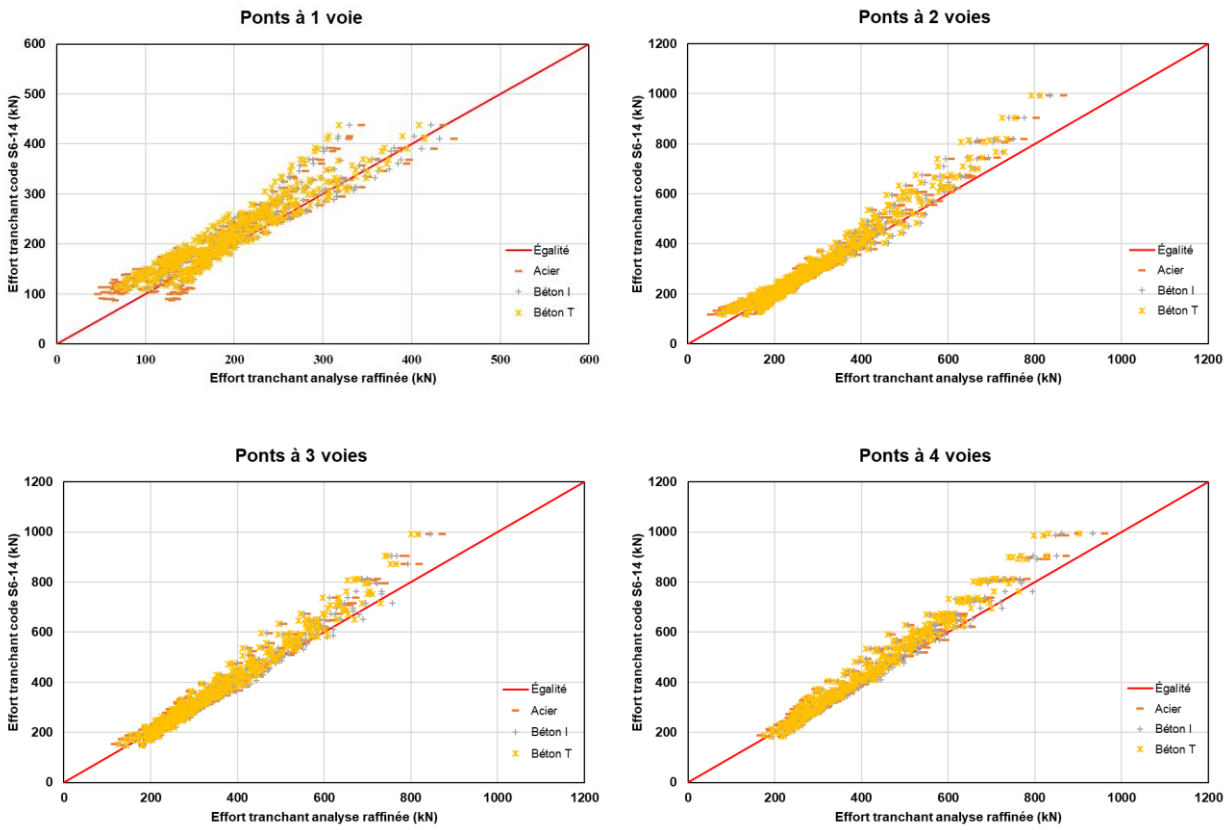


Figure 5.12 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 2 travées

Les tendances des efforts de cisaillement pour les portées continues sont similaires des portées simples pour l'effet du nombre de voies. En effet, pour les portées simples comme pour les portées continues, les ponts de 3 à 4 voies ont les mêmes tendances. Par contre, les ponts à 2 voies présentent quant à eux des caractéristiques particulières. Dans la population des ponts à 2 voies, il y a la présence d'un groupe de ponts dont le biais est assez élevé ce qui signifie que la méthode n'est pas assez conservatrice. Ces points représentent des ponts à 2 voies avec peu de poutres où les efforts obtenus sont très élevés pour la poutre intérieure. En effet, avec 2 camions positionnés de chaque côté de la poutre, les efforts de cisaillement sont concentrés sur la poutre intérieure. La méthode simplifiée a donc plus de difficulté à évaluer le cisaillement dans la poutre intérieure pour ces cas particuliers. Ces configurations de ponts ont un impact sur la moyenne et sur l'écart-type des ponts à 2 voies. Les ponts à 3 et 4 voies quant à eux possèdent les mêmes tendances et ne sont pas susceptibles à ce type de problème, mais n'ont pas été soumis à la condition de deux voies côte

à côte chargées. Les équations sont adéquates pour ces ponts, car la moyenne se rapproche de 1 et la dispersion des points est faible. Pour les ponts à 1 voie, ceux-ci sont trop conservateurs, car les points sont tous au-dessus de la ligne d'égalité. La dispersion est également acceptable. Cependant, un groupe de ponts ressort du groupe. Le groupe de points éloigné représente les poutres intérieures de ponts à faible espacement, à courte portée et à court porte-à-faux. Pour ces ponts, l'espacement le plus faible est de 600 mm tandis que pour les ponts à 2 voies, cette valeur augmente à 900 mm. La présence de ce groupe de points s'explique par le fait que ce type de ponts présente une distribution particulière des efforts de cisaillement. Pour les portées courtes, la configuration du CL-625 qui gouverne le cas de charge sont 1 à 2 essieux. De plus, avec un petit porte-à-faux, la poutre extérieure se retrouve sous le chasse-roue ce qui entraîne qu'elle reprend moins d'efforts de cisaillement. Avec le faible espacement des poutres, cette configuration de charge et le court porte-à-faux, les poutres extérieures reprennent moins de charge tandis que les poutres intérieures deviennent plus chargées. Les données statistiques de l'effet du nombre de voie sur celles-ci sont présentées au Tableau 5-11.

Tableau 5-11 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 selon le nombre de voies – Portées continues à 2 travées

	Type des poutres	Position des poutres	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.854	0.163	0.191	0.894
		Intérieure	0.942	0.158	0.168	0.364
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.902	0.122	0.135	0.800
		Intérieure	0.917	0.100	0.109	0.828
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.886	0.118	0.133	0.962
		Intérieure	0.899	0.107	0.120	0.941
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.893	0.113	0.127	0.945
		Intérieure	1.038	0.084	0.081	-0.455
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.916	0.089	0.097	0.948
		Intérieure	1.036	0.091	0.088	-0.395
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.897	0.088	0.098	1.168
		Intérieure	1.015	0.093	0.092	-0.159
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.936	0.080	0.085	0.801
		Intérieure	1.020	0.066	0.064	-0.307
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.953	0.074	0.077	0.640
		Intérieure	1.014	0.077	0.076	-0.186
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.933	0.073	0.078	0.923
		Intérieure	0.988	0.077	0.078	0.157
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.940	0.076	0.081	0.781
		Intérieure	0.998	0.058	0.058	0.032
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.952	0.075	0.079	0.634
		Intérieure	0.988	0.068	0.069	0.176
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.931	0.073	0.078	0.949
		Intérieure	0.960	0.067	0.070	0.597

Tout d'abord, les statistiques confirment les tendances relevées. Le comportement des ponts de 2 voies diffère de celui des ponts à 3 et 4 voies. Les coefficients de variation des ponts à 3 et 4 voies sont similaires pour les poutres intérieures tandis que pour les ponts à 2 voies, celles-ci sont plus élevées. La méthode est donc plus adaptée pour des ponts à 3 et 4 voies. Les biais se ressemblent également pour les ponts de 3 et 4 voies tandis que celui-ci est différent pour les ponts à 2 voies.

Une autre tendance qu'il est possible de confirmer est le conservatisme des ponts à 1 voie. Celui-ci est observable dans les statistiques par les biais en-dessous de 1. De plus, les biais sont plus faibles pour ces ponts que pour ceux à 2 voies et plus. Ces biais indiquent que la méthode simplifiée surestime en moyenne l'effort tranchant. Les coefficients de variation sont également élevés pour les ponts à 1 voie ce qui signifie un manque de précision dans la méthode.

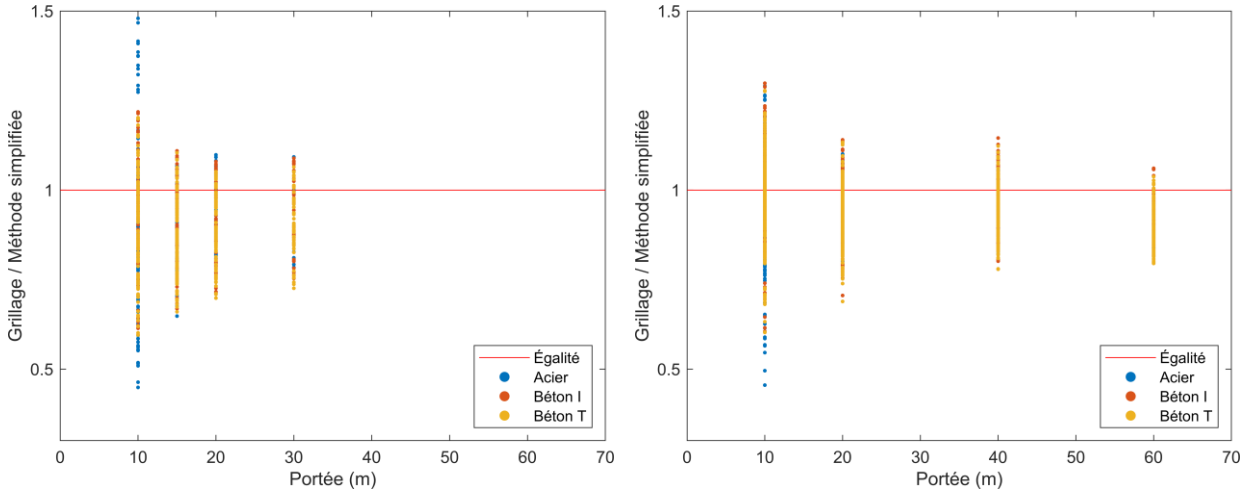
La méthode simplifiée performe donc mal pour évaluer les efforts de cisaillement des poutres extérieures pour tous nombres de voies. Les biais sont trop faibles tandis que les coefficients de variation sont élevés. Pour les poutres intérieures, l'effort tranchant des ponts à 1 voie est mal prédit par la méthode simplifiée. Les biais indiquent une surestimation des efforts alors que le coefficient de variation élevé témoigne d'une trop grande dispersion. Les ponts à 2 voies quant à eux sont mieux évalués que les ponts à 1 voies. Cependant, ils n'atteignent pas la précision des ponts à 3 voies et plus. Les statistiques sont très satisfaisantes pour les ponts à 3 voies et plus. Les biais sont tous près de 1 et les coefficients de variation sont très faibles, aucun ne dépassant 0.1 ce qui est idéal. Une calibration pour les ponts à 1 voie et 2 voies pourrait être intéressante tandis qu'elle est déjà optimale pour les ponts à 3 voies et plus.

5.2.3.2 Analyse des paramètres géométriques

Cette section présente l'effet des différents paramètres étudiés sur les résultats d'analyse pour l'effort tranchant des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à deux travées.

5.2.3.2.1 Effet de la portée

Dans l'édition actuelle de la norme CSA S6-14, comme pour les portées simples, le facteur d'essieu pour le cisaillement ne dépend pas de la portée du pont. En effet, aucun paramètre ne varie en fonction de la portée équivalente L_e. Cependant, il est possible que ce paramètre puisse avoir un effet sur la distribution des efforts de cisaillement puisque la configuration d'essieux du CL-625 change selon la portée. Pour être en mesure de qualifier l'influence de ce paramètre, les résultats sont présentés sur la Figure 5.13 alors que les statistiques sont présentées au Tableau 5-12 et au Tableau 5-13.



1 voie

2 voies à 4 voies

Figure 5.13 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-12 Influence de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.89	0.218	0.244	0.491
15 m	0.91	0.086	0.095	1.102
20 m	0.93	0.086	0.093	0.869
30 m	0.92	0.130	0.141	0.582

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.92	0.139	0.152	0.585
15 m	0.91	0.091	0.100	1.024
20 m	0.91	0.091	0.100	1.024
30 m	0.92	0.093	0.101	0.820

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.90	0.141	0.156	0.689
15 m	0.89	0.092	0.103	1.212
20 m	0.89	0.092	0.103	1.212
30 m	0.90	0.091	0.101	1.065

Tableau 5-13 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.97	0.128	0.132	0.239
20 m	0.97	0.072	0.074	0.371
40 m	0.94	0.060	0.063	0.989
60 m	0.94	0.085	0.090	0.649

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	1.00	0.115	0.115	-0.017
20 m	0.97	0.075	0.078	0.444
40 m	0.97	0.068	0.070	0.500
60 m	0.92	0.058	0.063	1.287

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.98	0.112	0.114	0.151
20 m	0.94	0.074	0.079	0.757
40 m	0.94	0.066	0.070	0.884
60 m	0.90	0.057	0.063	1.736

Il est d'abord possible de voir que les ponts de courte portée sont mal représentés. En effet, autant sur dans les résultats présentés au Tableau 5-12 et au Tableau 5-13 qu'sur la Figure 5.13, il y a une plus grande dispersion des résultats pour les portées de 10 m. Cette dispersion est la pire pour les ponts en acier avec une valeur élevée de coefficient de variation de 0.257 pour les ponts de 10 m à une voie. Par contre, cet effet diminue avec la portée et il est plus faible pour les ponts de deux voies et plus. Pour les autres portées, la dispersion des résultats est satisfaisante avec des coefficients de variation inférieurs à 10% et des biais près de 1. Pour les portées courtes de 10 m, un paramètre lié à la portée pourrait améliorer les résultats.

5.2.3.2.2 Effet de l'espacement des poutres

Comme pour les portées simples, l'espacement des poutres est un paramètre qui est considéré dans le calcul du facteur d'essieu du cisaillement. Il intervient notamment directement dans le calcul de γ_c et de F_T. La Figure 5.14 présente l'influence de l'espacement des poutres sur les efforts de cisaillement alors que le Tableau 5-14 présente les statistiques du biais en fonction des groupes d'espacements des poutres afin de pouvoir caractériser les résultats statistiques.

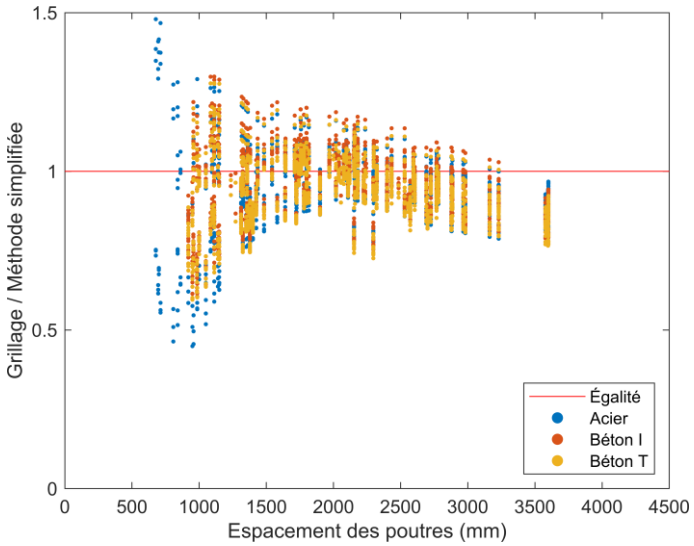


Figure 5.14 Influence de l'espacement des poutres pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portée continue à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-14 Influence de l'espacement des poutres sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en acier**			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
0.6 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.88	0.313	0.354	0.372
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.92	0.142	0.155	0.575
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.99	0.080	0.080	0.063
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.98	0.081	0.082	0.286
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.94	0.067	0.070	0.831
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.92	0.063	0.069	1.340
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.90	0.083	0.092	1.180

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en béton I**			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.86	0.157	0.184	0.905
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.94	0.127	0.134	0.443
1.5 m < S ≤ 2.0 m	1.01	0.077	0.077	-0.076
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.99	0.074	0.075	0.141
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.95	0.061	0.065	0.893
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.90	0.055	0.061	1.797
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.87	0.046	0.053	2.906

Espacement des poutres	**Ponts avec poutres en béton T**			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
0.9 m ≤ S ≤ 1.0 m	0.84	0.157	0.187	1.021
1.0 m < S ≤ 1.5 m	0.93	0.127	0.138	0.575
1.5 m < S ≤ 2.0 m	0.99	0.073	0.074	0.174
2.0 m < S ≤ 2.5 m	0.97	0.075	0.077	0.458
2.5 m < S ≤ 3.0 m	0.92	0.059	0.064	1.324
3.0 m < S ≤ 3.5 m	0.88	0.052	0.059	2.341
3.5 m < S ≤ 4.0 m	0.84	0.043	0.051	3.647

Tout d'abord, la Figure 5.14 montre qu'il y a une corrélation entre l'espacement des poutres et les de cisaillement. Les tendances observées sont très similaires à celles des portées simples. En effet, comme pour les portées simples lorsque les poutres sont rapprochées, la méthode simplifiée perd de sa précision. À ces faibles espacements, les points sont très dispersés. Les coefficients de variation élevés viennent valider ce constat. Pour des espacements inférieurs à 2 m, les coefficients de variation sont tous supérieurs à 0.1. Après cela, la dispersion s'atténue à mesure que l'espacement des poutres augmente. De plus, puisque la configuration montrée sur la Figure 4.9 est présente dans la population de ponts continus comme dans celle des portées simples, il y a une

série de points qui sont nettement inférieurs à 1. Ces points représentent les poutres extérieures dont l'emplacement de trouve en-dessous du chasse-roue.

5.2.3.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour les portées simples, une analyse est faite seulement avec les valeurs extrêmes pour chaque modèle de pont, c'est-à-dire en retenant la valeur maximale de l'effort entre la poutre intérieure et la poutre extérieure. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.15.

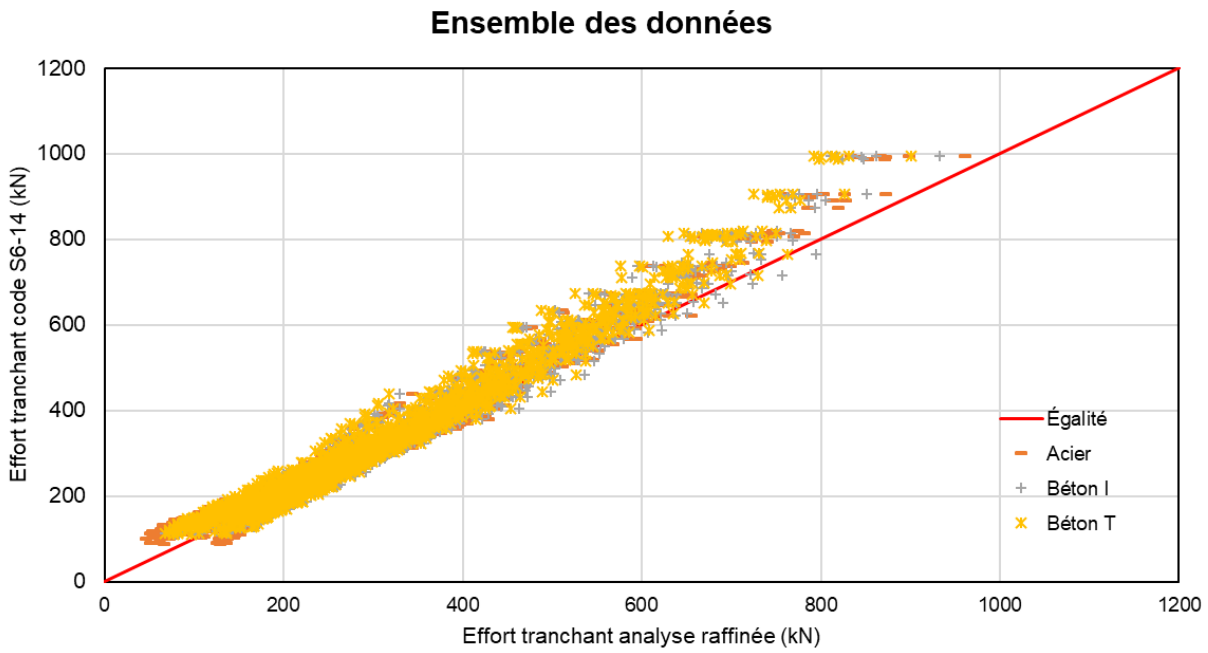


Figure 5.15 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Ensemble des données – Portées continues à deux travées

Il est possible de voir que les tendances sont similaires que lorsqu'on se penche sur l'échantillon au complet. En effet, les points sont encore regroupés et plus près de la ligne d'égalité. Il y a également le groupe de points qui représentent des ponts à deux voies qui sont non-sécuritaires. Cependant, le fuseau contenant les ponts est plus mince et par le fait même cela montre que la méthode est donc plus précise. Le Figure 5.15 présente l'effet de prendre en compte les efforts maximaux sur les paramètres statistiques.

Tableau 5-15 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	1.024	0.093	0.091	-0.258
Poutres en béton I	**Max**	1.016	0.078	0.077	-0.205
Poutres en béton T	**Max**	1.010	0.080	0.080	-0.125

Les tendances sont confirmées par les statistiques. En effet, autant le biais que l'écart-type et le coefficient de variation sont améliorés lorsqu'on considère les valeurs maximales.

5.2.4 Moments fléchissant à l'ÉLF et l'ÉLS-2

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour les moments fléchissants à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à deux travées.

5.2.4.1 Ensemble des résultats

À l'ÉLF/ÉLS-2, les efforts de flexion obtenus par les deux méthodes sont comparés entre eux. La comparaison est faite pour les trois efforts de flexion. La comparaison des efforts de flexion positifs de la première travée est illustrée sur la Figure 5.16 alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-16.

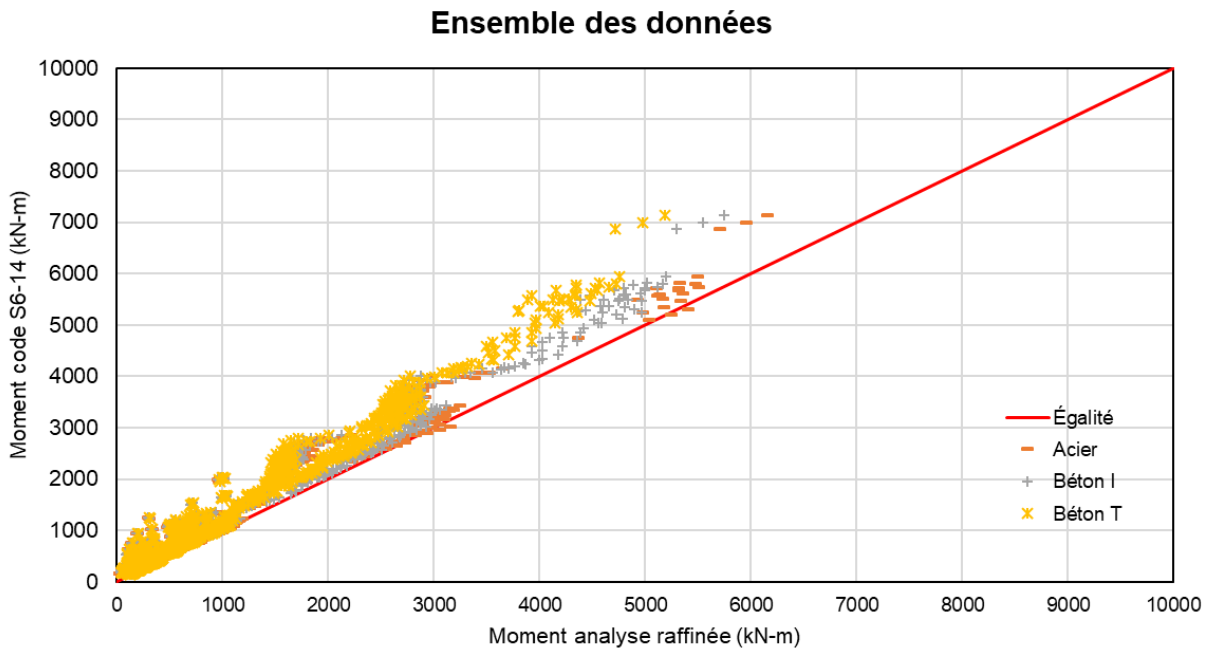


Figure 5.16 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 1 – Ensemble des données

Tableau 5-16 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 1

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.791	0.241	0.305	0.867
	Intérieure	0.769	0.097	0.126	2.381
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.785	0.224	0.285	0.960
	Intérieure	0.770	0.093	0.120	2.473
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.753	0.198	0.262	1.247
	Intérieure	0.742	0.092	0.125	2.804

Les résultats sont très similaires à l'ÉLU, autant pour les statistiques que pour la répartition des points :

- la méthode simplifiée est trop conservatrice à l'ÉLF;
- différence importante des statistiques de dispersion entre les poutres extérieures et les poutres intérieures (coefficient de variation et écart-type);
- la méthode simplifiée analyse mieux les poutres intérieures;

- présence d'un groupe de quelques ponts non-sécuritaires près de la courbe d'égalité seulement;
- les statistiques sont similaires entre les trois types de ponts analysés pour les poutres intérieures.

Par contre, il y a également quelques différences. À l'ÉLF, il y a un groupe de ponts autour de 1000 kN-m en analyse raffinée qui sont trop conservateurs et qui ne suivent pas la tendance. Ces points représentent des ponts à 1 voie avec 3 poutres, avec un porte-à-faux court et avec une voie large. Avec cette configuration et avec le fait qu'à l'ÉLF, le camion doit être positionné qu'au milieu de la voie, la poutre extérieure ne reçoit que très peu d'effort de flexion. La méthode simplifiée ne considère pas ce cas extrême et c'est pour cette raison qu'il y a une telle surestimation des efforts de flexion.

Ensuite, la précision de la méthode simplifiée sur le moment de flexion positif de la travée 2 est évaluée. Dans la méthode simplifiée, seule la longueur L_e change entre les deux cas. La comparaison des efforts de flexion positifs de la deuxième travée est illustrée sur la Figure 5.17 alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-17.

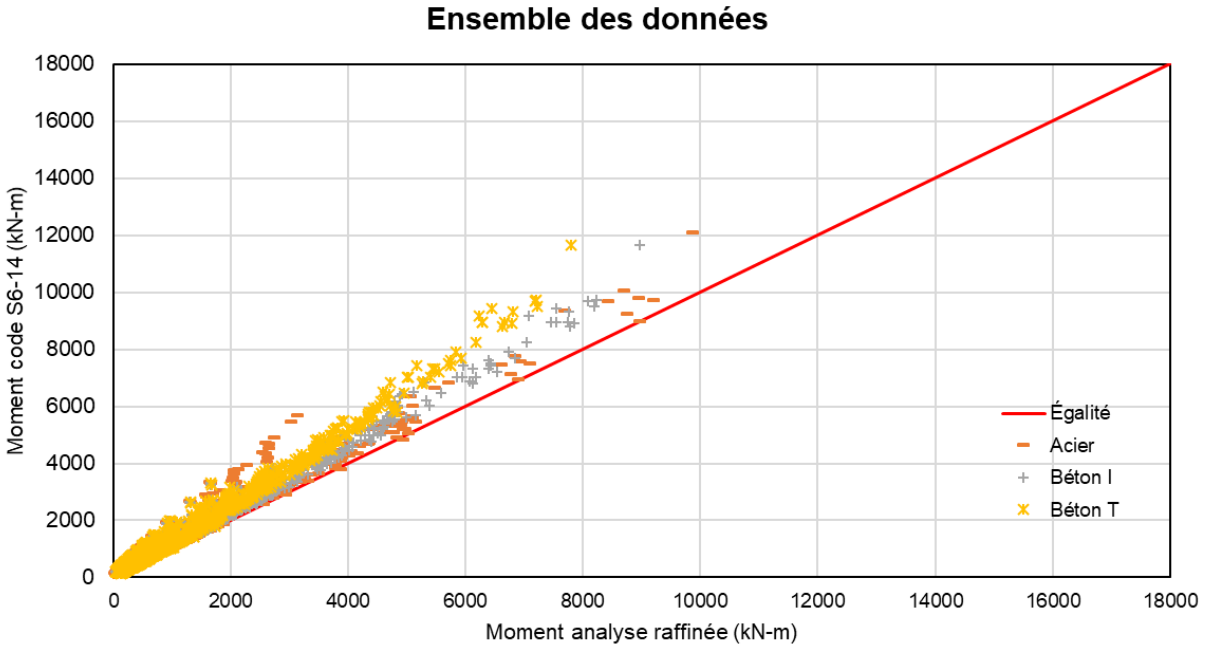


Figure 5.17 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 2 – Ensemble des données

Tableau 5-17 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Travée 2

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	Extérieure	0.792	0.216	0.273	0.963
	Intérieure	0.764	0.105	0.138	2.248
Poutres en béton I	Extérieure	0.781	0.197	0.253	1.112
	Intérieure	0.770	0.089	0.116	2.584
Poutres en béton T	Extérieure	0.735	0.161	0.219	1.646
	Intérieure	0.741	0.089	0.120	2.910

Comme à l'ÉLU, les résultats à l'ÉLF montrent des tendances qui sont similaires à celles de la travée 1. En comparant la Figure 5.16 et la Figure 5.17, il est possible de voir que la dispersion des points se ressemble entre les deux travées. La majorité des ponts restent conservateurs. Par contre, il y a moins de cas de dépassement dans le cas de la travée 2. Pour les paramètres statistiques, les résultats sont également très similaires et les tendances sont identiques. La comparaison des efforts de flexion négatifs est illustrée sur la Figure 5.18 alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-18.

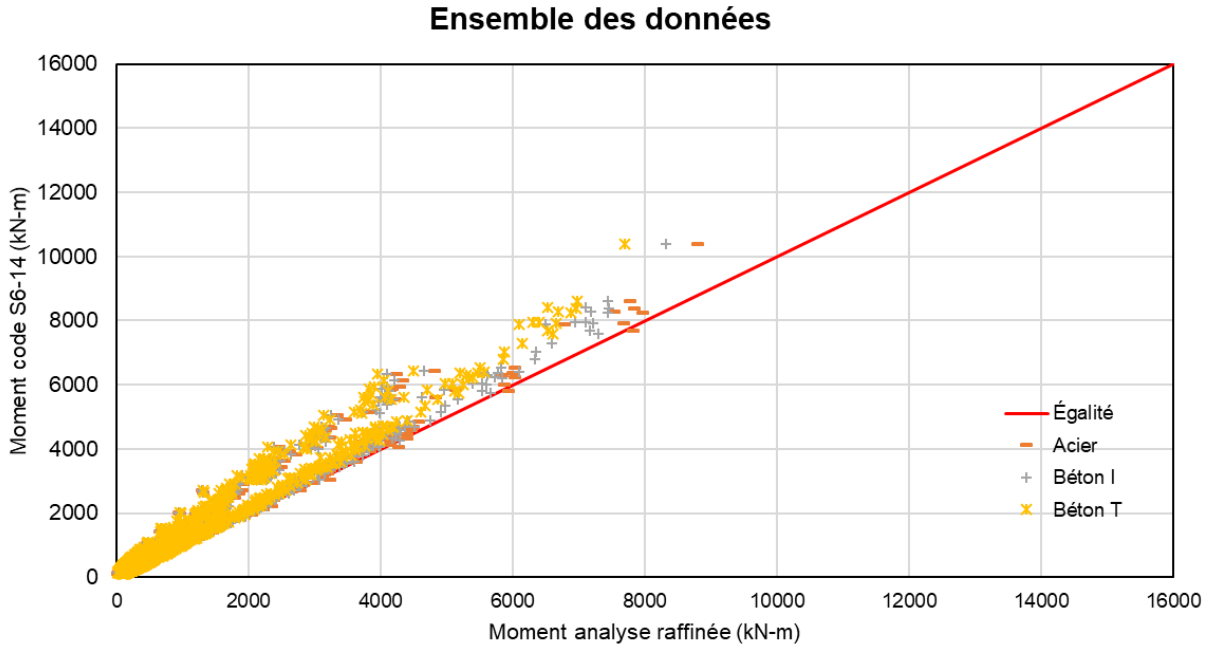


Figure 5.18 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-18 Résultats statistiques pour la flexion négative à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 2 travées

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.818	0.243	0.298	0.749
	Intérieure	0.831	0.117	0.140	1.444
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.831	0.243	0.292	0.695
	Intérieure	0.819	0.126	0.154	1.437
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.813	0.226	0.278	0.827
	Intérieure	0.796	0.125	0.157	1.632

Comme à l'ÉLU, le moment négatif à l'ÉLF est mal évalué par la méthode simplifiée du Code. Pour tous les cas, l'écart-type est trop élevé. Cela indique une inconsistance dans les prédictions par la méthode simplifiée. Les biais sont également trop élevés pour les poutres en béton I et pour les poutres en béton T. De plus, car les résultats sont similaires à l'ÉLU, plusieurs constats peuvent être établis :

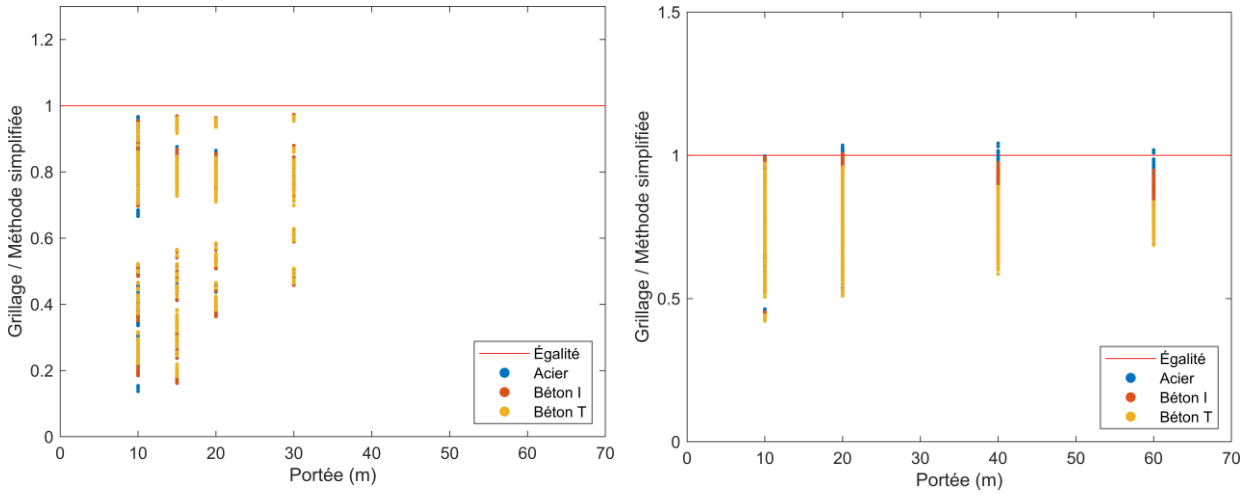
- présence de quelques cas non-sécuritaires :
  - poutres extérieures de ponts à deux voies avec un très grand espacement de poutres et un grand porte-à-faux;
- différences entre les statistiques pour les trois matériaux :
  - le biais diminue avec l'augmentation de la rigidité torsionnelle des poutres;
- différences entre les positions de poutres pour tous les types de ponts :
  - résultats meilleurs pour les poutres intérieures avec des écarts-types plus faibles;
  - biais similaires entre les deux positions pour les poutres en acier;
  - différence marquée entre les biais des deux positions de poutres pour les ponts à poutres en béton.

Une calibration supplémentaire semble être nécessaire pour l'évaluation de l'effort de flexion négatif à l'ÉLU comme à l'ÉLF.

5.2.4.2 Analyse de l'effet de la portée

Cette section présente l'effet de la portée sur les résultats d'analyse pour les 3 moments de flexion des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à deux travées.

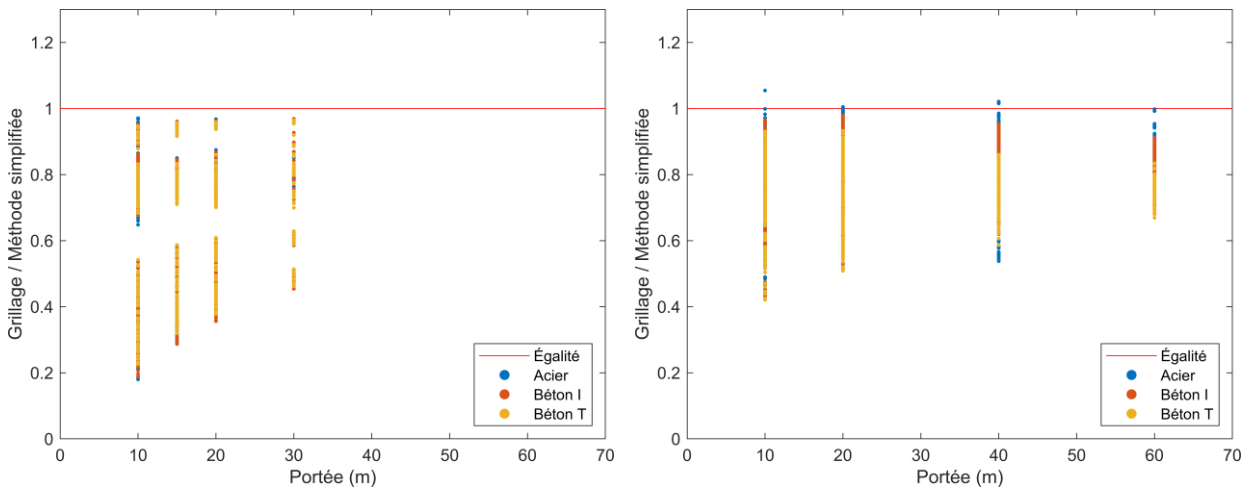
Le concept de portée équivalente L_e permet de prendre en considération les différents moments de flexion à l'ÉLF également. Ce paramètre est utilisé afin de calibrer le facteur D_T. Premièrement, les moments de flexion positifs seront analysés. La Figure 5.19 et la Figure 5.20 présentent la comparaison des efforts de flexion positive entre les deux méthodes.



1 voie

2 voies à 4 voies

Figure 5.19 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 1



1 voie 2 voies à 4 voies

Figure 5.20 Influence de la portée pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Travée 2

Les résultats montrent des tendances similaires entre les deux travées. Cela s'applique autant aux ponts à une voie que ceux à deux voies et plus. Cette même tendance avait été relevée pour l'ÉLU. Pour les ponts à 2 voies et plus, les résultats ressemblent à ceux à l'ÉLU. Ces mêmes constats peuvent être observés :

- relation linéaire entre les valeurs minimales et la portée pour les ponts à une voie;
- relation linéaire entre la dispersion et la portée;
- les ponts à une voie sont tous sécuritaires tandis que les ponts à deux voies sont majoritairement sécuritaires, avec toutefois la présence de quelque cas de dépassement pour les ponts à 2 voies et plus.

Pour les ponts à une voie, les résultats sont différents entre l'ÉLU et ÉLF. En effet, à l'ÉLF, il n'y a pas de cas de dépassement pour ces ponts. Les valeurs sont également trop conservatrices et la dispersion est très élevée pour les portées courtes. La dispersion reste également plus élevée que pour les ponts à deux voies et plus pour toutes les portées. Comme pour les ponts à 2 voies et plus, les prédictions s'améliorent avec l'augmentation de la portée. Contrairement à l'ÉLU, les résultats à l'ÉLF pour les ponts à 1 voie s'améliorent autant pour le biais que la dispersion des points avec l'augmentation de la portée pour toutes les portées. Le biais augmente avec la portée à l'ÉLF

contrairement à l'ÉLU. Afin de vérifier ces constats, les paramètres statistiques des résultats d'analyse en fonction de portée sont présentés du Tableau 5-19 au Tableau 5-22.

Tableau 5-19 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 1 voie – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.66	0.259	0.393	1.323
15 m	0.63	0.178	0.285	2.100
20 m	0.66	0.178	0.270	1.916
30 m	0.64	0.154	0.241	2.360

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.63	0.265	0.418	1.384
15 m	0.67	0.185	0.276	1.798
20 m	0.67	0.185	0.276	1.798
30 m	0.71	0.164	0.230	1.750

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.63	0.238	0.378	1.556
15 m	0.66	0.175	0.263	1.917
20 m	0.66	0.175	0.263	1.917
30 m	0.71	0.160	0.225	1.808

Tableau 5-20 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.82	0.117	0.144	1.553
20 m	0.85	0.129	0.151	1.158
40 m	0.84	0.130	0.155	1.257
60 m	0.96	0.080	0.084	0.501

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.81	0.114	0.140	1.628
20 m	0.83	0.121	0.144	1.374
40 m	0.83	0.100	0.122	1.738
60 m	0.83	0.058	0.070	2.918

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.79	0.112	0.141	1.835
20 m	0.79	0.112	0.142	1.835
40 m	0.77	0.078	0.102	2.968
60 m	0.77	0.035	0.046	6.607

Tableau 5-21 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues – 1 voie – Travée 2

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.65	0.236	0.361	1.462
15 m	0.66	0.167	0.254	2.063
20 m	0.66	0.167	0.251	2.019
30 m	0.65	0.166	0.257	2.114

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.63	0.239	0.380	1.550
15 m	0.67	0.175	0.260	1.865
20 m	0.67	0.175	0.260	1.865
30 m	0.72	0.167	0.233	1.681

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.63	0.218	0.348	1.722
15 m	0.67	0.168	0.250	1.960
20 m	0.67	0.168	0.250	1.960
30 m	0.72	0.163	0.228	1.731

Tableau 5-22 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues – 2 voies et plus – Travée 2

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.82	0.106	0.129	1.703
20 m	0.85	0.126	0.149	1.218
40 m	0.82	0.145	0.177	1.278
60 m	0.95	0.085	0.090	0.571

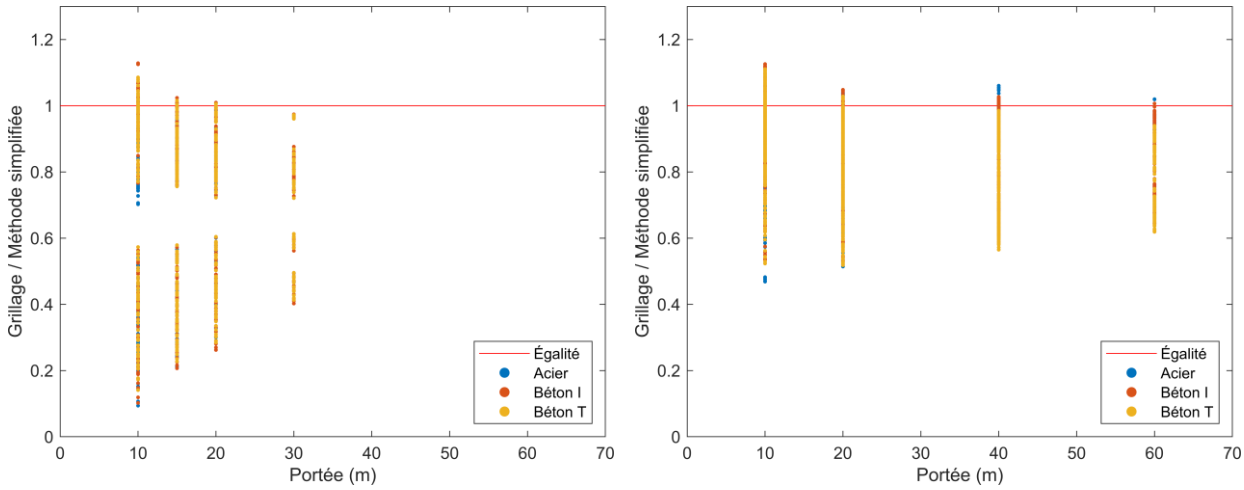
	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.80	0.107	0.134	1.848
20 m	0.83	0.115	0.139	1.468
40 m	0.83	0.079	0.095	2.106
60 m	0.83	0.044	0.054	3.807

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.78	0.104	0.134	2.134
20 m	0.78	0.103	0.131	2.107
40 m	0.77	0.057	0.075	3.991
60 m	0.76	0.032	0.042	7.598

Les statistiques confirment les tendances observées :

- amélioration du biais et de l'écart-type avec l'augmentation de la portée;
- les ponts à une voie présentent de trop grandes écarts-types pour toutes les portées;
- les efforts de flexion positif sont surestimés pour les ponts à une voie;
- les statistiques et les tendances sont similaires pour les travées 1 et 2.

Ensuite, l'influence de la portée sur les valeurs des analyses pour la flexion négative sera analysée. La Figure 5.21 présente graphiquement la dispersion des résultats par rapport à la portée alors que le Tableau 5-23 et le Tableau 5-24 présentent les statistiques.



1 voie 2 voies et plus

Figure 5.21 Influence de la portée pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-23 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.71	0.292	0.411	0.995
15 m	0.68	0.202	0.297	1.577
20 m	0.68	0.202	0.299	1.601
30 m	0.63	0.162	0.257	2.302

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.71	0.328	0.458	0.870
15 m	0.69	0.224	0.323	1.370
20 m	0.69	0.224	0.323	1.370
30 m	0.71	0.177	0.250	1.654

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.71	0.305	0.430	0.954
15 m	0.69	0.213	0.309	1.456
20 m	0.69	0.213	0.309	1.456
30 m	0.71	0.172	0.244	1.704

Tableau 5-24 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.86	0.112	0.130	1.244
20 m	0.87	0.135	0.156	0.989
40 m	0.83	0.158	0.191	1.071
60 m	0.97	0.078	0.081	0.416

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.92	0.114	0.124	0.692
20 m	0.86	0.130	0.150	1.038
40 m	0.83	0.140	0.169	1.213
60 m	0.82	0.116	0.142	1.585

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.91	0.113	0.125	0.837
20 m	0.84	0.126	0.150	1.287
40 m	0.79	0.129	0.162	1.609
60 m	0.77	0.101	0.130	2.259

Les résultats présentés sur la Figure 5.21, au Tableau 5-23 et au Tableau 5-24 sont similaires à ceux présentés à la flexion négative à l'ÉLU :

- diminution du biais et du nombre de cas de dépassement avec l'augmentation de la portée;
- diminution de l'écart-type et du coefficient de variation avec la portée;
- présence de plusieurs cas non conservateurs pour les ponts à une voie contrairement à la flexion positive.

Les recommandations restent les mêmes qu'à l'ÉLU, car les tendances relevées sont les mêmes à la flexion négative.

5.2.5 Effort tranchant à l'ÉLF et l'ÉLS-2

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour l'effort tranchant à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à deux travées.

5.2.5.1 Ensemble des résultats

Dans cette section, une analyse comparative de l'effort tranchant issu de la méthode simplifiée et du grillage est présentée. La Figure 5.22 présente la comparaison directe des efforts de cisaillement exprimés en kN alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-25.

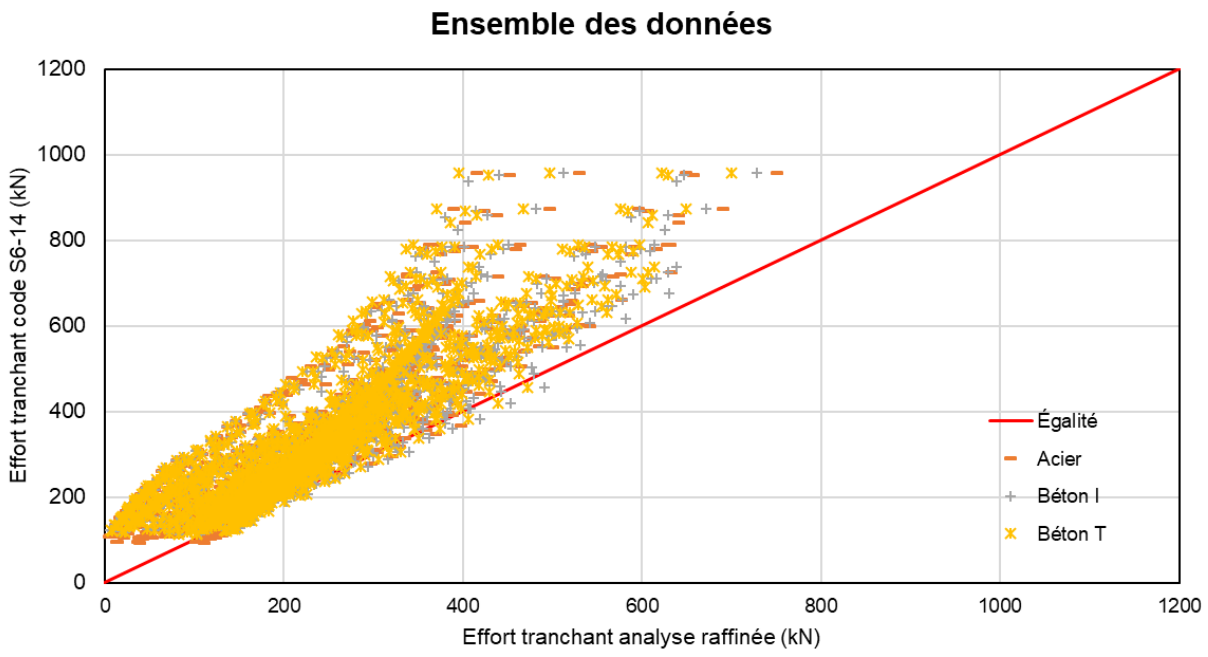


Figure 5.22 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-25 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées

Type des poutres	Position des poutres	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.641	0.234	0.366	1.534
	Intérieure	0.767	0.143	0.186	1.629
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.676	0.241	0.356	1.344
	Intérieure	0.775	0.143	0.185	1.573
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.659	0.230	0.350	1.483
	Intérieure	0.749	0.142	0.189	1.768

Les résultats sont similaires qu'à l'ÉLU :

- grande différence entre les statistiques des poutres intérieures et celles des poutres extérieures;
- les poutres intérieures performent mieux que les poutres extérieures;
- les résultats sont similaires pour les trois types de ponts;

- présence d'un groupe de ponts non-sécuritaires;
- grande surestimation de l'effort tranchant en moyenne pour les grandes valeurs d'effort tranchant;

Il y a aussi des similitudes avec l'ÉLF des portées simples. Comme à l'ÉLF pour les portées simples, les points suivent une tendance quadratique. Elles ne suivent pas linéairement la droite d'égalité. Les raisons relevées à l'ÉLF pour les portées simples sont également applicables pour ce cas-ci. Les ponts qui suivent cette tendance sont des poutres intérieures tel que montré sur la Figure 5.23.

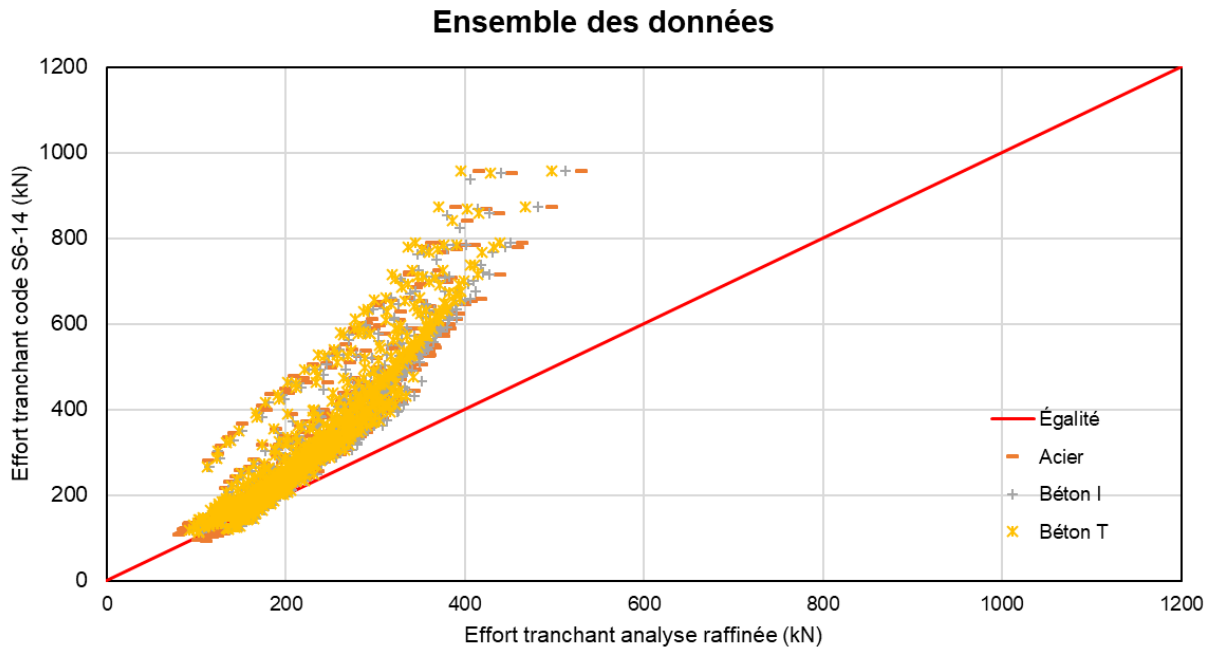


Figure 5.23 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données – Poutres intérieures

Une équation supplémentaire à ajouter pour évaluer l'effort tranchant des portées continues à l'ÉLF serait nécessaire. Un paramètre qui est considéré dans le calcul des facteurs d'essieu pour le cisaillement à l'ÉLF est le nombre de voies sur le pont. Dans le Code, la valeur du paramètre D_T varie pour considérer le nombre de voies. La Figure 5.24 illustre l'influence du nombre de voies sur les efforts de cisaillement. Les statistiques liées à l'effet du nombre de voie sont présentées au Tableau 5-26.

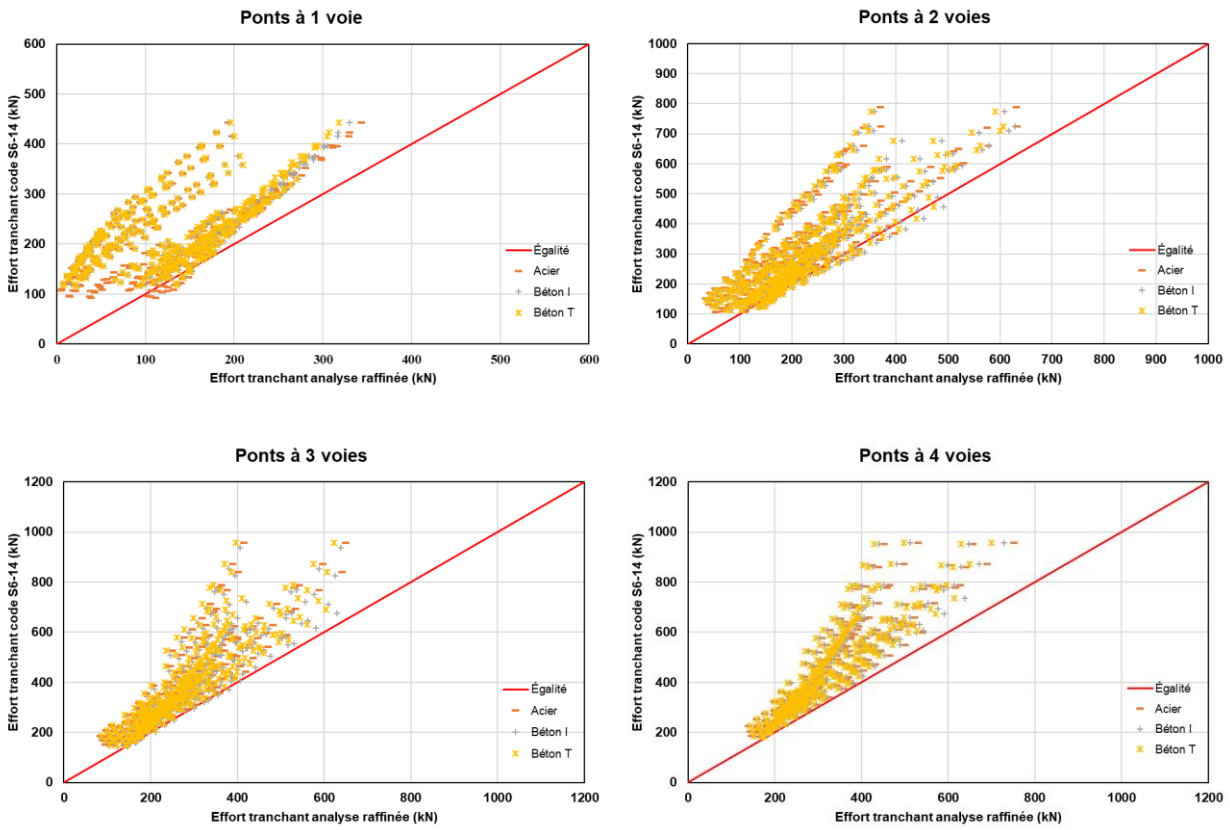


Figure 5.24 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ELS-2 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 2 travées

Tableau 5-26 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 selon le nombre de voies – Portées continues à 2 travées

	Type des poutres	Position des poutres	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.356	0.160	0.450	4.025
		Intérieure	0.842	0.116	0.138	1.362
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.380	0.188	0.494	3.298
		Intérieure	0.837	0.078	0.094	2.090
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.381	0.190	0.498	3.258
		Intérieure	0.817	0.083	0.101	2.205
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.700	0.199	0.284	1.508
		Intérieure	0.755	0.174	0.230	1.408
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.749	0.200	0.267	1.255
		Intérieure	0.782	0.183	0.234	1.191
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.734	0.194	0.265	1.371
		Intérieure	0.761	0.180	0.236	1.328
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.760	0.116	0.153	2.069
		Intérieure	0.741	0.130	0.175	1.992
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.806	0.116	0.144	1.672
		Intérieure	0.756	0.141	0.186	1.730
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.765	0.109	0.143	2.156
		Intérieure	0.713	0.133	0.186	2.158
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.805	0.075	0.093	2.600
		Intérieure	0.711	0.109	0.153	2.651
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.810	0.076	0.094	2.500
		Intérieure	0.706	0.114	0.162	2.579
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.793	0.074	0.094	2.797
		Intérieure	0.688	0.114	0.165	2.737

Les tendances à l'ÉLF pour les portées continues à deux travées à l'effort tranchant sont similaires à celles à l'ÉLF pour les portées simples. Les principaux constats sont :

- 3 tendances différentes :
  - pour les ponts à 1 voie;
  - pour les ponts à 2 voies;
  - pour les ponts à 3 et 4 voies;
- l'effort tranchant dans les poutres extérieures des ponts à une voie est largement surestimé;
- pour les ponts à deux voies et plus, la méthode simplifiée surestime l'effort tranchant des poutres intérieures avec des biais de la poutre intérieure trop faibles;
- les coefficients de variation sont trop élevés pour tous les ponts analysés;

- les résultats sont similaires pour les ponts à poutres en acier et pour les ponts à poutres en béton.

5.2.5.2 Analyse de l'effet de la portée

Cette section présente l'effet de la portée sur les résultats d'analyse pour l'effort tranchant des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à deux travées.

Comme mentionné, le calcul du facteur d'essieu pour le cisaillement de la méthode simplifiée du Code S6-14 ne dépend pas de la portée du pont. En effet, aucun paramètre ne varie en fonction de la portée équivalente L_e. Comme pour l'ÉLU, il est possible que ce paramètre ait une incidence sur la répartition des efforts alors il faut qualifier l'influence de ce paramètre, les résultats sont présentés sur la Figure 5.25 alors que les statistiques sont présentées au Tableau 5-27 et au Tableau 5-28.

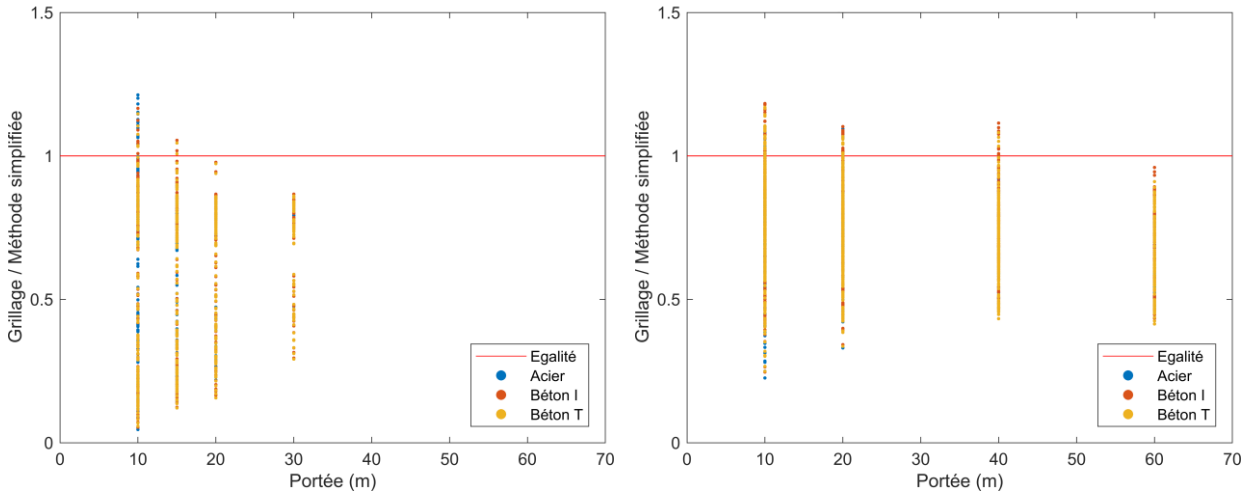


Figure 5.25 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – Ensemble des données

Tableau 5-27 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée continue – 2 travées – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.59	0.321	0.542	1.277
15 m	0.60	0.249	0.418	1.606
20 m	0.62	0.215	0.346	1.767
30 m	0.62	0.175	0.283	2.171

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.60	0.318	0.533	1.258
15 m	0.59	0.268	0.450	1.530
20 m	0.61	0.235	0.383	1.660
30 m	0.66	0.184	0.278	1.848

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.59	0.308	0.525	1.331
15 m	0.58	0.262	0.448	1.603
20 m	0.61	0.230	0.380	1.696
30 m	0.65	0.177	0.271	1.977

Tableau 5-28 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portée continue – 2 travées – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.76	0.161	0.212	1.491
20 m	0.76	0.129	0.170	1.860
40 m	0.69	0.124	0.181	2.500
60 m	0.64	0.140	0.220	2.571

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.80	0.170	0.211	1.176
20 m	0.77	0.138	0.179	1.667
40 m	0.75	0.130	0.175	1.923
60 m	0.68	0.139	0.205	2.302

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.78	0.165	0.211	1.333
20 m	0.75	0.134	0.180	1.866
40 m	0.72	0.125	0.173	2.240
60 m	0.66	0.134	0.204	2.537

Il est d'abord possible de voir que les ponts à une voie sont mal représentés. Leurs biais sont trop faibles et leurs écarts-types élevés entraînent des coefficients de variation très élevés. Par exemple, les ponts à poutres en acier présentent un très grand coefficient de variation de 0.542 pour des portées de 10 m. Cet effet est observable pour tous les types de ponts de 10 à 30 m. Ensuite, pour tous les ponts, le biais à l'effort tranchant est influencé par la portée. Pour les ponts à une voie, le biais a tendance à augmenter. Pour les ponts à deux voies et plus, le biais a plutôt tendance à diminuer. Dans tous les cas, l'écart-type et le coefficient de variation diminuent avec l'augmentation de la portée sauf pour les portées de 60 m. Les résultats à l'ÉLF/ÉLS-2 sont

insatisfaisants pour l'effort tranchant compte tenu des grands écarts-types et des faibles biais obtenus.

5.2.5.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour les portées simples, une analyse est faite seulement avec les valeurs extrêmes pour chaque modèle de pont, c'est-à-dire en retenant la valeur maximale de l'effort entre la poutre intérieure et la poutre extérieure. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.26.

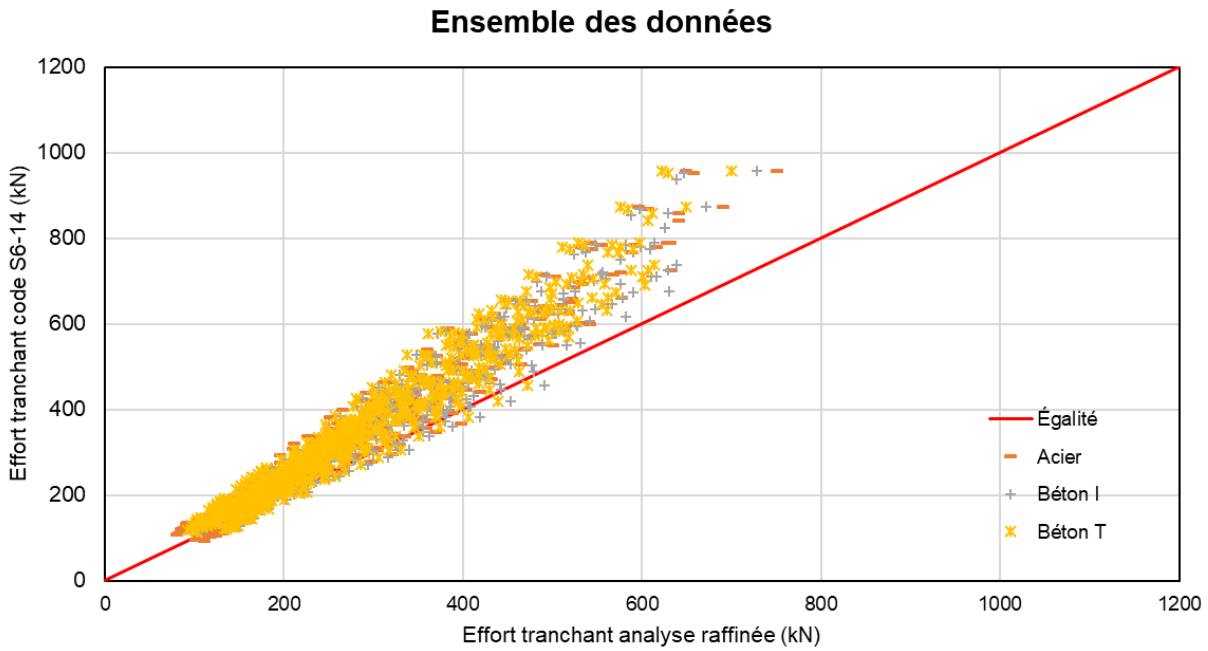


Figure 5.26 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Ensemble des données – Portées continues à deux travées

Il est possible de voir que les tendances sont similaires de celles des poutres extérieures. En effet, la tendance quadratique des poutres intérieures est atténuée en ne considérant que les valeurs maximales. Le Tableau 5-29 présente l'effet de prendre en compte les efforts maximaux sur les paramètres statistiques.

Tableau 5-29 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées simples

Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.840	0.093	0.110	1.720
Poutres en béton I	**Max**	0.858	0.096	0.112	1.479
Poutres en béton T	**Max**	0.831	0.096	0.115	1.760

Les tendances sont confirmées par les statistiques. En effet, autant le biais que l'écart-type et le coefficient de variation sont améliorés lorsqu'on considère les valeurs maximales. Les biais sont moins faibles et l'écart-type est également moindre.

5.3 Étude des ponts à 3 travées

5.3.1 Résumé des paramètres considérés

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée avec la méthode raffinée du grillage pour les portées continues de 3 travées. Les résultats de l'analyse paramétrique ont été basés sur les ponts synthétiques ayant les paramètres suivants :

- nombre de voie n : 1 à 4;
- portée L, ponts à une voie (n = 1) : 10, 15, 20 et 30 m;
- portée L, ponts de deux à quatre voies (n = 2, 3 et 4) : 10, 20, 30, 40 et 60 m;
- nombre de poutres N : 3, 4, 5, 6 et 8 poutres;
- type de poutres : poutre en acier en I, poutre en béton précontraint en I, poutre en béton en T monolithique;
- largeur carrossable W_c :
    - 1 voie : 3.3 m, 4.8 m et 5.9 m;
    - 2 voies : 6 m, 8.0 m et 9.9 m;
    - 3 voies : 10 m, 11.75 m, et 13.4 m;
    - 4 voies : 13.5 m, 15.25 m et 16.9 m;
- longueur du porte-à-faux S_c : 0.3S, 0.5S et 0.6S;
- conditions de chargement : 1 à n voies pour l'état limite ultime et l'état limite de service de type 1 (ÉLU et ÉLS-1) et une voie chargée pour l'état limite de fatigue et l'état limite de service de type 2 (ÉLF et ÉLS-2);
- rapport des travées L_2/L_1 : 1.0, 1.25 et 1.5, où la première et la troisième portée ont la même longueur.

Au total 591 ponts à 1 voie et 1584 ponts à deux voies et plus ont été analysés dans cette étude paramétrique, soit un total de 2175 ponts continus de trois travées.

5.3.2 Moments fléchissants à l'ÉLU/ÉLS-1

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour les moments fléchissants à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à trois travées.

5.3.2.1 Ensemble des résultats

Comme aux sections précédentes, les efforts de flexion sont comparés à ceux issus de la méthode simplifiée. Cependant, pour tous les ponts continus dont ceux à 3 travées, il y a 3 types d'efforts de flexion à considérer pour la conception des ponts continus. Dans le cas présent, trois types d'efforts de flexion servent à la conception : le moment de flexion positif à la travée 1, le moment de flexion positif à la travée 2, le moment de flexion négatif à l'appui intermédiaire. À cette fin, ces efforts ont été déterminés avec la méthode du grillage et avec la méthode simplifiée. La comparaison des efforts de flexion positifs de la première travée est illustrée sur la Figure 5.27 alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-30.

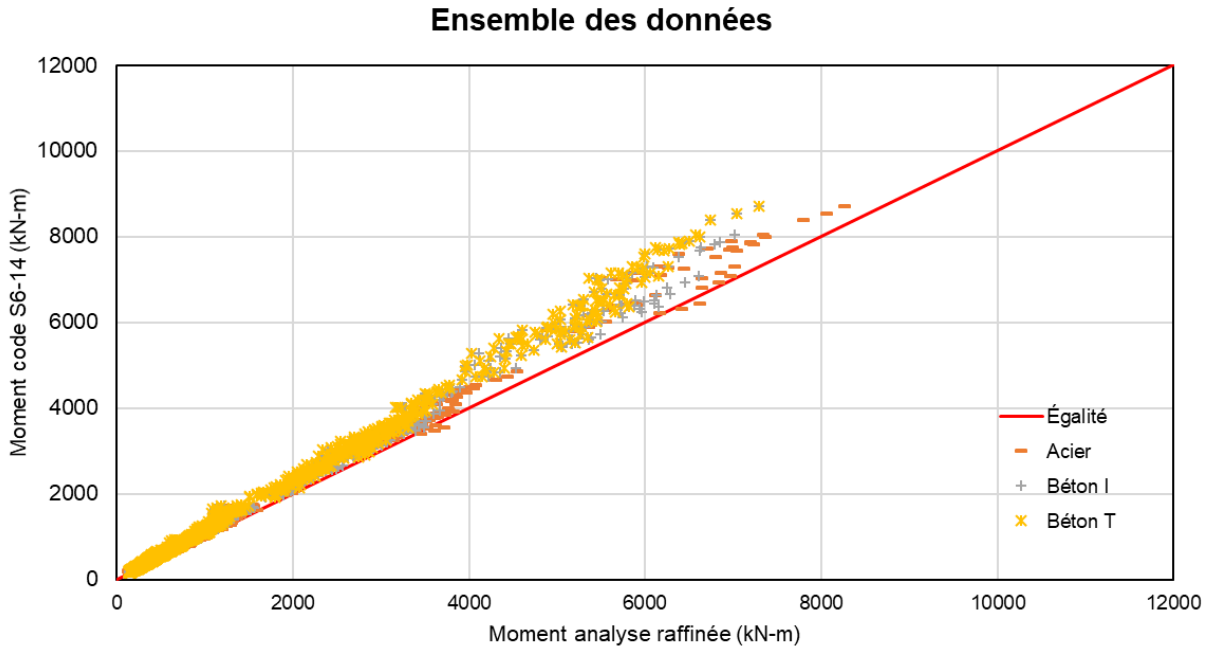


Figure 5.27 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 1 – Ensemble des données

Tableau 5-30 Résultats statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 1

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.911	0.070	0.077	1.276
	Intérieure	0.895	0.073	0.082	1.436
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.886	0.057	0.065	1.993
	Intérieure	0.879	0.067	0.076	1.805
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.852	0.048	0.056	3.080
	Intérieure	0.855	0.062	0.073	2.322

Tout d'abord, le premier constat qu'il est possible de dresser est le fait que les statistiques sont très similaires avec les ponts à 2 travées pour la flexion positive. Pour les trois matériaux, comme pour les ponts à 2 travées, il est possible de voir que la méthode simplifiée de la norme CSA S6-14 est généralement conservatrice. En effet, la majorité des points représentant les ponts se trouve dans la portion sécuritaire de la courbe. Il est donc possible de dresser des tendances similaires que pour les ponts à 2 travées :

- présence de seulement quelques cas de ponts non-sécuritaires;
- la méthode simplifiée est généralement trop conservatrice;
- les équations de la méthode simplifiée sont bien adaptées aux poutres extérieures (faible écart-type et faible coefficient de variation);
- influence du type des poutres du pont sur la répartition des efforts de flexion.

Comme pour les ponts à deux travées, les cas de ponts dépassant la droite d'égalité sont des poutres extérieures de ponts de longue portée avec des poutres très espacées. Pour les mêmes raisons qu'énoncé plus tôt, les poutres de ce type de ponts attirent beaucoup d'efforts de flexion et la répartition des efforts est plus difficile, car les poutres sont très éloignées.

La précision de la méthode simplifiée sur le moment de flexion positif de la travée 2 est évaluée. Dans la méthode simplifiée, seule la longueur L_e change entre les deux cas. La comparaison des efforts de flexion positifs de la première travée est illustrée sur la Figure 5.28 alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-31.

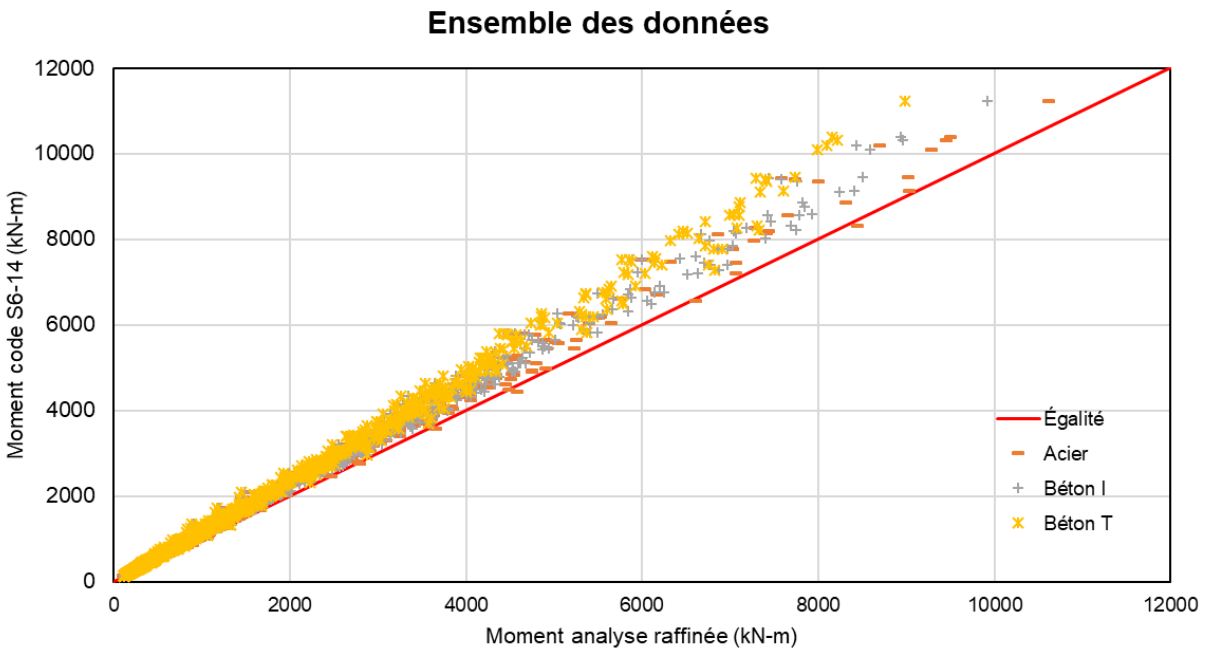


Figure 5.28 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 2 – Ensemble des données

Tableau 5-31 Résultats statistiques pour le moment positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Travée 2

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.918	0.050	0.055	1.640
	Intérieure	0.877	0.057	0.065	2.158
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.898	0.037	0.041	2.757
	Intérieure	0.870	0.053	0.060	2.453
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.851	0.032	0.037	4.656
	Intérieure	0.840	0.051	0.061	3.137

Les résultats présentés sur la Figure 5.28 et au Tableau 5-31 montrent des tendances qui sont similaires aux ponts à 2 travées. En effet, les résultats du moment de flexion positif pour la travée 2 ont peu d'écarts par rapport à ceux du moment de flexion positif de la travée 1 autant pour le biais que pour l'écart-type et le coefficient de variation.

Comme pour les ponts à 2 travées, les moments de flexion négatifs à l'appui central du grillage sont comparés à ceux obtenus par la méthode simplifiée. La comparaison des efforts de flexion

négatifs est illustrée sur la Figure 5.29. Les statistiques des résultats d'analyse sont présentées au Tableau 5-32.

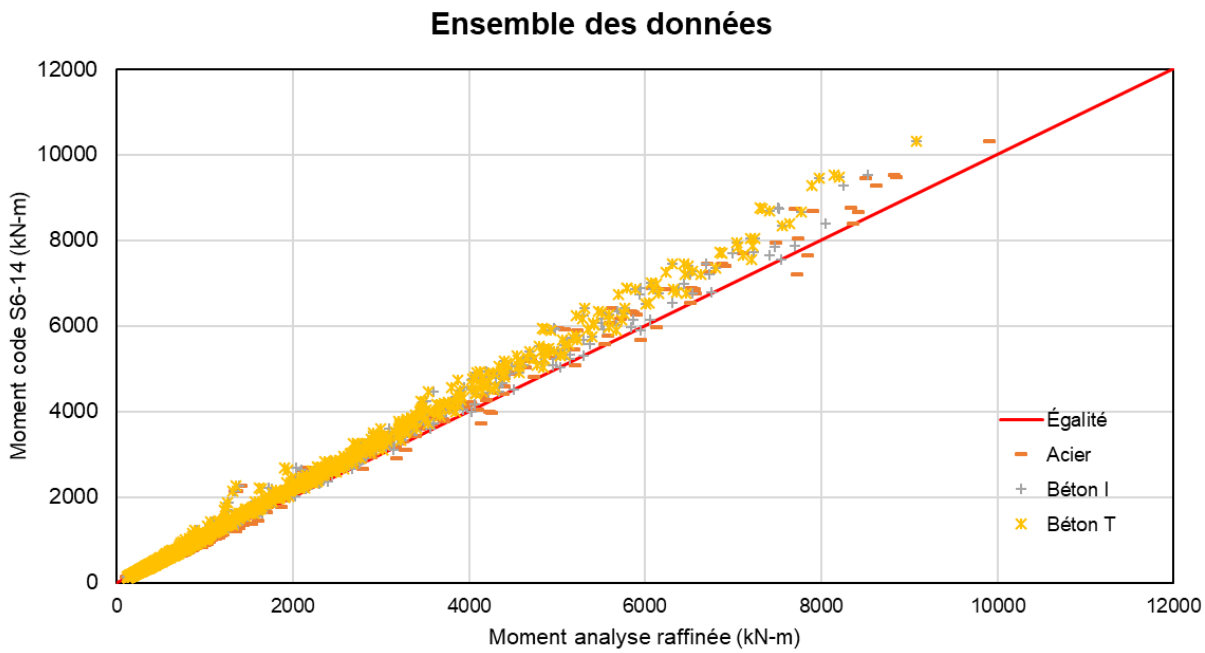


Figure 5.29 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données

Tableau 5-32 Résultats statistiques pour la flexion négative à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.979	0.051	0.052	0.412
	Intérieure	0.986	0.076	0.077	0.184
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.965	0.053	0.055	0.660
	Intérieure	0.953	0.067	0.071	0.701
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.942	0.051	0.054	1.137
	Intérieure	0.932	0.063	0.068	1.079

Comme pour les ponts à 2 travées, il est possible d'observer sur la Figure 5.29 que les points sont situés plus près de l'égalité que dans les cas de la flexion positive représentés sur la Figure 5.27 et la Figure 5.28. En regardant le Tableau 5-32, il est possible de voir que la méthode simplifiée donne

de bons résultats autant pour les poutres intérieures qu'extérieures. Les biais sont tous près de 1 et les coefficients de variation sont faibles.

Malgré le fait que la majorité des points se situe près de la courbe d'égalité, il y a plusieurs ponts dont les résultats ne sont pas conservateurs. En analysant les résultats, ce sont des poutres extérieures de ponts avec des poutres très espacées et de longs porte-à-faux. Cette observation rejoint les ponts à deux travées et cela rejoint également la tendance de la flexion positive. Les raisons ont déjà été mentionnées plus tôt. Le Code est donc mal adapté pour ces configurations de ponts.

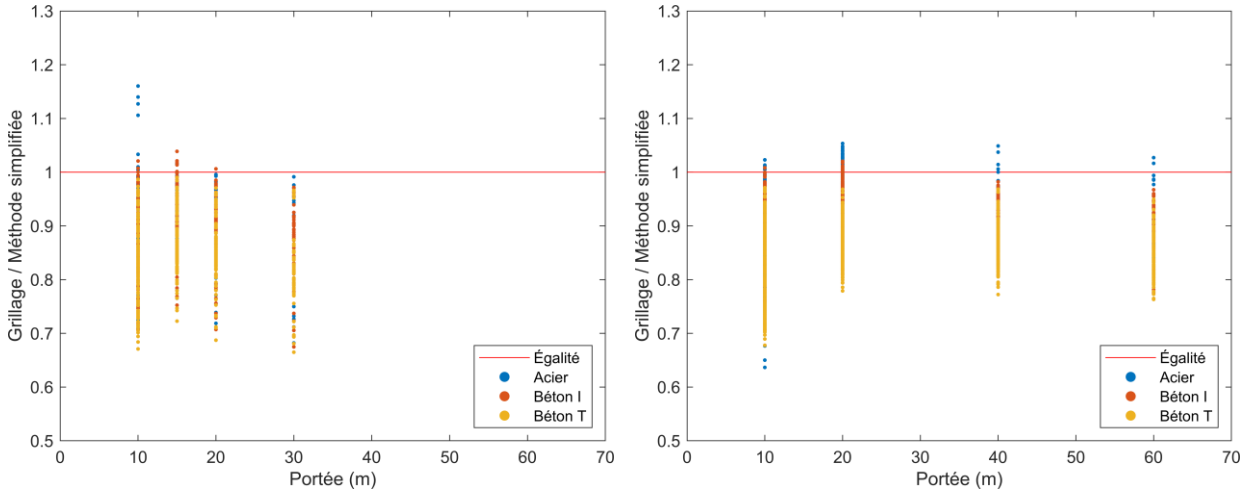
Il n'y a pas d'influence du type de ponts sur les résultats, car ceux-ci sont similaires. Les tendances sont similaires pour les trois types de ponts.

5.3.2.2 Analyse de l'effet de la portée

Cette section présente l'effet de la portée sur les résultats d'analyse pour les 3 moments de flexion des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à trois travées.

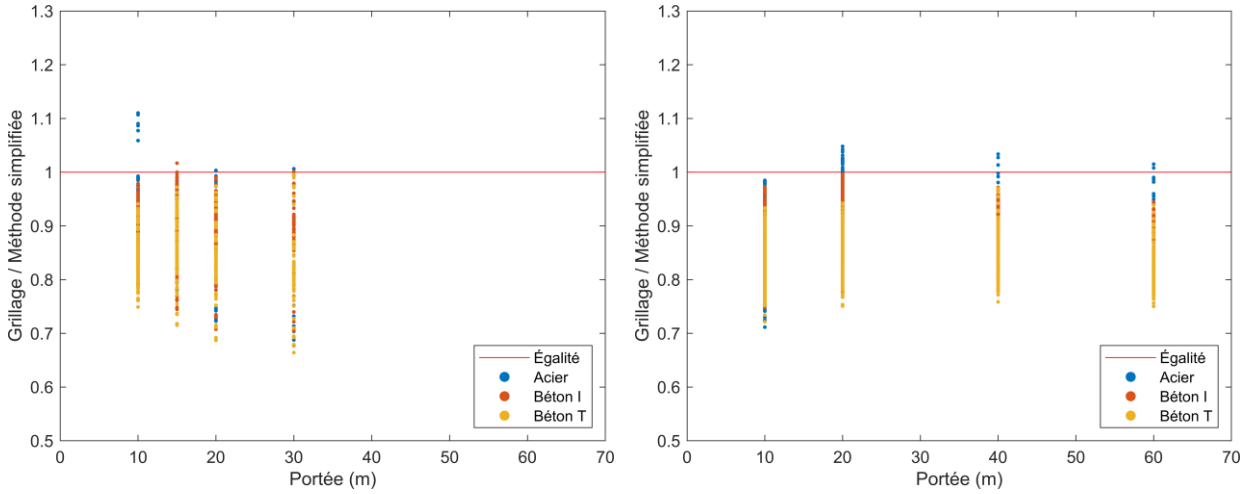
Dans les équations de la méthode simplifiée, les ponts continus sont traités à travers le concept de portée équivalente L_e qui est utilisé afin de calibrer le facteur D_T. Pour les ponts à 3 travées, une troisième définition est introduite afin d'estimer l'effort de flexion de la travée intermédiaire. La portée équivalente pour cet effort de flexion positif est $0.5L_2$.

Puisque la troisième travée vient modifier la répartition des efforts de flexion, il est pertinent de valider cette approche pour cette configuration. Pour chacun des efforts de flexion critiques (moment de flexion positif de la travée 1, moment de flexion positif de la travée 2 et le moment de flexion négatif), les résultats des analyses sont corrélés à la portée. Pour le cas présent, puisque les ponts à 1 voie ont été modélisés avec des portées différentes, la présentation des résultats est séparée en 2 : les ponts à 1 voie et les ponts à plus d'une voie. Premièrement, les moments de flexion positifs seront analysés. La Figure 5.30 et la Figure 5.31 présentent la comparaison des efforts de flexion positifs entre les deux méthodes.



1 voie 2 à 4 voies

Figure 5.30 Influence de la portée pour le du moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 1



1 voie 2 à 4 voies

Figure 5.31 Influence de la portée pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 2

Tout d'abord, il est possible d'observer que les tendances sont similaires entre les travées 1 et 2. La norme est généralement satisfaisante pour prédire le moment fléchissant positif autant pour la travée 1 que pour la travée 2, car la majorité des points se situent en bas de 1. Ensuite, les résultats

montrent que les valeurs maximales en flexion positive sont corrélées à la portée pour les trois types de poutres. Pour les ponts à 1 voie, les résultats varient linéairement selon la portée, diminuant selon celle-ci. Les ponts à 1 voie présentent aussi la caractéristique que seuls les ponts à poutres en acier ont des cas non conservateurs à 10 m. Pour les ponts à 2 voies et plus, la relation est plutôt constante avec la portée. Seuls les ponts de 10 m présentent des caractéristiques différentes pour les ponts à 2 voies et plus. Afin de vérifier ces tendances, les paramètres statistiques sont présentés du Tableau 5-33 au Tableau 5-36.

Tableau 5-33 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.88	0.089	0.102	1.380
15 m	0.92	0.069	0.075	1.182
20 m	0.90	0.069	0.076	1.406
30 m	0.84	0.121	0.145	1.358

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.86	0.076	0.089	1.885
15 m	0.90	0.058	0.064	1.807
20 m	0.90	0.058	0.064	1.807
30 m	0.87	0.074	0.086	1.809

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.83	0.073	0.087	2.312
15 m	0.85	0.054	0.063	2.810
20 m	0.85	0.054	0.063	2.810
30 m	0.82	0.069	0.085	2.615

Tableau 5-34 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 2 voies et plus – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.87	0.079	0.091	1.606
20 m	0.94	0.045	0.048	1.369
40 m	0.92	0.041	0.045	1.942
60 m	0.91	0.054	0.060	1.717

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.86	0.074	0.087	1.906
20 m	0.90	0.046	0.051	2.061
40 m	0.89	0.040	0.045	2.724
60 m	0.86	0.049	0.057	2.737

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.84	0.070	0.083	2.345
20 m	0.87	0.032	0.037	3.921
40 m	0.87	0.035	0.040	3.782
60 m	0.84	0.040	0.047	3.992

Tableau 5-35 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 2

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.89	0.063	0.071	1.703
15 m	0.91	0.078	0.085	1.177
20 m	0.90	0.078	0.087	1.345
30 m	0.84	0.123	0.147	1.320

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.87	0.044	0.051	2.915
15 m	0.89	0.060	0.068	1.874
20 m	0.89	0.060	0.068	1.874
30 m	0.87	0.077	0.088	1.731

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.84	0.042	0.050	3.754
15 m	0.84	0.055	0.066	2.975
20 m	0.84	0.055	0.066	2.975
30 m	0.82	0.073	0.090	2.474

Tableau 5-36 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – 2 voies et plus – Travée 2

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.88	0.051	0.059	2.370
20 m	0.92	0.048	0.052	1.715
40 m	0.90	0.047	0.052	2.030
60 m	0.89	0.058	0.065	1.832

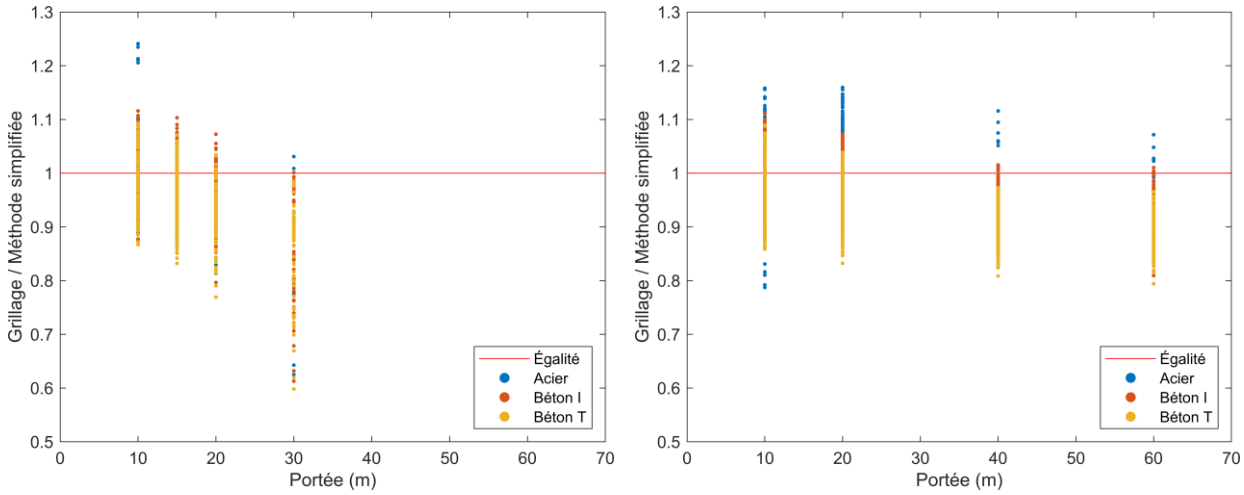
	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.87	0.045	0.051	2.886
20 m	0.90	0.042	0.047	2.468
40 m	0.89	0.038	0.043	2.847
60 m	0.87	0.043	0.050	2.983

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.84	0.040	0.048	3.940
20 m	0.86	0.034	0.039	4.233
40 m	0.85	0.036	0.043	4.087
60 m	0.82	0.038	0.046	4.611

Les résultats montrent que l'influence de la portée sur le biais est similaire à celle des ponts à deux travées. Les tendances observées sont :

- le biais est peu affecté par l'augmentation de la portée;
- la dispersion des points se détériore légèrement avec l'augmentation de la portée;
- les tendances sont similaires pour les ponts à une voie et ceux à deux voies et plus;
- le moment positif de la travée 1 et de la travée 2 présentent des statistiques très similaires;
- la méthode simplifiée donne généralement de bons résultats pour la flexion positive.

L'influence de la portée sur les résultats pour la flexion négative en fonction de la portée est analysée à la Figure 5.32 alors que le Tableau 5-37 et le Tableau 5-38 présentent les résultats statistiques.



1 voie

2 voies et plus

Figure 5.32 Influence de la portée pour le moment fléchissant négatif à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données

Tableau 5-37 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le du moment fléchissant négatif – Portée continue – 1 voie – 3 travées

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.94	0.062	0.066	0.968
15 m	0.89	0.054	0.061	2.037
20 m	0.85	0.078	0.092	1.923
30 m	0.77	0.132	0.172	1.742

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	1.02	0.065	0.063	-0.308
15 m	0.99	0.050	0.051	0.200
20 m	0.97	0.051	0.052	0.588
30 m	0.91	0.072	0.079	1.250

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	1.00	0.059	0.059	0.000
15 m	0.96	0.049	0.051	0.816
20 m	0.93	0.048	0.052	1.458
30 m	0.88	0.062	0.070	1.935

Tableau 5-38 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue – 2 voies et plus – 3 travées

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.99	0.059	0.060	0.198
20 m	1.00	0.058	0.058	0.022
40 m	0.95	0.047	0.050	1.141
60 m	0.94	0.050	0.053	1.198

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.99	0.049	0.050	0.264
20 m	0.97	0.050	0.052	0.692
40 m	0.92	0.039	0.042	2.073
60 m	0.91	0.046	0.050	2.053

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
10 m	0.97	0.047	0.049	0.645
20 m	0.94	0.042	0.045	1.375
40 m	0.90	0.032	0.036	3.095
60 m	0.89	0.037	0.042	3.000

Les résultats au moment négatif montrent des tendances similaires que pour la flexion positive. La dispersion des points en fonction de la portée présente des tendances similaires avec la flexion positive. Autant pour les ponts à une voie et ceux à deux voies, les distributions des points sont semblables dans les deux cas. Par contre, pour les ponts de portée de 10 m, la flexion négative présente une plus grande dispersion contrairement à la flexion positive. De plus, les biais sont tous plus élevés. Il y a également une plus grande influence de la portée sur les résultats. Les valeurs sont corrélées à la portée autant pour les ponts à une voie que ceux à deux voies et plus. Le rapport grillage méthode simplifiée a tendance à diminuer avec l'augmentation de la portée dans le cas présent. L'écart-type quant à lui est peu corrélé à la portée.

5.3.3 Effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour l'effort tranchant à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à trois travées.

5.3.3.1 Ensemble des résultats

Dans cette section, une analyse comparative des efforts de cisaillement issus de la méthode simplifiée et du grillage est présentée. La Figure 5.33 présente la comparaison directe des efforts de cisaillement exprimés en kN.

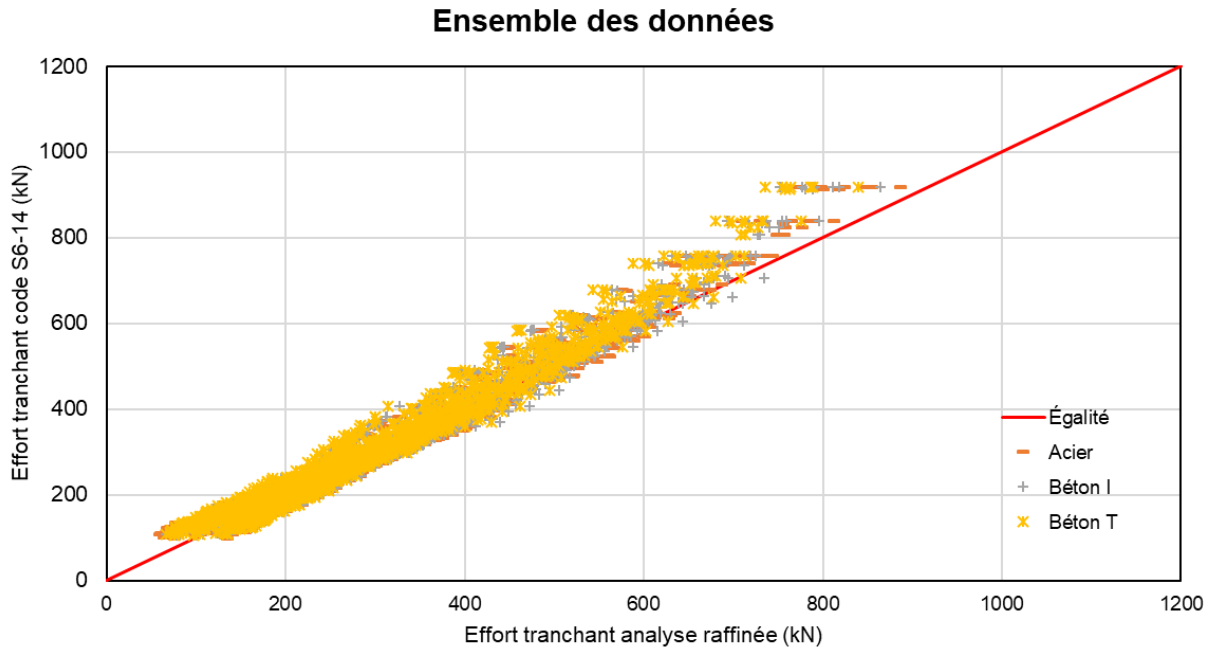


Figure 5.33 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données

Les efforts de cisaillement pour les ponts à 3 travées présentent des caractéristiques très similaires aux ponts à 2 travées. En effet, les efforts sont tout d'abord plus élevés. De plus, il est possible d'observer que le nuage de points suit la ligne d'égalité. Puisque le nuage est centré sur la ligne d'égalité, il y a beaucoup de cas de dépassement. Ces cas sont surtout associés aux portées courtes et moyennes puisque le nombre de dépassement s'atténue avec l'augmentation de la valeur de l'effort tranchant. Un des paramètres pouvant causer cet effet est le débalancement des travées. Tableau 5-39 présente l'influence de ce paramètre sur les statistiques.

Tableau 5-39 Influence du débalancement des travées pour le moment

		Rapport L_2/L_1		
Type des poutres	**Paramètre**	**1.0**	**1.25**	**1.5**
Poutres en acier	δ_{MU}	1.01	0.985	0.986
	σ_{MU}	0.123	0.112	0.106
	V_{MU}	0.121	0.114	0.108
Poutres en béton I	δ_{MU}	1.00	0.980	0.972
	σ_{MU}	0.114	0.105	0.100
	V_{MU}	0.113	0.107	0.102
Poutres en béton T	δ_{MU}	0.938	0.917	0.916
	σ_{MU}	0.097	0.092	0.089
	V_{MU}	0.103	0.100	0.097

Les résultats montrent que débalancement des travées a une incidence sur les ratios grillage sur méthode simplifiée. Pour les trois types de ponts, les statistiques diffèrent entre les différents rapports L_2/L_1. Par exemple, pour les ponts à poutres en acier, entre des travées débalancées de 1.5 et des travées égales, il y a une faible différence de 2.5 % entre les valeurs des biais, mais une différence plus marquée de 14 % quant à leurs écarts-types. La méthode simplifiée du Code utilise le concept de portée simple équivalente qui ne tient toutefois pas compte du débalancement des travées. Ce paramètre a une incidence sur la dispersion des points pour les trois types de ponts analysés. Il serait donc nécessaire d'ajouter un paramètre afin de tenir compte de cet effet à cause des écarts. De la même manière que pour les portées simples, les paramètres statistiques associés au biais du cisaillement sont analysés et présentés au Tableau 5-40.

Tableau 5-40 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées

Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.939	0.101	0.107	0.604
	Intérieure	1.049	0.100	0.095	-0.490
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.942	0.096	0.102	0.604
	Intérieure	1.032	0.100	0.097	-0.320
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.925	0.094	0.101	0.798
	Intérieure	1.009	0.103	0.102	-0.087

Les tendances sont similaires à celles des portées continues à deux travées. Puisque le Code ne contient qu'une seule équation pour calculer les efforts de cisaillement des poutres extérieures et intérieures, il est attendu que les paramètres statistiques différent entre ces deux positions de poutres. En effet, la valeur de cisaillement diffère entre ces deux positions et une seule équation ne peut être utilisée pour les calculs du cisaillement des deux poutres. Dans le cas présent, les résultats sont meilleurs pour les poutres extérieures, car les ratios sont près de 1 sans dépasser cette limite.

Un paramètre qui est considéré dans le calcul des facteurs d'essieu pour le cisaillement est le nombre de voies sur le pont. Dans le Code, la valeur du paramètre D_T varie pour considérer le nombre de voies. La Figure 5.34 illustre l'influence du nombre de voies sur les efforts de cisaillement.

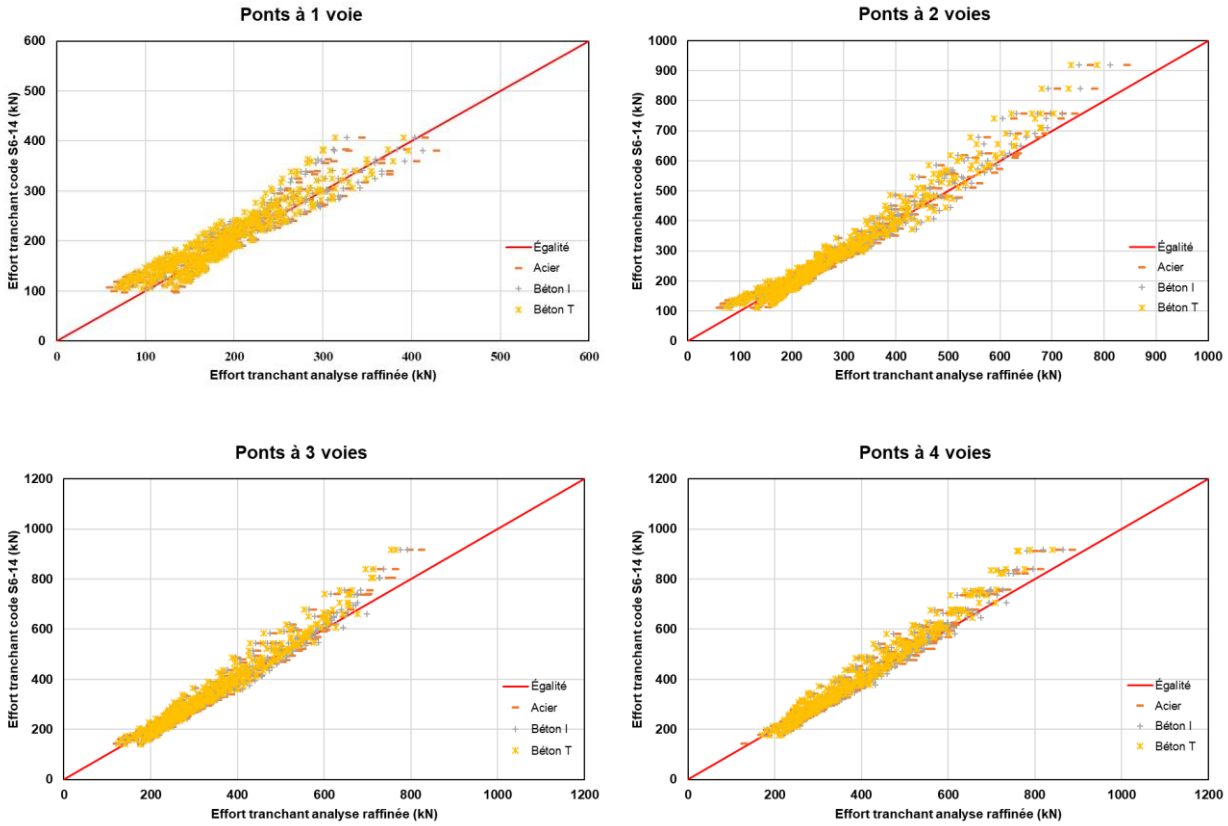


Figure 5.34 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLU/ELS-1 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 3 travées

Les tendances des efforts de cisaillement pour les portées continues sont très différentes des ponts à deux travées pour l'effet du nombre de voies :

- présence de la même tendance pour les ponts de 1 voie et d'une autre tendance pour les ponts de 2 à 4 voies;
- les valeurs à l'effort tranchant comportent beaucoup de dépassements pour tous les nombres de voies;
- les points suivent l'égalité.

Les statistiques de l'effet du nombre de voies sont présentées au Tableau 5-41.

Tableau 5-41 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 selon le nombre de voies – Portées continues à 3 travées

	Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.929	0.135	0.146	0.526
		Intérieure	0.972	0.117	0.121	0.239
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.921	0.128	0.139	0.617
		Intérieure	0.962	0.111	0.116	0.342
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.907	0.125	0.137	0.744
		Intérieure	0.943	0.119	0.127	0.479
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.931	0.111	0.119	0.622
		Intérieure	1.085	0.090	0.083	-0.944
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.939	0.095	0.101	0.642
		Intérieure	1.072	0.091	0.085	-0.791
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.922	0.093	0.101	0.839
		Intérieure	1.050	0.095	0.090	-0.526
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.972	0.086	0.088	0.326
		Intérieure	1.072	0.068	0.063	-1.059
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.975	0.079	0.081	0.316
		Intérieure	1.055	0.075	0.071	-0.733
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.956	0.078	0.082	0.564
		Intérieure	1.027	0.076	0.074	-0.355
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.974	0.085	0.088	0.306
		Intérieure	1.047	0.064	0.062	-0.734
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.975	0.082	0.084	0.305
		Intérieure	1.030	0.068	0.066	-0.441
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.954	0.080	0.084	0.575
		Intérieure	1.001	0.067	0.067	-0.015

Les statistiques confirment les tendances relevées. Les résultats sont similaires pour les ponts à deux voies et plus. Les ponts à une voie sont les plus sécuritaires avec des biais plus faibles. Ils ont également des tendances différentes des autres nombres de voies. Les statistiques sont très similaires pour les ponts à trois et quatre voies, autant pour les biais que pour la dispersion, les

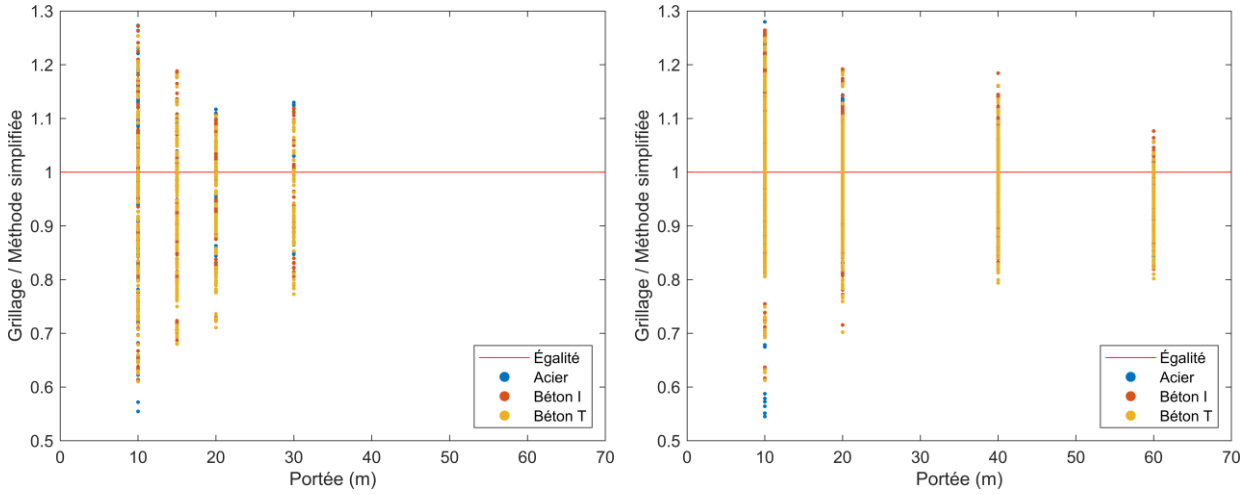
valeurs étant très proches. Les écarts-types pour les ponts à plus d'une voie sont satisfaisants, car il n'y a qu'un cas qui dépasse 0.1. Les ponts à deux voies ont des biais similaires aux ponts à trois et quatre voies, mais leurs écarts-types sont légèrement plus élevés.

Les résultats montrent également encore une différence par rapport aux positions des poutres. Les poutres intérieures montrent toujours un biais plus élevé et un écart-type plus faible que les poutres extérieures. Cette tendance est présente pour tous les nombres de voies. Comme mentionné, cela est causé par le fait qu'à l'effort tranchant, il n'y a qu'une seule équation pour les poutres extérieures et intérieures contrairement à la flexion.

5.3.3.2 Analyse de l'effet de la portée

Cette section présente l'effet de la portée sur les résultats d'analyse pour l'effort tranchant des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite ultime (ÉLU) et à l'état limite de service 1 (ÉLS-1) pour les ponts à trois travées.

Dans l'édition actuelle de la norme CSA S6-14, comme pour les ponts à deux travées, le facteur d'essieu pour le cisaillement ne dépend pas de la portée du pont. En effet, aucun paramètre ne varie en fonction de la portée équivalente L_e. Cependant, il est possible que ce paramètre puisse avoir un effet sur la distribution des efforts de cisaillement. Dans le cas des ponts à deux travées, un effet important de la portée sur le cisaillement a été relevé. Pour pouvoir qualifier l'influence de ce paramètre, les résultats sont présentés sur la Figure 5.35 alors que les statistiques pour la portée sont ensuite présentées au Tableau 5-42 et au Tableau 5-43.



1 voie

2 voies à 4 voies

Figure 5.35 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données

Tableau 5-42 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.92	0.143	0.156	0.585
15 m	0.97	0.099	0.102	0.304
20 m	0.98	0.099	0.101	0.191
30 m	1.02	0.079	0.077	-0.227

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.95	0.152	0.161	0.344
15 m	0.94	0.096	0.102	0.655
20 m	0.94	0.096	0.102	0.655
30 m	0.96	0.090	0.095	0.493

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	0.93	0.153	0.164	0.432
15 m	0.92	0.098	0.107	0.817
20 m	0.92	0.098	0.107	0.817
30 m	0.94	0.090	0.096	0.723

Tableau 5-43 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	1.02	0.118	0.116	-0.177
20 m	1.01	0.099	0.098	-0.108
40 m	0.99	0.070	0.071	0.120
60 m	0.92	0.038	0.041	2.039

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	1.03	0.123	0.120	-0.215
20 m	1.00	0.082	0.082	0.014
40 m	1.00	0.075	0.075	-0.047
60 m	0.95	0.057	0.060	0.922

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
10 m	1.01	0.120	0.118	-0.077
20 m	0.97	0.081	0.084	0.307
40 m	0.98	0.073	0.074	0.294
60 m	0.92	0.056	0.060	1.356

Il est d'abord possible de voir que les ponts à une voie sont mal représentés à l'effort tranchant. Ceux-ci présentent les écarts-types et les coefficients de variation les plus élevés. Pour les ponts à une voie de 10 m avec des poutres en acier, le coefficient de variation atteint même 0.16.

Pour les ponts à deux voies et plus, la méthode simplifiée n'est pas assez conservatrice avec des biais élevés pour les trois types de ponts. Par contre, sauf pour les portées courtes de 10 m, la méthode simplifiée présente une faible dispersion. Les écarts-types et les coefficients de variation sont faibles en bas de 0.1.

Il est possible de voir que les écarts-types et les biais sont corrélés à la portée pour les ponts à deux voies et plus. En effet, le biais a tendance à diminuer avec la portée tandis que l'écart-type diminue avec la portée. La méthode simplifiée s'améliore donc avec l'augmentation de la portée. Cette tendance est différente pour les ponts à une voie où le biais augmente avec la portée tandis que l'écart-type diminue avec l'augmentation de la portée. Une amélioration de la méthode simplifiée serait donc possible en corrélant la portée au facteur d'essieu.

5.3.3.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour les portées simples, une analyse est faite seulement avec les valeurs extrêmes pour chaque modèle de pont, c'est-à-dire en retenant la valeur maximale de l'effort entre la poutre intérieure et la poutre extérieure. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.36.

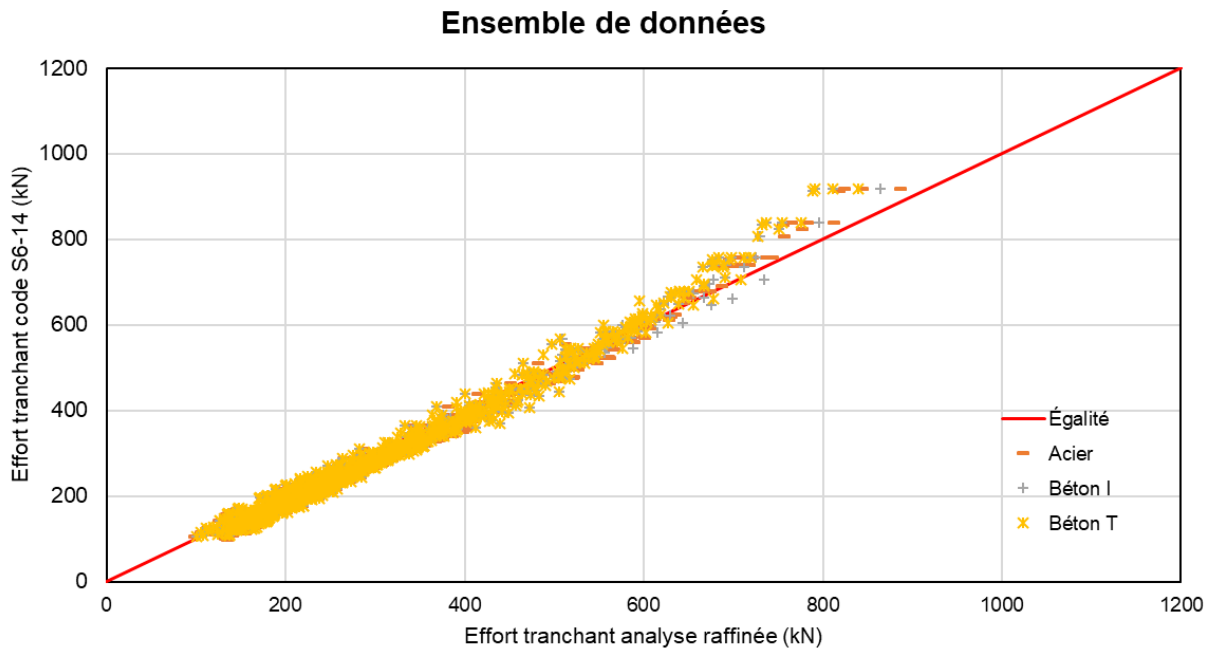


Figure 5.36 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 – Ensemble des données – Portées continues à trois travées

Il est possible de voir que les tendances sont similaires lorsqu'on se penche sur l'échantillon au complet. Dans le cas présent, les résultats sont non-sécuritaires et une grande portion des points dépassent l'égalité. Le nombre de dépassement, comme pour l'échantillon complet, diminue avec la portée. Le Tableau 5-44 présente l'effet de prendre en compte les efforts maximaux sur les paramètres statistiques.

Tableau 5-44 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales à l'effort tranchant l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Type des poutres	Position des poutres	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	1.07	0.083	0.078	-0.843
Poutres en béton I	**Max**	1.05	0.081	0.077	-0.617
Poutres en béton T	**Max**	1.05	0.083	0.080	-0.602

Tout d'abord, il est possible de voir que les résultats pour les valeurs extrêmes sont similaires dans les trois cas. Cependant, celui-ci est élevé et cela explique les nombreux cas non-sécuritaires montrés à la Figure 5.36. Les statistiques associées à la dispersion sont également proches entre les trois types de ponts.

5.3.4 Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour les moments fléchissants à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à trois travées.

5.3.4.1 Ensemble des résultats

Comme aux sections précédentes, les efforts de flexion sont comparés à ceux issus de la méthode simplifiée. La comparaison des efforts de flexion positifs de la première travée est illustrée sur la Figure 5.37 alors que les paramètres statistiques sont présentés au Tableau 5-45.

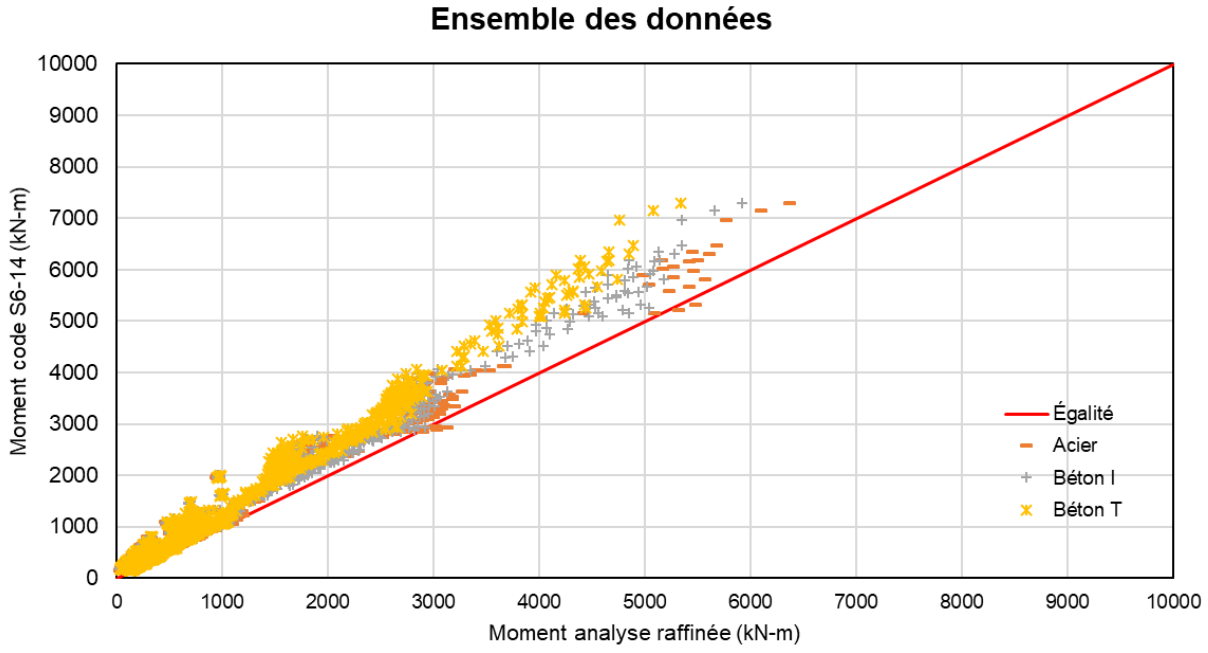


Figure 5.37 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 1 – Ensemble des données

Tableau 5-45 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 1

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.778	0.234	0.301	0.949
	Intérieure	0.790	0.101	0.128	2.079
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.769	0.212	0.275	1.090
	Intérieure	0.785	0.094	0.120	2.287
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.741	0.185	0.250	1.400
	Intérieure	0.754	0.093	0.123	2.645

Tout d'abord, le premier constat qu'il est possible de constater que les statistiques sont très similaires avec les ponts à 2 travées pour la flexion positive à l'ÉLF. Pour les trois matériaux, comme pour les ponts à 2 travées, il est possible de voir que la méthode simplifiée de la norme CSA S6-14 est généralement conservatrice. En effet, la majorité des points représentant les ponts se trouve dans la portion sécuritaire de la courbe. Il est donc possible de dresser les mêmes tendances que pour les ponts à 2 travées à l'ÉLF :

- la méthode simplifiée est trop conservatrice à l'ÉLF;
- la méthode simplifiée analyse mieux les poutres intérieures que les poutres extérieures;
    - différence marquée de l'écart-type entre la poutre intérieure et la poutre extérieure.
- présence d'un groupe de ponts de quelques ponts non-sécuritaires près de la courbe d'égalité seulement;
- présence d'un groupe de ponts trop conservateurs autour de 1000 kN-m en analyse raffinée;
- les statistiques sont similaires entre les trois types de ponts analysés.

Ensuite, la précision de la méthode simplifiée sur le moment de flexion positif de la travée 2 est évaluée. Dans la méthode simplifiée, seule la longueur L_e change entre les deux cas. La comparaison des efforts de flexion positifs de la première travée est illustrée sur la Figure 5.38 alors que les statistiques sont présentées au Tableau 5-46.

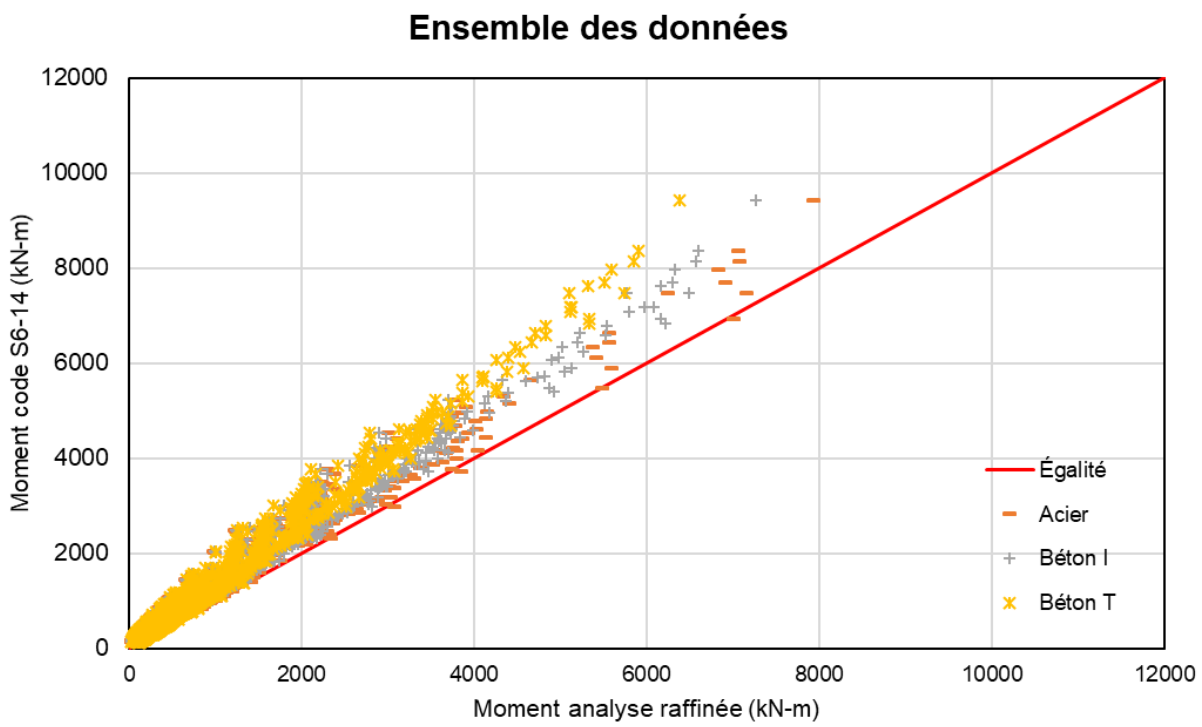


Figure 5.38 Comparaison des valeurs du moment positif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 2 – Ensemble des données

Tableau 5-46 Résultats statistiques pour la flexion positive à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Travée 2

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.779	0.222	0.285	0.995
	Intérieure	0.751	0.104	0.139	2.394
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.766	0.204	0.267	1.147
	Intérieure	0.749	0.102	0.136	2.461
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.733	0.177	0.241	1.508
	Intérieure	0.721	0.101	0.141	2.762

Les résultats présentés sur la Figure 5.38 et au Tableau 5-46 montrent des tendances qui sont semblables aux ponts à 2 travées. En effet, les résultats du moment de flexion positif pour la travée 2 sont similaires à ceux du moment de flexion positif de la travée 1. Les résultats sont autant similaires pour les biais que pour les écarts-types. La répartition des points est également semblable entre la travée 1 et la travée 2.

Comme pour les ponts à 2 travées, les moments de flexion négatifs à l'appui central du grillage sont comparés à ceux obtenus par la méthode simplifiée. La comparaison des efforts de flexion négatifs est illustrée sur la Figure 5.39 alors que les statistiques sont présentées au Tableau 5-47.

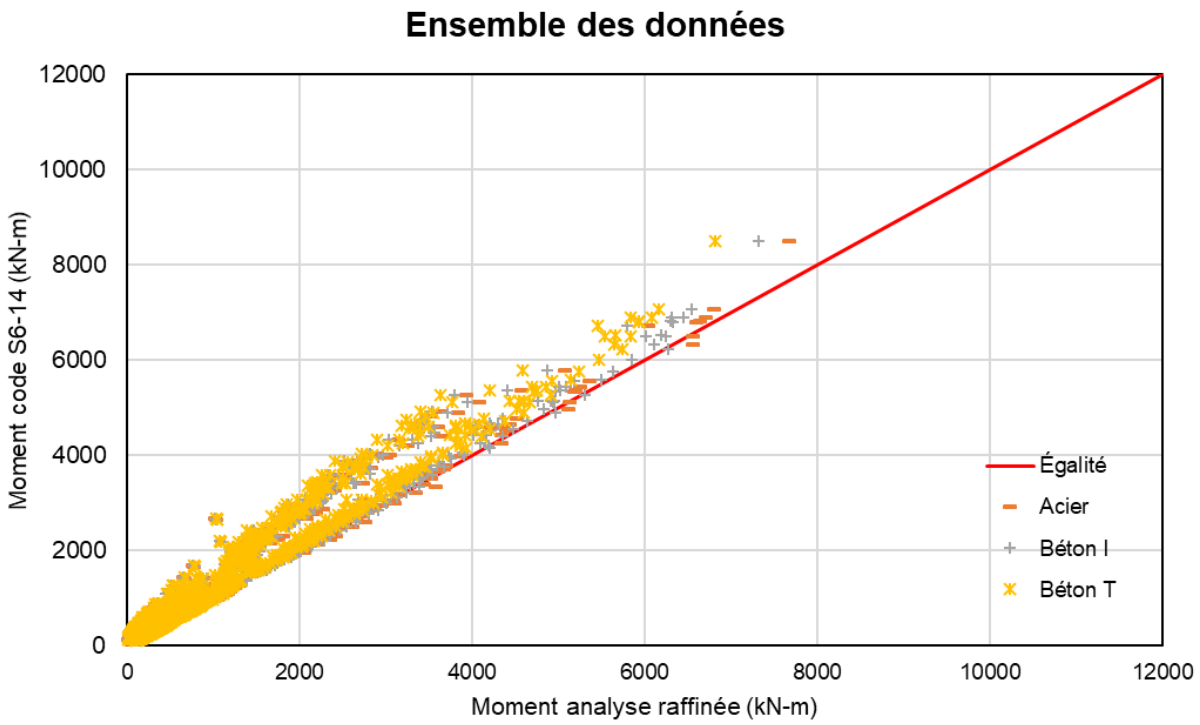


Figure 5.39 Comparaison des valeurs du moment négatif à l'ÉLF/ELS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données

Tableau 5-47 Résultats statistiques pour le moment négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées

Type des poutres	Position des poutres	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.829	0.271	0.326	0.631
	Intérieure	0.844	0.117	0.139	1.333
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.823	0.258	0.314	0.686
	Intérieure	0.850	0.128	0.151	1.172
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.807	0.241	0.299	0.801
	Intérieure	0.824	0.126	0.153	1.397

Il est possible de voir que les points sont généralement situés près de l'égalité. Il y a un autre groupe de ponts qui ne suivent pas cette tendance qui représentent des poutres extérieures de ponts avec peu de voies et avec des voies larges. Cependant, il y a également un certain nombre de ponts non-sécuritaires suivant la ligne d'égalité. La dispersion du nuage de points est grande et les valeurs se situent près de 1, alors il y a beaucoup de probabilités qu'il y a un grand nombre de dépassements. Les cas de dépassement qui suivent l'égalité en dessous de la courbe sont associés à des poutres extérieures de ponts avec de grands espacements de poutres et des porte-à-faux longs. Avec cette configuration, le chargement peut être positionné très près de la poutre extérieure.

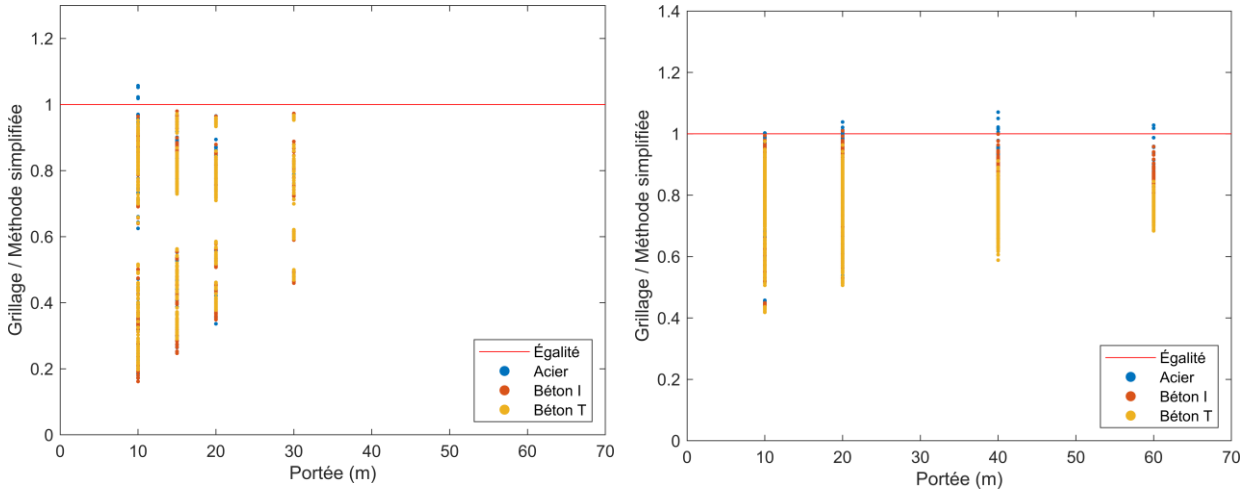
5.3.4.2 Analyse de l'effet de la portée

Cette section présente l'effet de la portée sur les résultats d'analyse pour les 3 moments de flexion des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à trois travées.

Dans les équations de la méthode simplifiée, les ponts continus sont traités à travers le concept de portée équivalente L_e qui est utilisé afin de calibrer le facteur D_T. Pour les ponts à 3 travées, une troisième définition est introduite afin d'estimer l'effort de flexion de la travée intermédiaire. La portée équivalente pour cet effort de flexion positif est $0.5L_2$.

Puisque la troisième travée vient modifier la répartition des efforts de flexion, il est pertinent de valider cette approche pour cette configuration. Pour chacun des efforts de flexion critiques (moment de flexion positif de la travée 1, moment de flexion positif de la travée 2 et le moment de flexion négatif), les valeurs sont corrélées à la portée. Pour le cas présent, puisque les ponts à 1 voie ont été modélisés avec des portées différentes, la présentation des résultats est séparée en 2 : les ponts à 1 voie et les ponts à plus d'une voie.

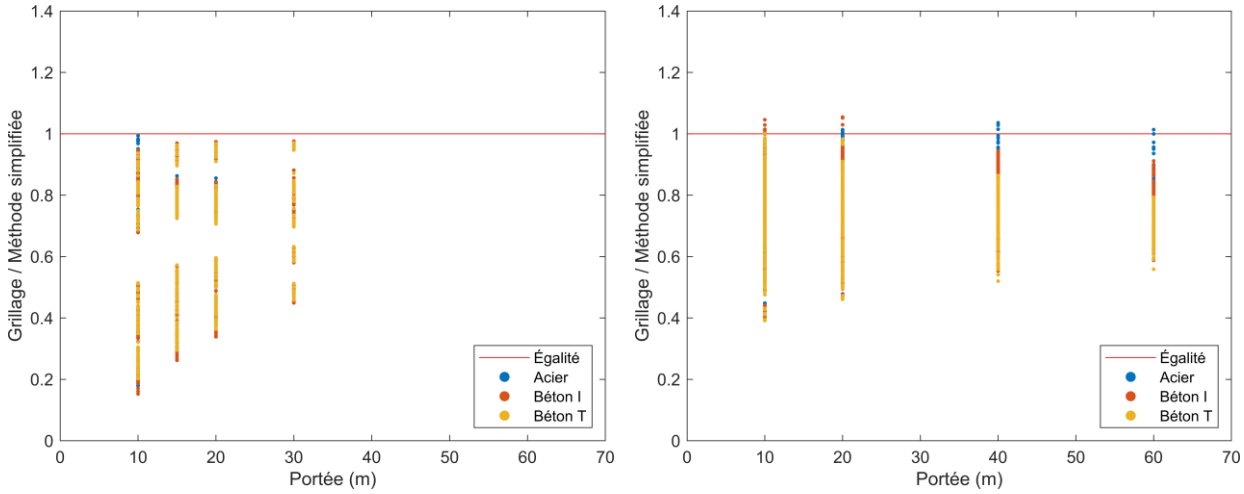
Premièrement, les moments de flexion positifs seront analysés. La Figure 5.40 et la Figure 5.41 présentent la comparaison des efforts de flexion positifs entre les deux méthodes.



1 voie

2 à 4 voies

Figure 5.40 Influence de la portée sur le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 1



1 voie

2 à 4 voies

Figure 5.41 Influence de la portée pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données – Travée 2

Tout d'abord, il est possible d'observer que les tendances sont similaires entre les travées 1 et 2. Les valeurs des ratios calculés entre les graphiques sont également similaires. La norme est généralement satisfaisante pour prédire le moment fléchissant positif autant pour la travée 1 que

pour la travée 2, car la majorité des points se situent en bas de 1. Ensuite, les résultats montrent que les valeurs minimales pour la flexion positive sont corrélées à la portée pour les trois types de poutres pour les ponts à une voie. Pour les ponts à 1 voie, la variation entre le biais minimal et la portée est linéaire. Pour les ponts à 2 voies et plus, la même tendance peut être observée. Afin de vérifier ces tendances, les paramètres statistiques en fonction de portée sont présentés au Tableau 5-48 et au Tableau 5-49.

Tableau 5-48 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.64	0.291	0.454	1.229
15 m	0.66	0.191	0.290	1.773
20 m	0.66	0.191	0.288	1.755
30 m	0.64	0.165	0.258	2.176

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.63	0.279	0.440	1.310
15 m	0.67	0.191	0.285	1.724
20 m	0.67	0.191	0.285	1.724
30 m	0.71	0.166	0.232	1.723

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.63	0.250	0.399	1.486
15 m	0.67	0.178	0.267	1.867
20 m	0.67	0.178	0.267	1.867
30 m	0.71	0.161	0.226	1.792

Tableau 5-49 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le du moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – 2 voies et plus – Travée 1

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.81	0.109	0.134	1.711
20 m	0.84	0.111	0.132	1.416
40 m	0.83	0.110	0.132	1.577
60 m	0.85	0.073	0.086	2.124

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.81	0.107	0.133	1.797
20 m	0.83	0.105	0.127	1.623
40 m	0.82	0.083	0.102	2.199
60 m	0.82	0.047	0.058	3.906

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.79	0.103	0.131	2.053
20 m	0.79	0.098	0.124	2.133
40 m	0.76	0.063	0.083	3.759
60 m	0.75	0.032	0.042	7.821

Tableau 5-50 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – 1 voie – Travée 2

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.64	0.274	0.431	1.333
15 m	0.65	0.173	0.265	1.994
20 m	0.66	0.173	0.264	1.978
30 m	0.63	0.150	0.238	2.495

	Pontsavec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.63	0.266	0.425	1.408
15 m	0.67	0.183	0.274	1.822
20 m	0.67	0.183	0.274	1.822
30 m	0.71	0.164	0.232	1.796

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.62	0.239	0.384	1.583
15 m	0.66	0.172	0.259	1.955
20 m	0.66	0.172	0.259	1.955
30 m	0.70	0.159	0.225	1.868

Tableau 5-51 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant positif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 2 travées – 2 voies et plus – Travée 2

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.79	0.114	0.144	1.809
20 m	0.82	0.127	0.155	1.382
40 m	0.79	0.131	0.166	1.589
60 m	0.80	0.105	0.131	1.919

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.79	0.117	0.147	1.787
20 m	0.81	0.121	0.149	1.557
40 m	0.79	0.101	0.129	2.089
60 m	0.77	0.074	0.096	3.076

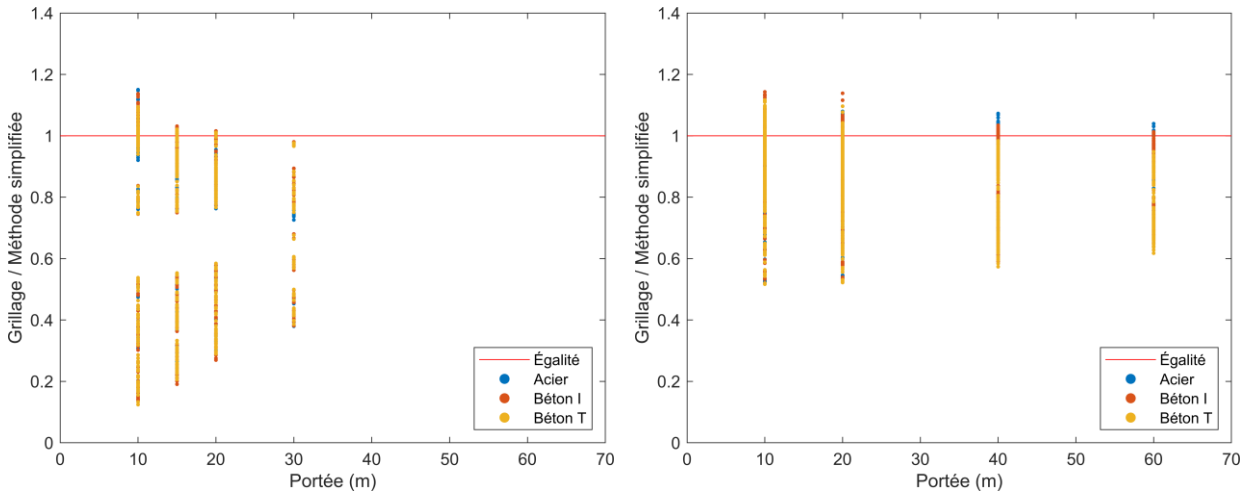
	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.77	0.112	0.145	2.043
20 m	0.77	0.109	0.142	2.114
40 m	0.73	0.079	0.108	3.411
60 m	0.71	0.049	0.069	5.983

Les résultats montrent que l'influence de la portée sur le biais est similaire à celle des ponts à deux travées et à celle des ponts à trois travées à l'ÉLF. Les tendances observées sont :

- la méthode simplifiée évalue mal les efforts de flexion pour ponts à une voie;
- l'écart-type et le coefficient de variation a tendance à diminuer avec l'augmentation de la portée;
- la méthode est mieux adaptée pour des ponts à deux voies et plus, car les écarts-types sont beaucoup plus faible;

- la méthode simplifiée tend à surestimer les efforts de flexion positifs pour les deux travées pour toutes les portées.

L'influence de la portée pour la flexion négative est analysée à la Figure 5.42 où sont présentés graphiquement les ratios par rapport à la portée. Les Tableau 5-52 et Tableau 5-53 présentent les résultats statistiques.



1 voie 2 voies et plus

Figure 5.42 Influence de la portée pour le moment de flexion négatif à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données

Tableau 5-52 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue – 1 voie – 3 travées

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.70	0.343	0.492	0.885
15 m	0.68	0.216	0.319	1.494
20 m	0.67	0.216	0.323	1.533
30 m	0.59	0.163	0.276	2.508

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.72	0.363	0.505	0.778
15 m	0.70	0.247	0.352	1.204
20 m	0.70	0.247	0.352	1.204
30 m	0.70	0.194	0.275	1.533

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.71	0.339	0.479	0.864
15 m	0.70	0.234	0.335	1.297
20 m	0.70	0.234	0.335	1.297
30 m	0.70	0.188	0.268	1.596

Tableau 5-53 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour le moment fléchissant négatif – Portée continue – 2 voies et plus – 3 travées

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.89	0.117	0.131	0.920
20 m	0.89	0.124	0.139	0.857
40 m	0.85	0.149	0.175	0.989
60 m	0.86	0.122	0.143	1.181

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.92	0.122	0.133	0.686
20 m	0.89	0.120	0.135	0.935
40 m	0.85	0.131	0.154	1.128
60 m	0.84	0.118	0.140	1.387

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
10 m	0.90	0.118	0.131	0.829
20 m	0.86	0.117	0.136	1.165
40 m	0.81	0.120	0.148	1.555
60 m	0.79	0.101	0.127	2.046

Les résultats et les constats pour la flexion négative sont :

- la méthode simplifiée évalue mal les efforts de flexion pour ponts à une voie;
- le biais diminue avec la portée pour les ponts à une voie sauf pour les portées de 60 m;
- l'écart-type et le coefficient de variation tendent à diminuer avec l'augmentation de la portée pour les ponts à une voie;
- l'écart-type et le coefficient de variation tendent à augmenter avec l'augmentation de la portée pour les ponts à deux voies et plus;
- la méthode est mieux adaptée pour des ponts à deux voies et plus, car les écarts-types sont beaucoup plus faibles.

Par contre, les biais pour la flexion négative pour les ponts à deux voies et plus montrent que la méthode simplifiée a moins tendance à surestimer les efforts. En effet, le biais est près de 0.9 ce qui indique qu'elle prédit bien en moyenne les efforts de flexion négative. Par contre, les écarts-type restent élevés, alors la précision n'est pas meilleure qu'à la flexion positive.

Le type de pont a également une incidence sur les résultats. En effet, les résultats entre les types de ponts varient pour le biais et l'écart-type. Cependant, les coefficients de variation restent semblables entre les types de ponts.

5.3.5 Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2

Cette section porte sur la comparaison de la méthode simplifiée du Code S6-14 avec la méthode raffinée du grillage pour l'effort tranchant à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à deux travées.

5.3.5.1 Ensemble des résultats

Dans cette section, une analyse comparative des efforts de cisaillement issus de la méthode simplifiée et du grillage est présentée. La Figure 5.43 présente la comparaison directe des efforts de cisaillement exprimés en kN.

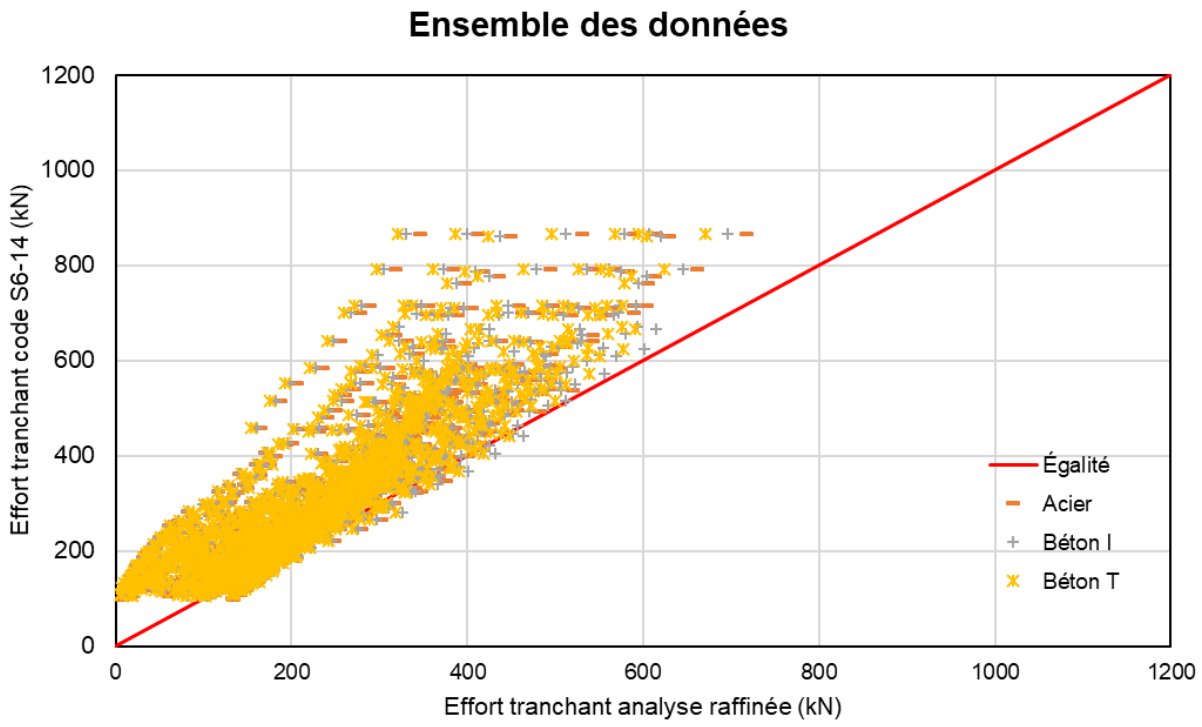


Figure 5.43 Comparaison des valeurs de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées – Ensemble des données

Les efforts de cisaillement pour les ponts à 3 travées à l'ÉLF présentent des caractéristiques différentes des ponts à 2 travées. En effet, les efforts sont tout d'abord plus élevés. Le nuage de points suit la ligne d'égalité et la tendance quadratique est atténuée. Les prédictions du Code

semblent plus justes pour les ponts à trois travées. De la même manière que pour les portées simples, les paramètres statistiques pour le cisaillement sont analysés et présentés au Tableau 5-54.

Tableau 5-54 Résultats statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 – Portées continues à 3 travées

Type des poutres	Position des poutres	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.580	0.231	0.398	1.818
	Intérieure	0.711	0.156	0.220	1.853
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.599	0.235	0.393	1.706
	Intérieure	0.719	0.151	0.209	1.861
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.591	0.230	0.389	1.778
	Intérieure	0.701	0.150	0.214	1.993

Les tendances sont similaires que pour les portées continues à deux travées à l'ÉLF. Comme mentionné plus tôt, avec une seule équation pour calculer le cisaillement d'une poutre extérieure et celui d'une poutre intérieure, les résultats vont différer entre ces deux positions de poutres. En effet, en réalité, la valeur de cisaillement diffère entre ces deux positions et une seule équation ne peut être utilisée pour les calculs du cisaillement des deux poutres. Dans le cas présent, les résultats sont meilleurs pour les poutres intérieures, car ils sont près de 1. De plus, leurs écarts-types et leurs coefficients de variation sont également plus faibles que ceux des poutres extérieures. Les valeurs des poutres extérieures sont trop faibles et l'écart-type est plus élevé. Cela est causé par la géométrie problématique décrite à la Figure 4.9.

Un paramètre qui est considéré dans le calcul des facteurs d'essieu pour le cisaillement est le nombre de voies sur le pont. Dans le Code, la valeur du paramètre D_T varie pour considérer le nombre de voies. La Figure 5.44 illustre l'influence du nombre de voies sur l'effort tranchant alors que les statistiques sont présentées au Tableau 5-55.

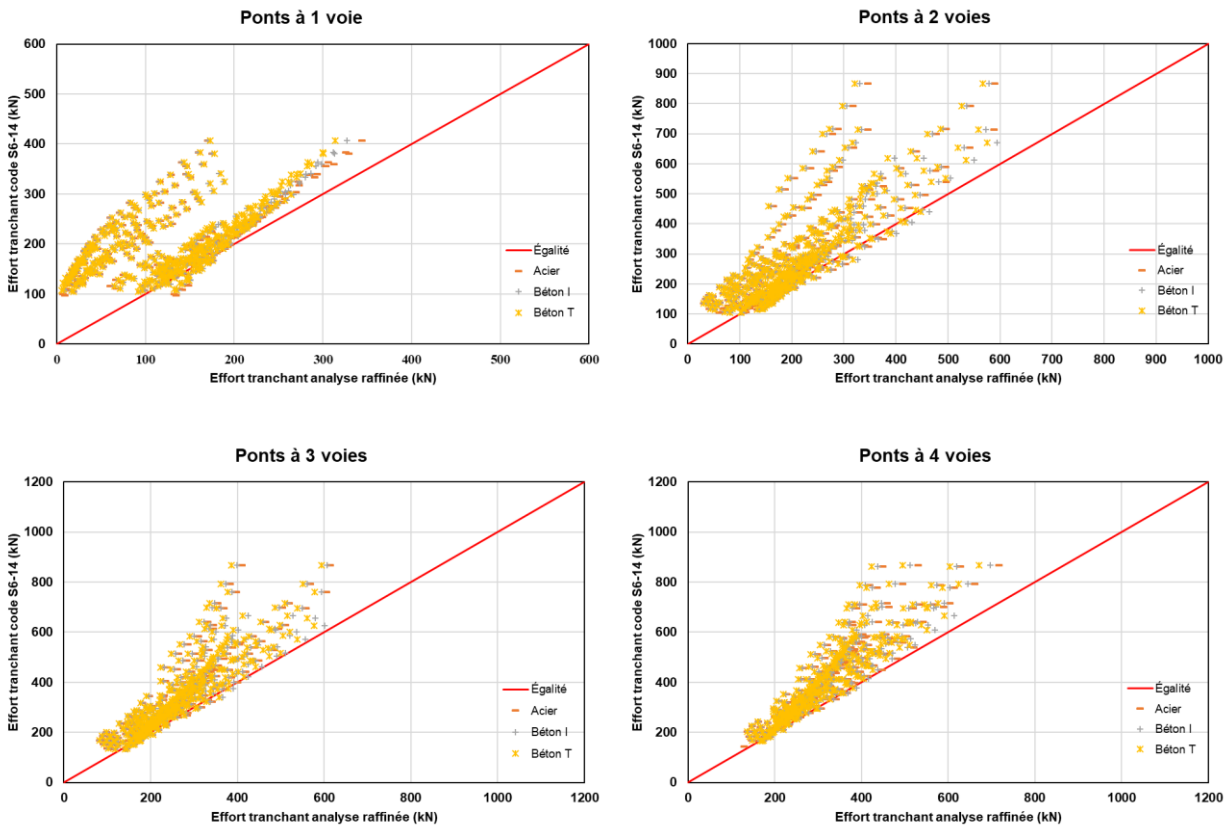


Figure 5.44 Comparaison des valeurs de l’effort tranchant à l'ÉLF/ELS-2 – Étude par nombre de voies – Portées continues à 3 travées

Tableau 5-55 Comparaison des statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 selon le nombre de voies – Portées continues à 3 travées

	Type des poutres	Position des poutres	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
1 voie	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.360	0.194	0.539	3.299
		Intérieure	0.928	0.096	0.104	0.750
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.378	0.210	0.555	2.962
		Intérieure	0.907	0.105	0.115	0.886
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.378	0.212	0.559	2.934
		Intérieure	0.885	0.109	0.123	1.055
2 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.727	0.215	0.296	1.270
		Intérieure	0.820	0.218	0.266	0.826
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.744	0.212	0.285	1.208
		Intérieure	0.815	0.212	0.260	0.873
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.733	0.206	0.281	1.296
		Intérieure	0.793	0.209	0.263	0.990
3 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.815	0.133	0.163	1.391
		Intérieure	0.818	0.150	0.183	1.213
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.821	0.128	0.155	1.398
		Intérieure	0.802	0.149	0.186	1.329
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.808	0.124	0.154	1.548
		Intérieure	0.782	0.150	0.191	1.453
4 voies	**Poutres en acier**	**Extérieure**	0.851	0.096	0.113	1.552
		Intérieure	0.777	0.123	0.159	1.813
	Poutres en béton I	**Extérieure**	0.845	0.102	0.121	1.520
		Intérieure	0.767	0.118	0.154	1.975
	Poutres en béton T	**Extérieure**	0.829	0.101	0.122	1.693
		Intérieure	0.748	0.119	0.159	2.118

Les tendances des efforts de cisaillement pour les portées continues sont similaires des ponts à deux travées pour l'effet du nombre de voies à l'ÉLF:

- présence de la même tendance pour les ponts de 1 voie et d'une autre tendance pour les ponts de 2 à 4 voies;
- les valeurs à l'effort tranchant comportent beaucoup de dépassements pour tous les nombres de voies;
- les ponts à 1 voies sont les plus sécuritaires et surestiment beaucoup l'effort tranchant;
- la méthode simplifiée est mal calibrée pour les ponts à une voie;
- les résultats de la méthode simplifiée s'améliorent avec l'augmentation du nombre de voies;
- les points suivent l'égalité pour les ponts de deux voies et plus.

La tendance quadratique pour les ponts à trois et quatre voies est atténuée pour les ponts à trois travées. Cette tendance était beaucoup plus marquée pour les ponts à deux travées. L'allure quadratique du nuage de points est encore présente pour les ponts à trois travées, mais l'effet est plus léger.

5.3.5.2 Analyse de l'effet de la portée

Cette section présente l'effet de la portée sur les résultats d'analyse pour l'effort tranchant des portées continues de la méthode simplifiée à l'état limite de fatigue (ÉLF) et à l'état limite de service 2 (ÉLS-2) pour les ponts à deux travées.

Dans l'édition actuelle de la norme CSA S6-14, comme pour les ponts à deux travées, le facteur d'essieu pour le cisaillement ne dépend pas de la portée du pont. En effet, aucun paramètre ne varie en fonction de la portée équivalente L_e. Cependant, il est possible que ce paramètre puisse avoir un effet sur la distribution des efforts de cisaillement. Dans le cas des ponts à deux travées, un effet important de la portée sur le cisaillement a été relevé. Pour pouvoir qualifier l'influence de ce paramètre, les résultats sont présentés sur la Figure 5.45 alors que les statistiques par portée sont ensuite présentées au Tableau 5-56 et au Tableau 5-57.

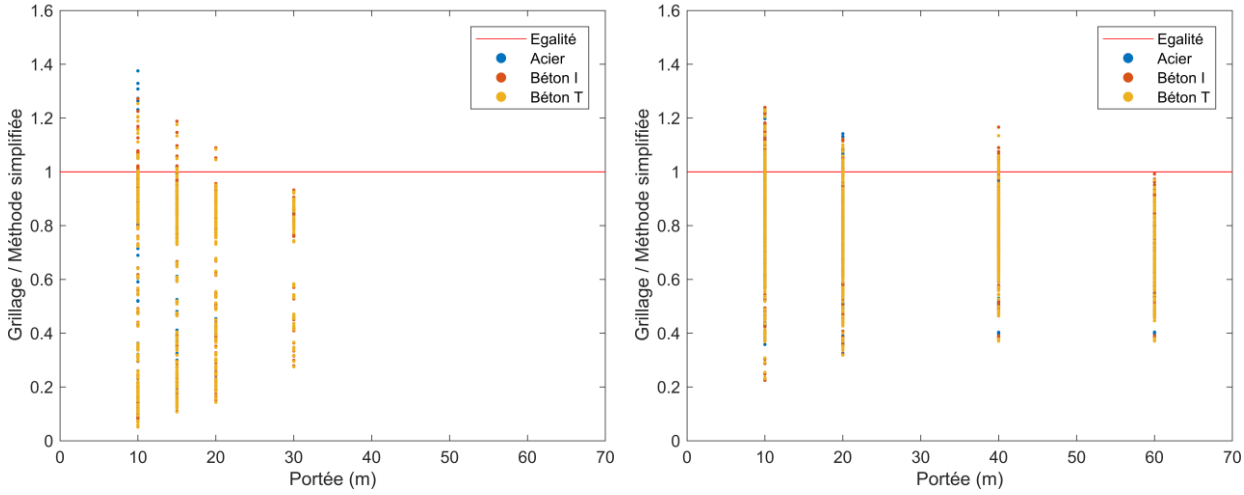


Figure 5.45 Influence de la portée pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portées continues à 3 travées - Ensemble des données

Tableau 5-56 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 1 voie

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.64	0.369	0.580	0.976
15 m	0.64	0.301	0.468	1.196
20 m	0.66	0.257	0.391	1.323
30 m	0.65	0.212	0.328	1.651

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.64	0.363	0.572	0.992
15 m	0.63	0.316	0.501	1.171
20 m	0.65	0.274	0.424	1.277
30 m	0.69	0.213	0.307	1.455

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.62	0.353	0.568	1.076
15 m	0.62	0.308	0.496	1.234
20 m	0.64	0.267	0.419	1.348
30 m	0.68	0.204	0.298	1.569

Tableau 5-57 Influence de la portée sur les paramètres statistiques pour l'effort tranchant – Portée continue à 3 travées – 2 voies et plus

	Ponts avec poutres en acier			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.83	0.188	0.227	0.904
20 m	0.81	0.146	0.180	1.301
40 m	0.73	0.133	0.182	2.030
60 m	0.65	0.139	0.213	2.518

	Ponts avec poutres en béton I			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.84	0.189	0.226	0.847
20 m	0.80	0.153	0.191	1.307
40 m	0.79	0.138	0.175	1.522
60 m	0.71	0.144	0.204	2.014

	Ponts avec poutres en béton T			
	δ_{VF}	σ_{VF}	V_{VF}	k_A
10 m	0.82	0.186	0.226	0.968
20 m	0.79	0.150	0.191	1.400
40 m	0.77	0.134	0.174	1.716
60 m	0.69	0.141	0.204	2.199

Il est d'abord possible de voir que les ponts courts sont également mal représentés pour les ponts à trois travées pour les ponts à une voie à l'ÉLF. En effet, à ces portées les biais sont plus faibles et les écarts-types sont élevés. Cet effet est le plus visible sur les ponts à 10 et 15 m où le coefficient de variation est autour de 0.5 ce qui est très élevé. À l'ÉLF, les résultats obtenus à l'effort tranchant sont similaires entre les trois types de ponts étudiés.

Pour les ponts à deux voies et plus, les écarts-types diminuent avec l'augmentation de la portée seulement sauf pour les ponts de 60 m. À 60 m, l'écart-type croit par rapport à 40 m. Cela est attribuable en partie au fait qu'à 60 m, les limites géométriques imposées causent que l'échantillon

est plus petit que pour les autres portées. Des effets plus locaux peuvent donc avoir une incidence sur les résultats. Également, à l'ÉLF, le biais diminue avec la portée. La diminution du biais est plus rapide à l'ÉLF qu'à l'ÉLU également. Cet effet est associé avec le fait que ne pouvoir positionner qu'un seul camion à l'ÉLF et que les essieux déterminants varient selon les portées. L'effort tranchant est beaucoup plus sensible à l'essieu déterminant que la flexion.

5.3.5.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour les portées simples, une analyse est faite seulement avec les valeurs extrêmes pour chaque modèle de pont, c'est-à-dire en retenant la valeur maximale de l'effort entre la poutre intérieure et la poutre extérieure. Les résultats sont présentés sur la Figure 5.46.

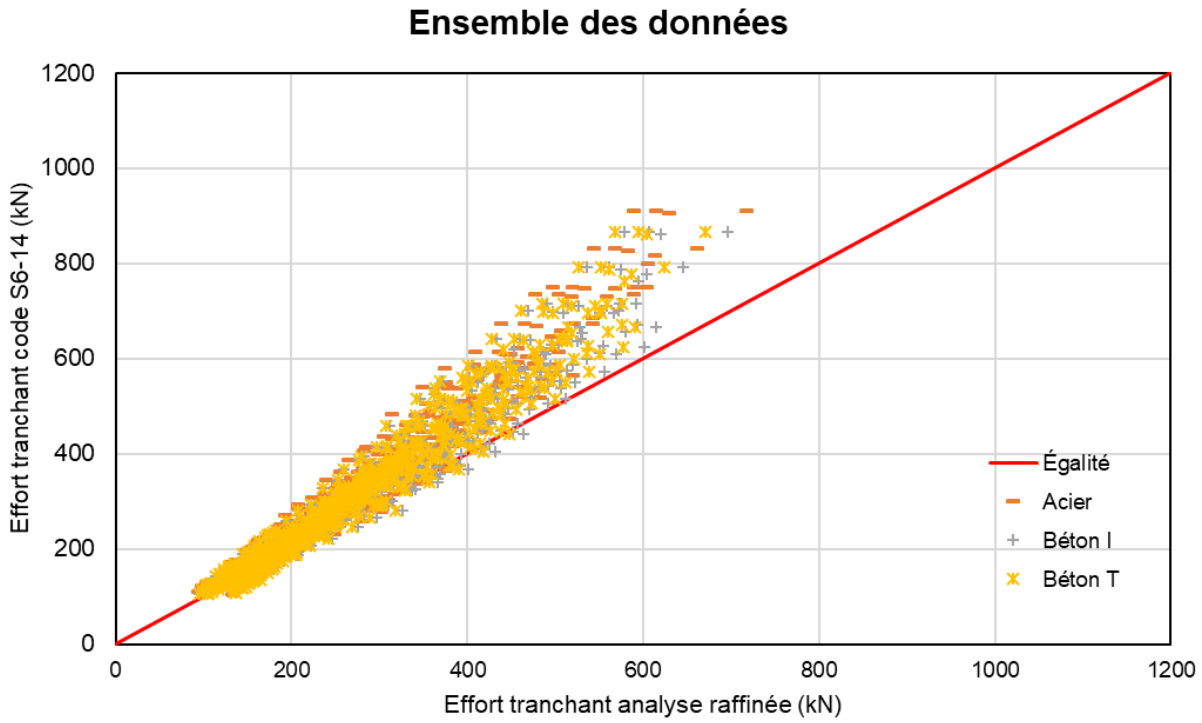


Figure 5.46 Comparaison des valeurs maximales de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Ensemble des données – Portées continues à trois travées

Il est possible de voir que les tendances sont différentes lorsqu'on se penche sur l'échantillon au complet. En effet, les points sont plus condensés et plus près de la ligne d'égalité. En ne considérant que les valeurs maximales, la méthode simplifiée est plus précise que lorsqu'on considère

individuellement les poutres intérieures et extérieures. Le Tableau 5-58 présente l'effet de prendre en compte les efforts maximaux sur les paramètres statistiques.

Tableau 5-58 Paramètres statistiques pour les valeurs maximales de flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 – Portées simples

Type des poutres	**Position des poutres**	$\boldsymbol{\delta_{MU}}$	$\boldsymbol{\sigma_{MU}}$	$\boldsymbol{V_{MU}}$	$\boldsymbol{k_A}$
Poutres en acier	**Max**	0.870	0.100	0.113	1.300
Poutres en béton I	**Max**	0.913	0.106	0.116	0.821
Poutres en béton T	**Max**	0.907	0.105	0.116	0.886

Les tendances sont confirmées par les statistiques. En effet, autant le biais que l'écart-type et le coefficient de variation sont améliorés lorsqu'on considère les valeurs maximales.

CHAPITRE 6 AMÉLIORATIONS À LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

6.1 Sommaire de la validation de la méthode simplifiée

Les résultats des analyses de validation de la méthode simplifiée présentés aux chapitres 4 et 5 permettent de faires les constats suivants. Il est ainsi permis de conclure que la méthode simplifiée est :

1. généralement adéquate ou légèrement conservatrice pour les ponts de type portée simple à l'ÉLU/ÉLS-1, sauf à l'effort tranchant pour quelques géométries de ponts;
2. trop conservatrice à l'ÉLF/ÉLS-2, en flexion et à l'effort tranchant;
3. non conservatrice à l'ÉLU/ÉLS-1, en flexion et à l'effort tranchant, pour les ponts continus de 2 et 3 travées;
4. non conservatrice à l'ÉLF/ÉLS-2, en flexion et à l'effort tranchant pour les ponts continus de 2 et 3 travées.

Le facteur d'essieu des ponts de type dalle sur poutres est calculé à partir des deux équations suivantes selon l'état limite vérifié :

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c (1+\mu\lambda)} \geq 1.05 \frac{nR_L}{N} \text{, ÉLU/ÉLS-1} \tag{6.1}$$

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c (1+\mu\lambda+\gamma_e)} \geq \frac{1.05}{N} \text{, ÉLF/ÉLS-2} \tag{6.2}$$

Les améliorations peuvent être effectuées selon différentes stratégies selon la situation. Pour les cas où la méthode est non sécuritaire, les équations peuvent être améliorées ou encore les limites d'application de la méthode peuvent être modifiées afin d'éliminer les ponts problématiques. Les améliorations peuvent s'appliquer sur les équations de F_T directement en ajoutant un facteur lorsque l'imprécision affecte l'ensemble des ponts ou encore sur les valeurs de D_T dans le cas où l'imprécision varie selon la portée du pont.

Différents niveaux de corrections peuvent être appliqués. Dans le cadre de ce travail, les modifications proposées visent à assurer une meilleure précision globale sans chercher à optimiser outre mesure la précision des équations, mais plutôt afin d'identifier les principales tendances et de guider le comité technique du Code CSA-S6. Les correctifs proposés visent leur implantation dans l'édition 2019 du code alors que les raffinements additionnels pourront être implantés dans l'édition suivante prévue pour 2024.

6.2 Ponts à portée simple

6.2.1 Flexion à l'ÉLU/ÉLS-1

Deux facteurs sont introduits pour améliorer la précision de la méthode simplifiée à l'ÉLU/ELS-1 en flexion, γ_J pour la torsion et γ_S pour les poutres très rapprochées, de sorte que l'équation 6.1 devient :

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c \gamma_J \gamma_S (1+\mu\lambda)} \geq 1.05 \frac{nR_L}{N} \tag{6.3}$$

Les résultats des analyses ont révélé que l'inertie en torsion des poutres avait une influence sur les résultats à la flexion. En effet, les ponts avec des rigidités en torsion plus importante présentent une meilleure distribution des efforts entre les poutres. Il est donc proposé d'introduire un nouveau paramètre γ_J afin de rendre la méthode plus cohérente entre les différents types de poutres utilisés :

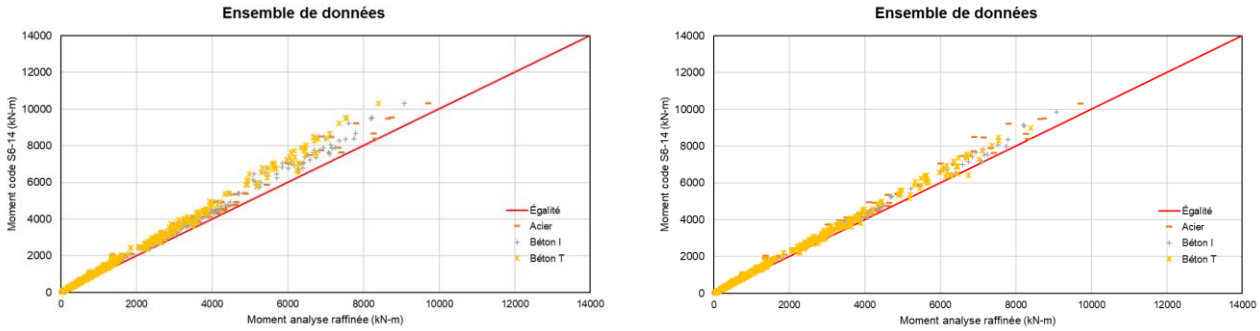
$$\gamma_J = 1 + 0.05\left(J/J_o\right) \tag{6.4}$$

où J_o représente l'inertie en torsion de la dalle $S\,h_d^3/3$, où J_o ne change pas avec la portée;

J représente l'inertie totale en torsion de la poutre (dalle et poutre).

Ce paramètre permet de tenir compte du type de poutre utilisé en mettant en relation l'inertie en torsion des poutres et l'inertie en torsion de la dalle. Dans le cas présent, l'hypothèse que l'inertie en torsion de dalle ne varie pas est posée. L'inertie J_o est tributaire de l'espacement des poutres et l'épaisseur de la dalle qui ne sont pas directement corrélés à la portée. Ce paramètre permet également de refléter le fait que l'influence de la répartition transversale des efforts par la dalle

diminue à mesure que la poutre est rigide en torsion. Les effets de ce changement peuvent être observés à la Figure 6.1 et les effets en termes statistiques au Tableau 6-1.



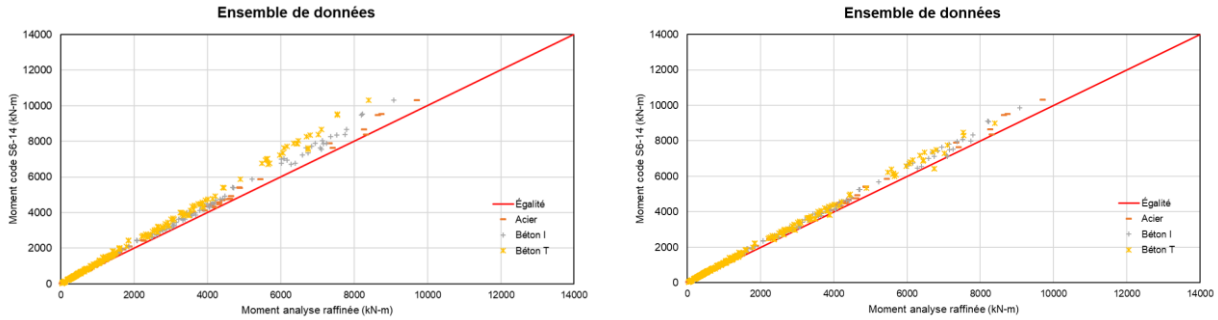
a) Code S6-14 sans les facteurs de correction b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.1 Effet de l'introduction de γ_J à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple

Tableau 6-1 Effet de l'introduction de γ_J sur les statistiques à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple

Avant corrections					
Type de poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.907	0.044	0.049	2.114
	Intérieure	0.901	0.076	0.084	1.303
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.898	0.032	0.035	3.188
	Intérieure	0.892	0.056	0.063	1.929
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.854	0.039	0.045	3.744
	Intérieure	0.878	0.067	0.076	1.821
Après corrections					
Type de poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.908	0.044	0.049	2.091
	Intérieure	0.902	0.076	0.084	1.289
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.913	0.034	0.037	2.559
	Intérieure	0.905	0.054	0.060	1.759
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.891	0.042	0.047	2.595
	Intérieure	0.907	0.057	0.063	1.632

Les effets de ce changement peuvent être observés à la Figure 6.2 et les effets en termes statistiques au Tableau 6-2 pour les valeurs maximales.



a) Code S6-14 sans les facteurs de correction b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.2 Effet de l'introduction de γ_J à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – Valeurs maximales

Tableau 6-2 Effets de l'introduction de γ_J sur les statistiques des valeurs maximales à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.909	0.044	0.048	2.068
Poutres en béton I	**Max**	0.900	0.029	0.033	3.448
Poutres en béton T	**Max**	0.860	0.040	0.046	3.500
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.909	0.044	0.048	2.068
Poutres en béton I	**Max**	0.914	0.032	0.039	2.688
Poutres en béton T	**Max**	0.897	0.039	0.043	2.641

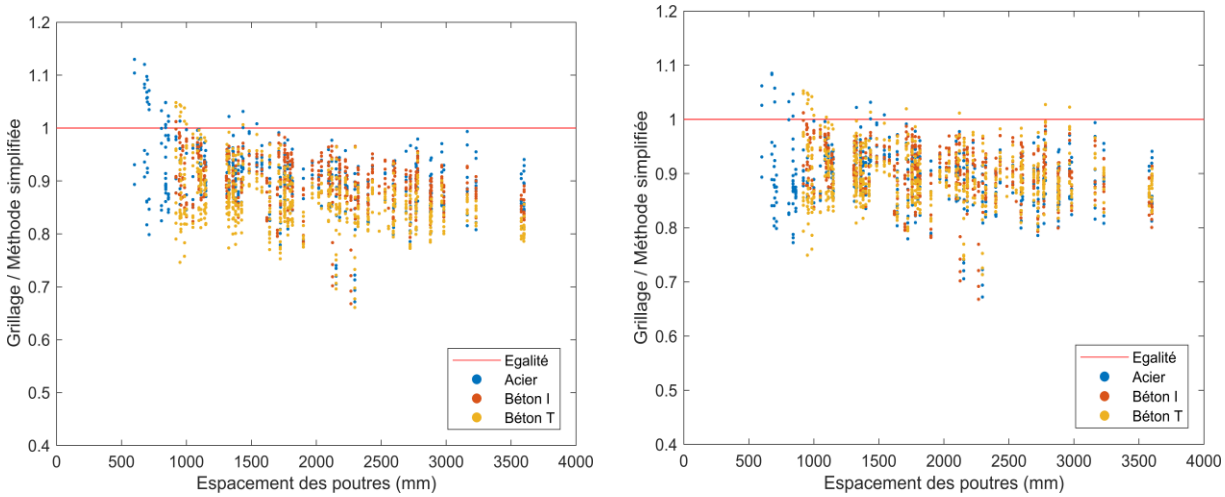
Il est possible de voir que les changements proposés améliorent la méthode simplifiée. Tout d'abord, le paramètre lié à la rigidité en torsion permet d'obtenir une meilleure consistance entre les types de poutres. Au lieu d'avoir une tendance par type de poutre, tous les points suivent désormais la même tendance. De plus, cela se répercute également sur les statistiques. En effet, les biais tendent plus vers les mêmes valeurs pour les trois types de poutres. La cohérence de la méthode par rapport aux types de poutre est donc améliorée avec les changements.

Une autre proposition pour la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 est d'ajouter un paramètre afin de réduire le nombre de ponts à courts espacements qui sont non-sécuritaires. En effet, au chapitre 4, à l'ÉLU/ÉLS-1, il a été possible d'observer sur la Figure 4.4 que les ponts avec de petits espacements présentent plusieurs cas non-sécuritaires. Afin de rendre ces ponts sécuritaires sans pénaliser tout l'échantillon, le paramètre γ_S proposé s'exprime comme suit, où S représente l'espacement des poutres (m) :

$$\gamma_S = 0.7 + S/3 \leq 1.0 \text{ , pour les poutres extérieures} \tag{6.5}$$

$$\gamma_S = 0.6 + S/3 \leq 1.0 \text{ , pour les poutres intérieures} \tag{6.6}$$

Afin de bien observer l'effet du paramètre γ_S, la Figure 6.3 illustre la dispersion du ratio grillage sur méthode simplifiée en fonction de l'espacement des poutres. Il est possible d'observer que, tel que voulu, ce paramètre n'affecte que les ponts problématiques, c'est-à-dire ceux dont l'espacement des poutres est très faible. Les ponts dont l'espacement des poutres est supérieur à 0.9 m ou 1.2 m respectivement pour les poutres extérieures et intérieures ne sont pas touchés par les changements. Ce paramètre a pour effet de diminuer le nombre de ponts non conservateurs. Malgré qu'il reste encore des ponts non conservateurs, la grande majorité des ponts tombent du côté sécuritaire avec ce changement. Les dépassements deviennent peu nombreux et alors la méthode simplifiée devient donc plus sécuritaire pour ces ponts. Le Tableau 6-3 présente l'effet combiné de γ_J et γ_S sur les statistiques des valeurs maximales. Le paramètre γ_S affecte les ponts en réduisant le nombre de dépassements pour les ponts avec des poutres peu espacées tel qu'il est possible de voir sur la Figure 6.3. De plus, en réduisant ces dépassements, il est possible de voir que ce paramètre permet au biais et à l'écart-type de légèrement diminuer également.



a) Code S6-14 sans les facteurs de correction b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.3 Effet de l'introduction de γ_S pour la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple

Tableau 6-3 Effets combinés de l'introduction de γ_J et γ_S sur les statistiques des valeurs maximales à la flexion à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.909	0.044	0.048	2.068
Poutres en béton I	**Max**	0.914	0.032	0.039	2.688
Poutres en béton T	**Max**	0.897	0.039	0.043	2.641
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.903	0.044	0.049	2.205
Poutres en béton I	**Max**	0.912	0.031	0.034	2.839
Poutres en béton T	**Max**	0.890	0.038	0.042	2.895

6.2.2 Flexion à l'ÉLF/ÉLS-2

Tout comme pour la flexion à l'ÉLF/ÉLS-1, les analyses au chapitre 4 ont montré la même observation à l'ÉLU/ÉLS-1 par rapport au fait que l'inertie en torsion des poutres avait une influence sur les résultats à la flexion. En effet, dans le cas présent également, les résultats n'étaient pas pareils dépendamment du type de poutre utilisé. Le même nouveau paramètre est donc proposé afin de rendre la méthode plus cohérente entre les différents types de poutres utilisés. Étendre l'ajout du paramètre γ_J la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 est donc proposée. L'équation 6.2 devient ainsi :

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c \gamma_J (1 + \mu\lambda + \gamma_e)} \geq \frac{1.05}{N} \tag{6.7}$$

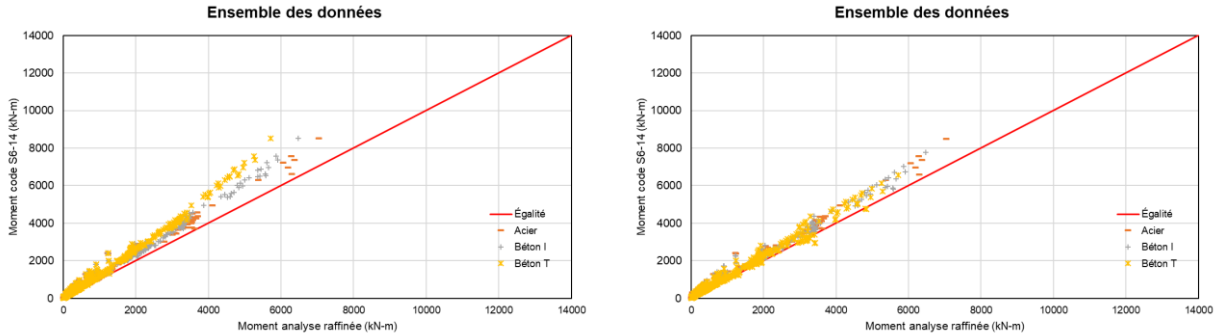
où

$$\gamma_J = 1 + 0.10\left(J/J_o\right) \tag{6.8}$$

avec J_o représente l'inertie en torsion de la dalle $S\, h_d^3/3$, où J_o ne change pas avec la portée;

J représente l'inertie totale en torsion de la poutre (dalle et poutre).

Les effets de ces changements peuvent être observés à la Figure 6.4 et les effets en termes statistiques au Tableau 6-4. De plus, les effets de ces changements peuvent être observés à la Figure 6.5 et les effets en termes statistiques au Tableau 6-5 pour les valeurs maximales.

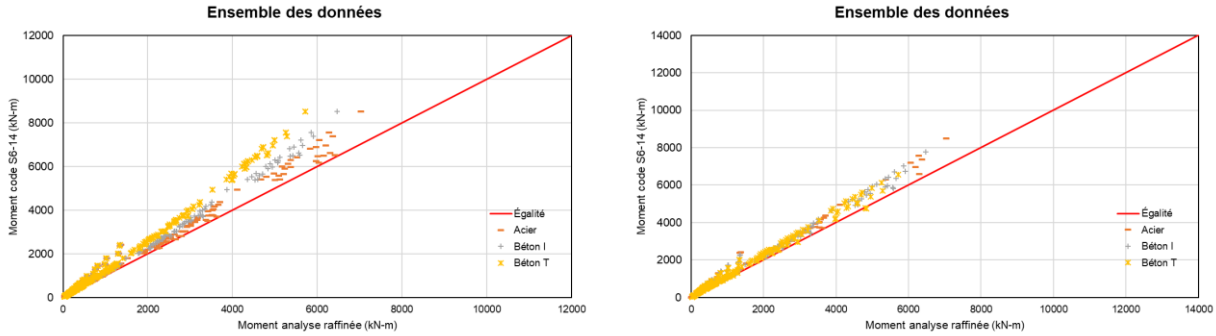


a) Code S6-14 sans les facteurs de correction b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.4 Effet de l'introduction de γ_J à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple

Tableau 6-4 Effets de l'introduction de γ_J sur les statistiques à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple

Avant corrections				
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}
Poutres en acier	**Extérieure**	0.742	0.227	0.305
	Intérieure	0.791	0.101	0.128
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.773	0.180	0.233
	Intérieure	0.787	0.084	0.107
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.710	0.192	0.270
	Intérieure	0.778	0.099	0.128
Après corrections				
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}
Poutres en acier	**Extérieure**	0.742	0.227	0.305
	Intérieure	0.792	0.101	0.128
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.783	0.183	0.233
	Intérieure	0.796	0.085	0.107
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.736	0.198	0.269
	Intérieure	0.800	0.098	0.122



a) Code S6-14 sans les facteurs de correction b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.5 Effet de l'introduction de γ_J sur les valeurs maximales à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple

Tableau 6-5 Effets de l'introduction de γ_J sur les statistiques des valeurs maximales à la flexion à l'ÉLF/ÉLS-2- Portée simple

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.823	0.099	0.121	1.788
Poutres en béton I	**Max**	0.810	0.100	0.124	1.900
Poutres en béton T	**Max**	0.777	0.091	0.118	2.451
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{MF}	σ_{MF}	V_{MF}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.824	0.099	0.120	1.778
Poutres en béton I	**Max**	0.836	0.104	0.125	1.577
Poutres en béton T	**Max**	0.827	0.096	0.116	1.802

Il est possible de voir que l'introduction du paramètre γ_J proposé améliore également la méthode simplifiée à l'ÉLF/ÉLS-2. Ici aussi, le paramètre lié à la rigidité en torsion permet d'obtenir une meilleure consistance entre les types de poutres. Les points sont plus regroupés avec ce changement. L'amélioration s'observe également sur les statistiques. En effet, les biais et les écarts-types tendent plus vers les mêmes valeurs pour les trois types de poutres. La cohérence de la méthode par rapport aux types de poutre est donc améliorée avec les changements.

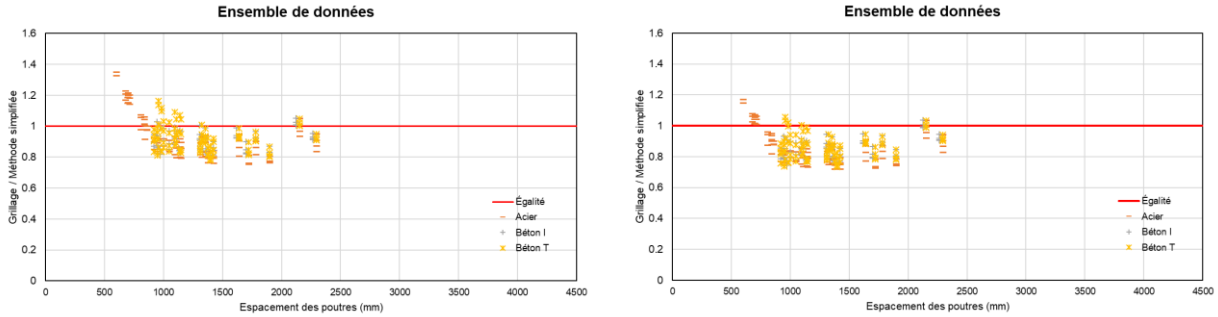
6.2.3 Propositions d'amélioration pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1

À l'effort tranchant, le chapitre 4 a révélé que la méthode simplifiée était trop conservatrice pour les ponts avec de faibles espacements *S* de poutres. En effet, les ratios sont très faibles pour les petits espacements de poutres. Par contre, cette tendance s'estompe avec l'augmentation de *S*. Ces points représentaient les poutres extérieures avec un porte-à-faux court. Par contre, au cisaillement, la conception est plus souvent réalisée en prenant les efforts maximaux. Les efforts trop

conservateurs ne sont donc pas un grand problème. Par contre, pour des espacements entre 2 et 3 m, il y a plusieurs cas non-sécuritaires, tel qu'illustré sur la Figure 4.11. Cette tendance n'est pas souhaitable pour la méthode simplifiée du Code. Une des raisons derrière cette tendance est le fait que le paramètre γ_c n'est pas assez pénalisant pour les poutres de 3 m. Pour y remédier, une modification à ce paramètre est proposée. La nouvelle équation pour calculer ce paramètre devient :

$$\gamma_c = \left(\frac{S}{2.5}\right)^{0.1} \leq 1.0 \tag{6.9}$$

L'effet de ces changements est présenté graphiquement à la Figure 6.6 pour les ponts à une voie et à la Figure 6.7 pour les ponts à deux voies et plus. Ensuite, la caractérisation des changements au niveau statistique est présentée au Tableau 6-6 pour les ponts à une voie et au Tableau 6-7 pour les ponts à deux voies et plus.



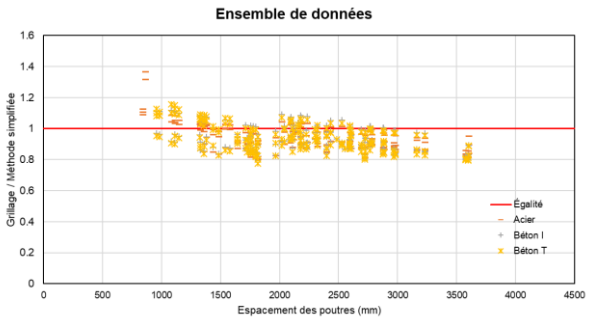
a) Code S6-14 sans les facteurs de correction

b) Avec les facteurs de correction

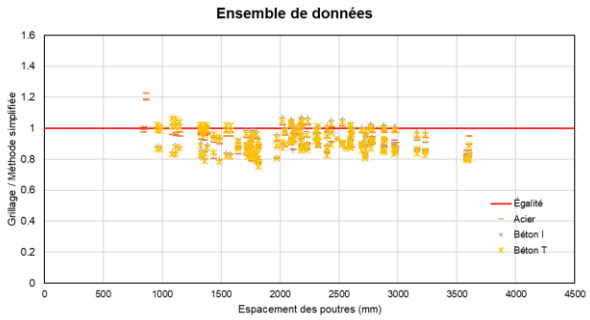
Figure 6.6 Effet de la modification de γ_c sur les valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 1 voie

Tableau 6-6 Effets de la modification de γ_c sur les statistiques des valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 1 voie

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.873	0.103	0.118	1.238
Poutres en béton I	**Max**	0.901	0.062	0.069	1.590
Poutres en béton T	**Max**	0.916	0.064	0.069	1.315
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.820	0.088	0.107	2.055
Poutres en béton I	**Max**	0.847	0.066	0.077	2.327
Poutres en béton T	**Max**	0.859	0.068	0.079	2.090



a) Code S6-14 sans les facteurs de correction



b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.7 Effet de la modification de γ_c sur les valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 2 voies et plus

Tableau 6-7 Effets de la modification de γ_c sur les statistiques des valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 - Portée simple – 2 voies et plus

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	$\boldsymbol{\delta_{VU}}$	$\boldsymbol{\sigma_{VU}}$	$\boldsymbol{V_{VU}}$	$\boldsymbol{k_A}$
Poutres en acier	**Max**	0.929	0.072	0.077	0.989
Poutres en béton I	**Max**	0.936	0.078	0.083	0.829
Poutres en béton T	**Max**	0.938	0.074	0.079	0.829
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	$\boldsymbol{\delta_{VU}}$	$\boldsymbol{\sigma_{VU}}$	$\boldsymbol{V_{VU}}$	$\boldsymbol{k_A}$
Poutres en acier	**Max**	0.913	0.064	0.070	1.366
Poutres en béton I	**Max**	0.919	0.072	0.079	1.120
Poutres en béton T	**Max**	0.917	0.070	0.076	1.187

Tout d'abord, sur la Figure 6.6 et sur la Figure 6.7, il est possible de voir que ce changement permet d'éliminer les cas dépassement de la méthode simplifiée. En effet, plusieurs ponts sous la ligne d'égalité descendent par-dessous la courbe. De plus, cette proposition améliore les statistiques liés au ratio grillage sur méthode simplifiée. Les biais sont plus faibles et les écarts-types diminuent légèrement. Cette proposition d'amélioration permet donc de rendre la méthode simplifiée plus sécuritaire à l'effort tranchant sans entraîner de dégradation dans sa précision.

Pour les ponts à une voie, il est possible d'observer qu'il y a des valeurs de ratio sont généralement faibles après correction ce qui entraîne que la correction est trop conservatrice. Cela s'observe sur la position des points et sur la moyenne de biais. La raison pour laquelle une correction plus conservatrice est que, pour les ponts à une voie, il est possible que la position transversale la plus critique pour le chargement ait été négligé. En effet, seulement trois positions par voie ont été considéré : extrême gauche, centre et extrême droite. Les biais les plus faibles représentent des ponts avec une voie large alors il est probable que pour ces ponts la position critique n'ait pas été

considérée. Pour les ponts à deux voies et plus, cet effet est atténué, car le fait d'avoir plus d'un camion sur le pont réduit la probabilité que la position critique ne soit considérée.

Pour les ponts à deux voies et plus, les valeurs de biais plus faibles représentent des ponts à poutres espacées et avec des voies larges. Cette configuration entraîne une chance que le cas critique ne soit pas considéré. En effet, avec cette géométrie, les trois positions par voies considérées ne sont pas suffisantes pour avoir le chargement critique. Par contre, en considérant un chargement spécial avec deux camions côte-à-côte, les ratios pour ces ponts seraient plus élevés.

6.2.4 Propositions d'amélioration pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2

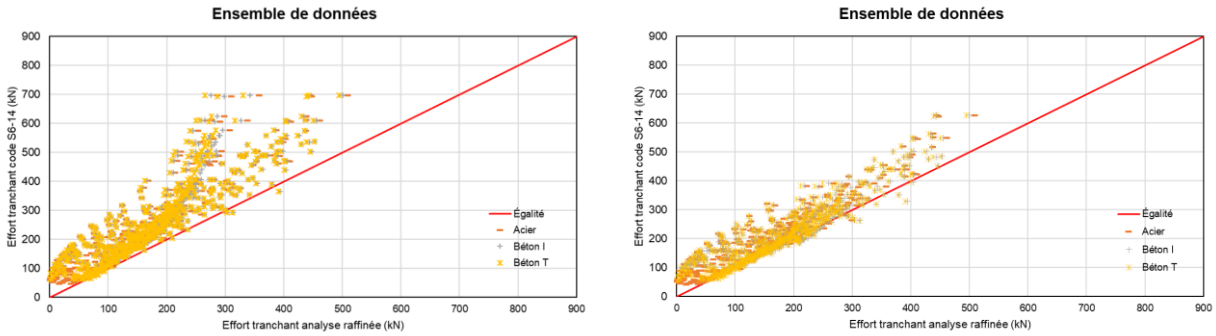
À l'effort tranchant à l'ÉLF, le chapitre 4 a révélé que la méthode simplifiée était trop conservatrice pour les poutres extérieures et intérieures de tous ponts. En effet, les ratios grillage/méthode simplifiée sont très faibles pour ces ponts. De plus, les poutres intérieures présentaient une tendance non-linéaire entre les deux méthodes. Un des éléments expliquant cet effet est la corrélation entre la portée et l'effort tranchant à l'ÉLF. En effet, la méthode simplifiée suppose que l'effort tranchant ne varie pas avec la portée, car aucun des paramètres ne prend en considération cet effet. Pour cette raison, une nouvelle équation est proposée pour le paramètre D_T pour corriger cet effet. La nouvelle équation pour calculer D_T pour les poutres intérieures devient :

$$D_T = 3.6 + 0.05L_e \tag{6.10}$$

Les poutres extérieures suivent une tendance linéaire entre les deux méthodes. Cependant, la méthode simplifiée est trop conservatrice avec des biais très faibles pour les trois types de ponts. Pour cette raison, une augmentation du facteur D_T est proposée afin de diminuer l'effort tranchant de la méthode simplifiée.

$$D_T = 4.0 \tag{6.11}$$

L'effet de ces changements est présenté graphiquement à la Figure 6.8. Ensuite, la caractérisation des changements au niveau statistique est présentée au Tableau 6-8 pour son effet sur l'échantillon global et ensuite à la Figure 6.9 et au Tableau 6-9 pour son effet sur les valeurs maximales.

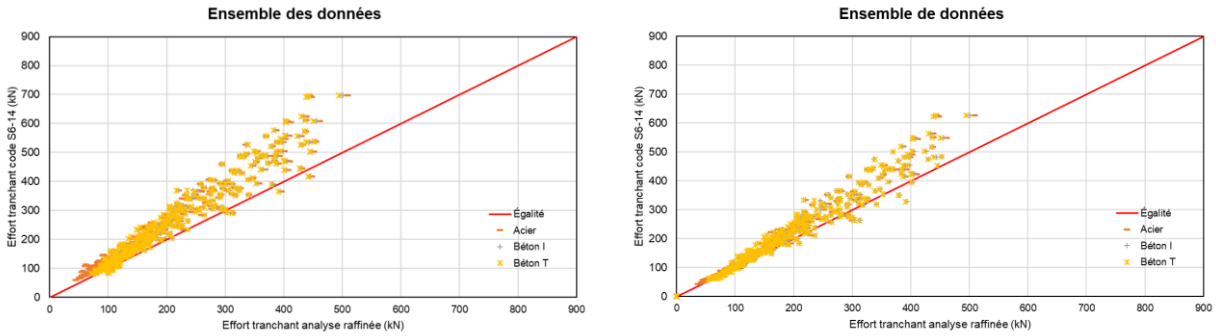


a) Code S6-14 sans les facteurs de correction b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.8 Effet des modifications à D_T à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple

Tableau 6-8 Effets des modifications à D_T sur les statistiques à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.557	0.242	0.435	1.831
	Intérieure	0.743	0.115	0.154	2.235
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.439	0.248	0.565	2.262
	Intérieure	0.657	0.191	0.290	1.796
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.614	0.253	0.413	1.526
	Intérieure	0.722	0.145	0.202	1.917
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Extérieure**	0.623	0.267	0.429	1.412
	Intérieure	0.891	0.095	0.107	1.147
Poutres en béton I	**Extérieure**	0.498	0.275	0.553	1.825
	Intérieure	0.866	0.222	0.256	0.604
Poutres en béton T	**Extérieure**	0.656	0.268	0.409	1.284
	Intérieure	0.842	0.168	0.200	0.940



a) Code S6-14 sans les facteurs de correction b) Avec les facteurs de correction

Figure 6.9 Effet des modifications à D_T sur les valeurs maximales à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple

Tableau 6-9 Effets des modifications à D_T sur les paramètres statistiques à l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2 - Portée simple

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.795	0.068	0.085	3.015
Poutres en béton I	**Max**	0.790	0.083	0.105	2.530
Poutres en béton T	**Max**	0.810	0.098	0.121	1.939
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.883	0.070	0.080	1.671
Poutres en béton I	**Max**	0.899	0.097	0.108	1.041
Poutres en béton T	**Max**	0.901	0.102	0.113	0.971

Tout d'abord, sur la Figure 6.6, il est possible de voir que ce changement permet d'éliminer les cas dépassement de la méthode simplifiée. En effet, le groupe de ponts sous la ligne d'égalité remontent par-dessus la courbe. De plus, cette proposition ne dégrade que légèrement les statistiques liés au

ratio des valeurs grillage sur méthode simplifiée. Les biais sont plus faibles et les écarts-types diminuent légèrement dans l'échantillon complet.

6.3 Ponts continus

6.3.1 Effort tranchant

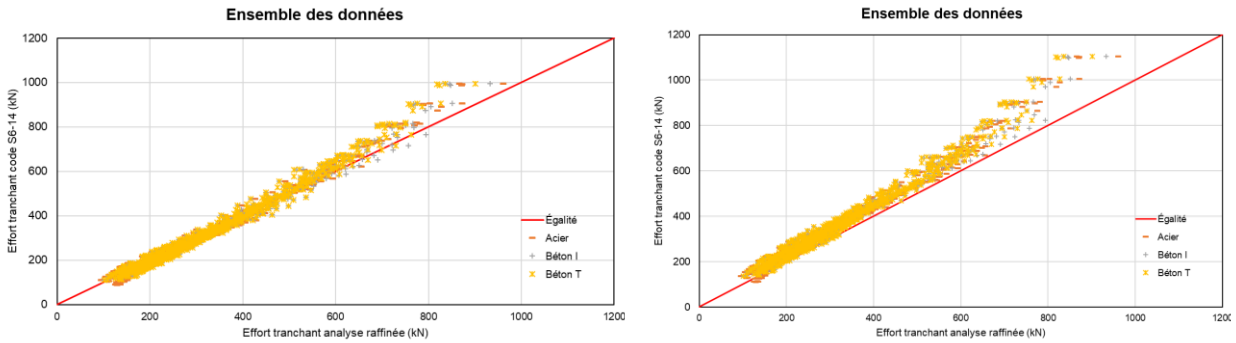
Pour tenir compte de l'augmentation de l'effort tranchant, la valeur obtenue de la méthode simplifiée lorsque de chaque côté d'un appui de deux travées adjacentes à l'ÉLU/ÉLS-1. L'équation 6.1 et le paramètre γ_V s'expriment comme suit :

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c \gamma_J \gamma_S \gamma_V (1+\mu\lambda)} \geq 1.05 \frac{nR_L}{N} \tag{6.12}$$

avec

$$\gamma_v = 0.9 \tag{6.13}$$

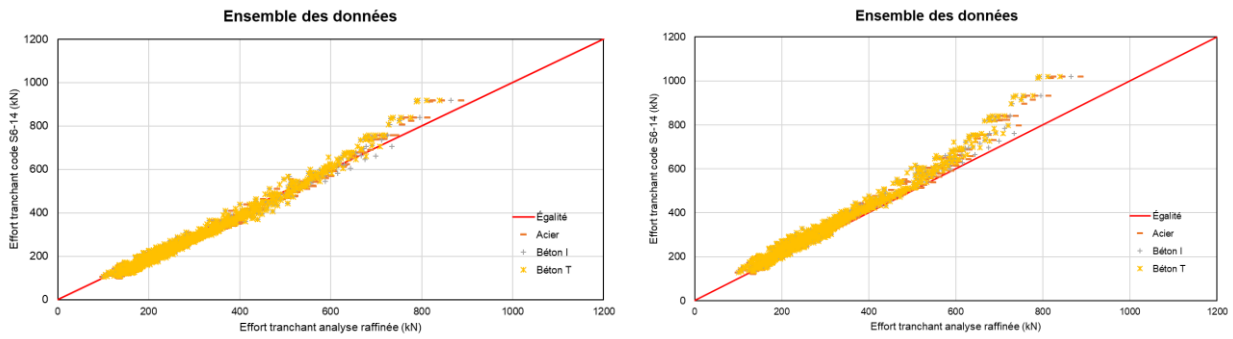
La Figure 6.10 et la Figure 6.11 montrent l'effet de cette modification combinée au nouveau paramètre γ_c :



a) Sans corrections

b) Avec corrections

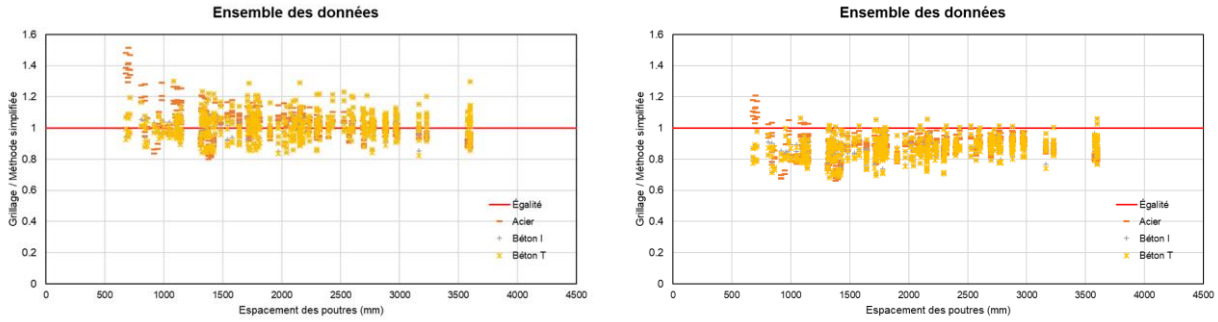
Figure 6.10 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à deux travées



a) Sans corrections b) Avec corrections

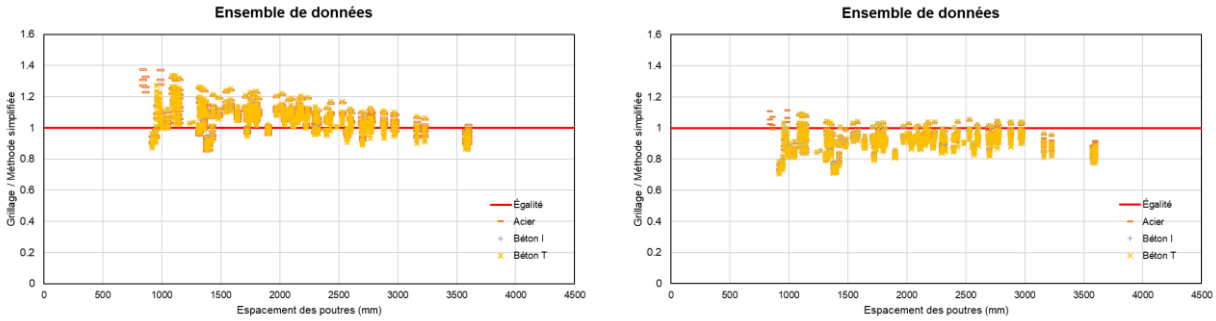
Figure 6.11 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à trois travées

La Figure 6.12 et la Figure 6.13 montrent l'effet de cette modification sur la répartition du biais :



a) Sans corrections b) Avec corrections

Figure 6.12 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à deux travées – Répartition du biais par rapport à l'espacement des poutres



a) Sans corrections

b) Avec corrections

Figure 6.13 Effet de la considération du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à trois travées – Répartition du biais par rapport à l'espacement des poutres

6.3.2 Statistiques globales des valeurs maximales

L'ensemble des modifications apportées aux ponts continus améliore des paramètres statistiques. Les valeurs obtenues sont présentées du Tableau 6-10 au Tableau 6-17.

Tableau 6-10 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 1 - Portée continue à deux travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.902	0.075	0.083	1.301
Poutres en béton I	**Max**	0.889	0.070	0.079	1.579
Poutres en béton T	**Max**	0.847	0.066	0.078	2.324
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.900	0.076	0.085	1.309
Poutres en béton I	**Max**	0.888	0.071	0.079	1.587
Poutres en béton T	**Max**	0.846	0.066	0.078	2.344

Tableau 6-11 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 2 - Portée continue à deux travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.876	0.059	0.067	2.118
Poutres en béton I	**Max**	0.864	0.044	0.051	3.070
Poutres en béton T	**Max**	0.823	0.037	0.045	4.740
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.873	0.061	0.070	2.071
Poutres en béton I	**Max**	0.863	0.045	0.053	3.012
Poutres en béton T	**Max**	0.822	0.038	0.046	4.677

Tableau 6-12 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion négative - Portée continue à deux travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.941	0.051	0.054	1.168
Poutres en béton I	**Max**	0.956	0.041	0.043	1.083
Poutres en béton T	**Max**	0.926	0.040	0.043	1.842
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.938	0.051	0.054	1.222
Poutres en béton I	**Max**	0.955	0.040	0.042	1.118
Poutres en béton T	**Max**	0.925	0.040	0.043	1.903

Tableau 6-13 Effet du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à deux travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	1.024	0.093	0.091	-0.258
Poutres en béton I	**Max**	1.016	0.078	0.077	-0.205
Poutres en béton T	**Max**	1.010	0.081	0.080	-0.125
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.883	0.073	0.082	1.613
Poutres en béton I	**Max**	0.876	0.065	0.074	1.917
Poutres en béton T	**Max**	0.872	0.066	0.076	1.938

Tableau 6-14 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 1 - Portée continue à trois travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.910	0.070	0.076	1.296
Poutres en béton I	**Max**	0.884	0.058	0.065	2.004
Poutres en béton T	**Max**	0.851	0.049	0.057	3.057
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.909	0.071	0.078	1.285
Poutres en béton I	**Max**	0.884	0.058	0.066	2.003
Poutres en béton T	**Max**	0.850	0.049	0.058	3.059

Tableau 6-15 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion positive travée 2 - Portée continue à trois travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.902	0.053	0.059	1.835
Poutres en béton I	**Max**	0.886	0.040	0.045	2.870
Poutres en béton T	**Max**	0.841	0.032	0.039	4.885
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.901	0.055	0.060	1.807
Poutres en béton I	**Max**	0.885	0.040	0.046	2.836
Poutres en béton T	**Max**	0.841	0.033	0.039	4.897

Tableau 6-16 Effet de l'introduction de γ_J et de γ_S - Flexion négative - Portée continue à trois travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.988	0.058	0.059	0.199
Poutres en béton I	**Max**	0.959	0.045	0.046	0.924
Poutres en béton T	**Max**	0.935	0.041	0.043	1.607
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.987	0.057	0.058	0.225
Poutres en béton I	**Max**	0.958	0.044	0.046	0.958
Poutres en béton T	**Max**	0.934	0.040	0.043	1.660

Tableau 6-17 Effet du paramètre γ_V - Effort tranchant - Portée continue à trois travées

Avant corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	1.07	0.083	0.078	-0.843
Poutres en béton I	**Max**	1.05	0.081	0.077	-0.617
Poutres en béton T	**Max**	1.05	0.083	0.080	-0.602
Après corrections					
Type des poutres	**Position des poutres**	δ_{VU}	σ_{VU}	V_{VU}	k_A
Poutres en acier	**Max**	0.922	0.068	0.074	1.148
Poutres en béton I	**Max**	0.908	0.066	0.073	1.395
Poutres en béton T	**Max**	0.904	0.068	0.075	1.407

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Sommaire

Ce mémoire a présenté une comparaison de la précision et de la justesse de la méthode simplifiée par rapport à la méthode du grillage pour les ponts de type dalle sur poutres. Les points positifs et les points à améliorer de la méthode simplifiée du Code S6 ont été identifiés. Autant pour les portées simples que les portées continues, l'étude a montré qu'il y a des améliorations possibles à la précision de la méthode.

La première étape de l'étude a été de sélectionner un échantillon de ponts de type dalle sur poutres et ensuite de valider celui-ci. Trois types de ponts de type dalle sur poutres ont été choisis : dalle sur poutres en acier, dalle sur poutres en béton précontraint et dalle sur poutres en béton T monolithique. Pour ces ponts, un nombre de voies d'une à quatre voies, des portées entre 10 à 60 mètres et des largeurs de porte-à-faux correspondant à 0.5 et à 0.6 fois l'espacement des poutres ont été considérés. Le nombre de poutres des ponts analysés varie trois et huit poutres. Puisque l'éventail de ponts qu'il est possible de considérer avec ces paramètres, des critères limites ont été imposés afin d'éliminer des configurations de ponts irréalistes. Ces critères incluent notamment des valeurs minimales et maximales d'espacement de poutres. Des totaux de 866 ponts à portées simples, de 2175 ponts à deux travées et de 2175 ponts à trois travées ont été choisis dans le cadre de cette étude paramétrique. Des validations ont ensuite été effectuées sur l'échantillon sélectionné. La validité des rigidités flexionnelle et torsionnelle des modèles a été vérifiée en comparant les rigidités obtenues avec celles de ponts réels. Cette validation a été effectuée pour les trois types de poutres utilisées dans le cadre de l'étude paramétrique. Une autre validation a également été faite sur la validité géométrique des tabliers. Les positions du centre de gravité des tabliers modélisés ont été analysées afin de voir s'ils respectaient ce que prédit la théorie. Ces deux validations ont montré que les ponts choisis sont valides et respectaient la réalité. Finalement, une validation de la méthode d'analyse du grillage a été réalisée. Une étude comparative entre l'analyse par grillage et l'analyse par éléments finis a été effectuée sur deux ponts réels. Cette étude montre que la méthode du grillage tel que proposée dans cette étude donne des résultats semblables à celle des éléments finis pour les cas étudiés.

La présente étude a montré que la méthode simplifiée du Code S6 évalue bien le moment de flexion à l'ÉLU pour les portées simples. Par contre, pour l'ensemble des résultats à la flexion, c'est-à-dire autant pour les portées simples que les portées continues, la méthode simplifiée évalue mal l'effet de la rigidité en torsion des poutres sur la distribution transversale des charges vives. Pour tous les cas, il a des différences entre les différents types de poutres considérés. Pour cette raison, un facteur de correction est proposé afin de considérer ce paramètre. Pour les portées continues, le moment de flexion négatif est problématique autant à l'ÉLU qu'à l'ÉLF, car il présente plusieurs cas non conservateurs. La dispersion des points est relativement faible, mais les biais sont élevés. L'effet est encore plus marqué à l'ÉLU.

Pour l'effort tranchant à l'ÉLU, une amélioration peut être apportée à la méthode du grillage. En effet, pour évaluer l'effort tranchant, un cas de charge avec deux camions côte-à-côte doit être considéré. En effet, avec les configurations de voie actuelles, il est possible qu'une poutre ne soit pas directement chargée. Cela a pour effet de minimiser l'effort obtenu. Par contre, la méthode simplifiée du Code évalue bien l'effort tranchant si on ne considère que la valeur maximale tel que cela est fait en conception. Pour les poutres extérieures, la méthode simplifiée peut comporter des résultats trop conservateurs si le porte-à-faux est trop court. La poutre extérieure ne voit alors que peu d'effort. Ces deux constats peuvent être établis autant pour les portées simples que pour les portées continues à deux travées. Pour les portées continues à trois travées, l'effet du débalancement des travées cause une sous-estimation de l'effort tranchant dans les cas où le rapport L_2/L_1 est élevé. Pour l'effort tranchant à l'ÉLF, il y a un effet de la portée sur les résultats pour les portées simples et les portées continues. Une correction est proposée un intégrant la portée L_e dans le paramètre D_t.

7.2 Recommandations

La présente étude a couvert les ponts de type dalle sur poutres pour des portées simples et des portées continues. Par contre, il reste encore plusieurs éléments à améliorer pour le chapitre 5 du Code S6 afin d'améliorer la précision de la méthode et de généraliser son utilisation.

I. Cette étude est limitée aux ponts de type dalle sur poutres. Cependant, il serait intéressant de voir l'effet des portées continues sur les ponts de type dalle pleine ou dalle évidée afin

de voir si les effets sont similaires et s'il est préférable d'améliorer les équations pour ce type de ponts;

II. Certains types de ponts similaires tels que les platelages de bois sur poutres ou les dalles sur poutres en acier non-composite n'ont pas été couvert par la présente étude. Il serait intéressant d'analyser ces types de ponts particulièrement pour l'évaluation de ponts;

III. Un aspect à étudier est l'influence du biais sur les portées continues. En effet, les portées continues causent déjà des concentrations importantes d'effort tranchant et de moment de flexion négatif aux appuis. Le biais pourrait amplifier ces effets alors une analyse combinée de ces deux paramètres serait pertinente;

IV. Les ponts courbes sont présentement un élément que le Code S6 ne couvre pas. Ces ponts pourraient faire l'objet d'étude plus approfondies, car ces ponts présentent également un effort dû à la force centrifuge qu'il faut distribuer sur les éléments porteurs avec un facteur d'essieu;

V. Une étude paramétrique qui considère la variabilité des rigidités flexionnelles. Il y a une grande dispersion entre les rigidités flexionnelles pour les tabliers de ponts et considérer ce paramètre pourrait avoir un impact sur la répartition des efforts obtenus;

VI. L'effort tranchant est présentement sous-estimé dans le cas de poutres intérieures avec la définition actuelle de voies de circulation pour les analyses de grillage. L'étude de l'effet de considérer deux camions collés à 1,2 m serait pertinent afin d'assurer la validité de cette nouvelle configuration;

VII. Les portiques en béton ainsi que les ponts intégraux restent des ponts où la notion de portée équivalente L_e doit encore être validé ;

VIII. Une étude basée sur une approche basée sur les statistiques des ponts présents sur le réseau routier du Québec pour la sélection des ponts pourrait être intéressante. Les statistiques de biais ainsi que d'écart-type et coefficients de variation seraient alors plus représentatives.

BIBLIOGRAPHIE

AASHTO. (2012). Standard specifications for Highway Bridges. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABAQUS. (2018). ABAQUS Users Manual, Volume 1 à 6: ABAQUS Inc.

ANSYS. (2018). ANSYS Structural Analysis Guide, ANSYS Release 19.1. Canonsburg, Pennsylvania, USA.

AT. (2016). Bridge Load Evaluation Manual. Alberta: Technical Standards Branch Alberta Transportation.

Aziz, T. S., Cheung, M. S., & Bakht, B. (1978). Development of a Simplified Method of Lateral Load Distribution for Bridge Superstructures. Transportation Research Record (665).

Bakht, B., Cheung, M. S., & Aziz, T. S. (1978). Application of a simplified method of calculating longitudinal moments to the Ontario highway bridge design code. Canadian Journal of Civil Engineering (6), 36-50.

Bakht, B., & Jaeger, L. G. (1982). The grillage analogy in bridge analysis. Canadian Journal of Civil Engineering (9), 224-235.

Bakht, B., & Jaeger, L. G. (1985). Bridge analysis simplified: R. R. Donnelley & Sons Company.

Bakht, B., & Jaeger, L. G. (1991). Simplified methods of bridge analysis for the third edition of OHBDC. Canadian Journal of Civil Engineering (19), 551-559.

Bakht, B., & Moses, F. (1988). Lateral distribution factors for highway bridges. ASCE Journal of Structural Engineering, 114(8), 1785-1801.

Bakht, B., & Mufti, A. (2015). Analysis by Manual Calculations. In Bridges (pp. 35-71).

Battaglia, G., Malerba, P. G., & Sgambi, L. (2003). Bridge deck analysis through the use of grillage models. Paper presented at the 2nd Int. Structural Engineering and Construction Conference, Rome, Italy.

CALTRANS. (2004). Bridge Design Specifications. Sacramento, California: California Department of Transportation.

CSA. (2006). CAN/CSA-S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code. Toronto, Canada: Canadian Standards Association.

CSA. (2014). CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code. Toronto, Canada: Canadian Standards Association.

CSA. (2019). CAN/CSA-S6-14 Canadian Highway Bridge Design Code. Toronto, Canada: Canadian Standards Association. (Sous presse)

CSI. (2009). CSI Analysis Reference Manual for SAP2000®, Etabs® and SAFE®. Berkeley, California, USA: Computers and Structures inc.

CSI. (2018). SAP2000® Basic Analysis Reference Manual. Berkeley, California, USA: Computers and Structures inc.

Cusens, A. R., & Pama, R. P. (1975). Bridge deck analysis: John Wiley & Sons.

Deng, L., Cai, C. S., & Barbato, M. (2011). Reliability-Based Dynamic Load Allowance for Capacity Rating of Prestressed Concrete Girder Bridges. Journal of Bridge Engineering, 16(6), 872-880. doi:10.1061/(asce)be.1943-5592.0000178

Dorton, R. A. (1984). The Ontario bridge code - Development and implementation. Canadian Journal of Civil Engineering (11), 824-832.

Hambly, E. C. (1991). Bridge deck behaviour.: E & FN Spon. .

Han, W., Yuan, Y., Chen, X., Xie, Q., Gao, G., & Zhang, J. (2018). Safety Assessment of Continuous Beam Bridges under Overloaded Customized Transport Vehicle Load. Journal of Bridge Engineering, 23(6). doi:10.1061/(asce)be.1943-5592.0001222

Holden, K., Pantelides, C., & Reaveley, L. (2016). Maximum Dynamic-Load Allowance of Bridge with GFRP-Reinforced Concrete Deck. Journal of Performance of Constructed Facilities, 30(3). doi:10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000808

Jaeger, L. G., & Bakht, B. (1989). Bridge analysis by microcomputer: McGraw Hill Book Company.

Jajjawi, M. (2014). Simplified method of analysis for adjacent precast "deck free" concrete box beams used in accelerated bridge construction. (Ryerson University, Toronto).

Jamali, S., Chan, T. H. T., Nguyen, A., & Thambiratnam, D. P. (2018). Modelling techniques for structural evaluation for bridge assessment. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 8(2), 271-283. doi:10.1007/s13349-018-0269-4

Keogh, D. L., & O'Brien, E. J. (1996). Recommendations on the Use of a 3-D Grillage Model for

Bridge Deck Analysis. Structural Engineering Review, 8(4), 357-366.

Kulicki, J. M., Prucz, Z., Clancy, C. M., Mertz, D. R., & Nowak, A. S. (2007). Updating the calibration report for AASHTO LRFD Code. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Kwon, O.-S., Kim, E., Orton, S., Salim, H., & Hazlett, T. (2011). Calibration of the Live Load Factor in LRFD Design Guidelines. Missouri Transportation Institute and Missouri Department of Transportation

Lutomirska, M. (2009). Live Load Models for Long Span Bridges. (University of Nebraska, Nebraska).

Massicotte, B. (2018). Conception des ponts – Notions avancées. [Notes de cours], CIV6512, École Polytechnique de Montréal.

Massicotte, B. (2019). Conception des ponts – Concepts de base : Éditions da Vinci, (sous presse).

Massicotte, B., Kombila, J.-C., & Moffatt, K. (2005). Étude comparative des méthodes d'analyse des ponts V1.0. Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.

Massicotte, B., Théoret, P., Meersman, V., Forget, M., Conciatori, D., Lefour, A., & Bascopé, D. (2016). Nouvelle méthode d'analyse simplifiée pour le Code canadien sur le Calcul des Ponts Routiers - CSA S6-14. Groupe de recherche en génies des structures. (École Polytechnique de Montréal, Montréal)

Moore, M., Strand, K. A., Grubb, M. A., & Cayes, L. R. (1990). Wheel-Load Distribution Results from AISI-FHWA Model Bridge Study. Transportation Research Record (1275), 34-44.

MTO. (2016). Structural Manual. Toronto, Ontario: Ministry of Transportation Provincial Highways Management Division Highway Standards Branch Bridge Office.

MTQ. (2016). Manuel conception des structures. Québec, Canada: Ministère des Transports du Québec.

O'Brien, E. J., & Keogh, D. L. (1998). Upstand finite element analysis of slab bridges. Computers & Structures, 69(6), 671-683. doi:10.1016/s0045-7949(98)00148-5

Obrien, E. J., Keogh, D., & O'Conor, A. (2014). Bridge deck analysis: CRC Press.

Sadeghi, J., & Fathali, M. (2012). Grillage analogy applications in analysis of bridge decks. Australian Journal of Civil Engineering, 10(1). doi:10.7158/c10-670.2012.10.1

Théoret, P. (2010). Développement d'une méthode d'analyse simplifiée pour la conception des ponts de type dalle en béton. (École Polytechnique de Montréal, Montréal).

Théoret, P. et Massicotte, B. (2012). Étude des ponts de type dalle sur poutres. Groupe de recherche en génies des structures. (École Polytechnique de Montréal, Montréal)

Zokaie, T. (2000). AASHTO-LRFD Live Load Distribution Specifications. Journal of Bridge Engineering, 5(2), 131-138.

Zokaie, T., Imbsen, R. A., & Osterkamp, T. A. (1991). Distribution of wheel loads on highway bridges. Transportation Research Record (1290), 119-126.

ANNEXE A – VALIDATION DES MODÈLES DE GRILLAGE

Cette annexe présente deux ponts qui ont servi de validation pour évaluer la qualité de la méthode de grillage. Ces ponts ont été construits sur le logiciel CSIBridge à l'aide d'éléments de type *Shell* et d'éléments de type poutre. Les éléments *shell* ont servi à construire les dalles et les poutres. Les éléments poutres ont quant à eux servi à construire les contreventements et les contreventements. Les conditions d'appui sont assurées par des éléments links où des rigidités très élevées ont été utilisés pour simuler des appuis rigides. Ces ponts sont basés sur des plans de ponts réels.

Le premier pont est le pont P80. C'est un pont à 5 poutres en acier espacées à 2.59 m avec des porte-à-faux de 1.07 m. La largeur totale du tablier est 12.49 m. L'épaisseur de la dalle est 190 mm. La portée du pont est de 15.24 m.

Le type d'éléments choisi pour la dalle et pour l'âme des poutres sont des plaques de type *thin shell*. Pour la dalle, l'épaisseur de l'élément de plaque correspond à l'épaisseur de la dalle. Pour la poutre, l'épaisseur de la plaque correspond à l'épaisseur de l'âme de la poutre. Les contreventements et les semelles des poutres sont quant à eux représentés par des éléments de poutres. Les propriétés des profilés sont donc concentrées dans les membrures de poutres. Les conditions de retenue sont les trois translations fixés d'un côté et seulement la translation verticale fixée de l'autre côté. Les rotations sont libres. Un maillage de 2.5 m a été appliqué au pont, car sa géométrie est très simple et un raffinement du maillage a peu d'effet sur les résultats.

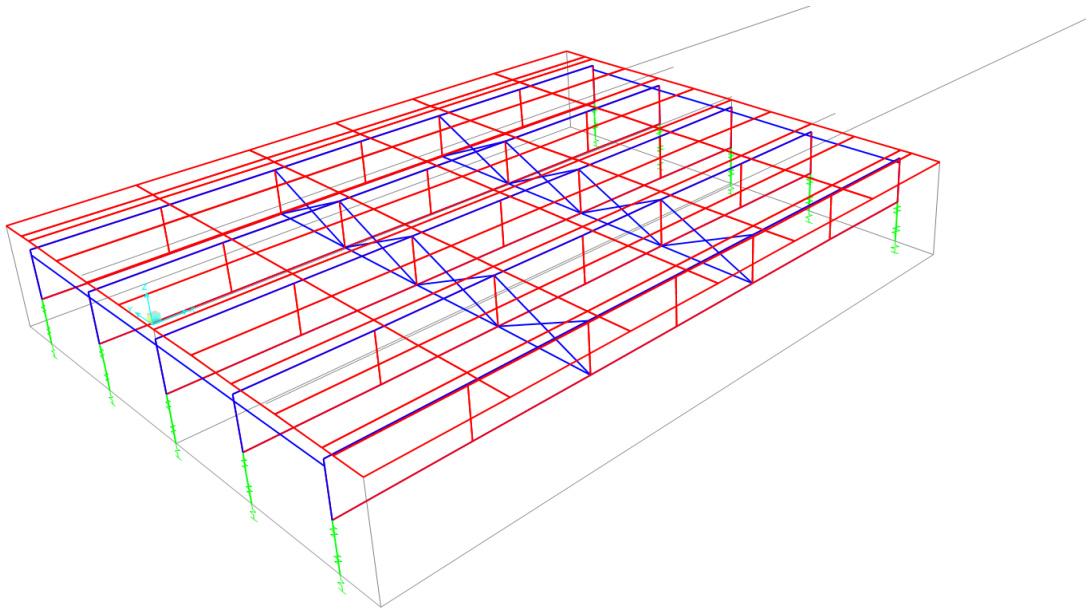


Figure A.1 Modèle éléments finis CSIBridge – Ponts à poutres en acier – P80

Les résultats obtenus pour ce pont sont présentés dans le tableau suivant avec les comparaisons du même pont en analyse de grillage :

Tableau A-1 Comparaison des efforts entre la méthode du grillage et la méthode des éléments finis – Pont à poutres en acier – P80

	Grillage	CSIBridge	Ratio Grillage/CSIBridge
Moment de flexion - Poutre extérieure	733	681	0.929
Moment de flexion - Poutre intérieure	782	736	0.941
Effort tranchant - Poutre extérieure	241	195	0.809
Effort tranchant - Poutre intérieure	271	258	0.952
Effort tranchant - Poutre intérieure 2	264	256	0.970

Il est possible de voir que la méthode de grillage utilisée est relativement juste et précise pour les ponts à poutres en acier.

Le deuxième pont est le pont P85. C’est un pont à 5 poutres en béton T espacées à 1.97 m avec des porte-à-faux de 0.623 m. La largeur totale du tablier est 11.07 m. L’épaisseur de la dalle est 190 mm. La portée du pont est de 15.24 m.

La même démarche est appliquée pour modéliser ce pont que pour le pont P80.

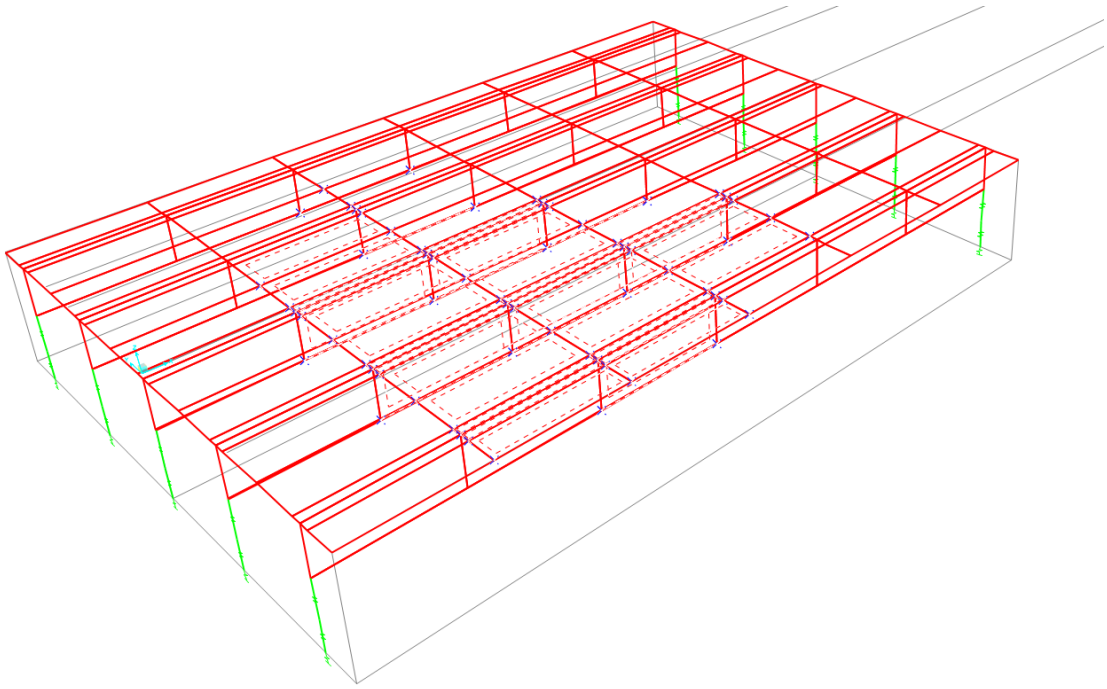


Figure A.2 Modèle éléments finis CSIBridge – Ponts à poutres en béton T – P85

Les résultats obtenus pour ce pont sont présentés dans le tableau suivant avec les comparaisons du même pont en analyse de grillage :

Tableau A-2 Comparaison des efforts entre la méthode du grillage et la méthode des éléments finis – Pont à poutres en béton T – P85

	Grillage	CSIBridge	Ratio Grillage/CSIBridge
Moment de flexion - Poutre extérieure	567	567	1.00
Moment de flexion - Poutre intérieure	773	750	0.970
Effort tranchant - Poutre extérieure	151	146	0.967
Effort tranchant - Poutre intérieure	246	244	0.992
Effort tranchant - Poutre intérieure 2	256	240	0.938

Il est possible de voir que la méthode de grillage utilisée est relativement juste et précise pour les ponts à poutres en béton T.

ANNEXE B – PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

Massicotte, B. 2019. Conception des ponts. Éditions da Vinci, Laval, Canada (sous presse).

Détermination des paramètres

Dans le cas des ponts de type dalle sur poutres portant longitudinalement, le moment longitudinal M_L et le cisaillement longitudinal V_L doivent être déterminés par poutre. La fraction de charge de camion, F_T, doit être calculée de la façon suivante :

ELU et ELS : $$F_T = \frac{S}{D_T\ \gamma_c\left(1+\mu\lambda\right)} \geq 1.05\,\frac{n\,R_L}{N} \tag{4.19}$$

ELF : $$F_T = \frac{S}{D_T\ \gamma_c\left(1+\mu\lambda+\gamma_e\right)} \geq 1.05\,\frac{1}{N} \tag{4.20}$$

Les relations permettant de déterminer les coefficients D_T , γ_c , γ_e et λ pour le moment et l'effort tranchant sont donnés du tableau B-1 au tableau B-5.

Tableau B-1 – Coefficients D_T , γ_c , γ_e et λ pour les ponts de type dalle sur poutres[1]

Condition	Effet des charges	n	D_T (m)	λ	γ_c	γ_e
ELU et ELS1	Moment intérieur	1	$4.60-3.10/\sqrt{L_e+5}$	$0.05-0.10/L_e$	1.0	Sans objet
		≥2	$4.60-5.30/\sqrt{L_e+5} \geq 2.80$	$0.10-0.25/L_e$	1.0	Sans objet
	Moment extérieur	1	$3.30+L_e/300$	$0.05-0.10/L_e$	Tableau 4.10	Sans objet
		≥2	$3.40+L_e/500$	$0.10-0.25/L_e$	Tableau 4.10	Sans objet
	Effort tranchant	1	3.50	0.0	Tableau 4.11	Sans objet
		≥2	3.40	0.0	Tableau 4.11	Sans objet
ELS2 et ELF	Moment intérieur	1	$4.60-3.1/\sqrt{L_e+5}$	0.05	Tableau 4.9	0.0
		2	$4.80-3.0/\sqrt{L_e}$	0.05	Tableau 4.9	0.0
		3	$4.95-3.5/\sqrt{L_e}$	0.05	Tableau 4.9	0.0
		≥4	$5.15-4.0/\sqrt{L_e}$	0.05	Tableau 4.9	0.0
	Moment extérieur	1	$3.25+L_e/200 \leq 3.50$	0.05	Tableau 4.9	Tableau 4.12
		2	$3.55+L_e/200 \leq 3.80$	0.05	Tableau 4.9	Tableau 4.12
		≥3	$3.65+L_e/150 \leq 4.10$	0.0	Tableau 4.9	Tableau 4.12
	Effort tranchant	1	3.50	0.0	Tableau 4.11	0.0
		≥2	3.60	0.0	Tableau 4.11	0.0

1 : Mis à jour selon le code CSA-S6-19

Tableau B-2 – Coefficient γ_c pour le moment dans les poutres intérieures des ponts de type dalle sur poutres à l'ÉLF

Condition	n	L_e (m)	S (m)	γ_c
ELS2 et ELF	1	Tous	Tous	1.0
	≥2	$L_e \leq 10$	Tous	1.0
		$10 < L_e \leq 50$	$S \leq 1.2$	1.0
			$1.2 < S \leq 3.6$	$1.0 + (0.3S - 0.36)(L_e - 10)/40$
			$3.6 < S$	$1.0 + 0.72(L_e - 10)/40$
		$50 < L_e$	$S \leq 1.2$	1.0
			$1.2 < S \leq 3.6$	$0.3S + 0.64$
			$3.6 < S$	1.72

Tableau B-3 – Coefficient γ_c pour les poutres extérieures des ponts de type dalle sur poutres à l'ÉLU et l'ÉLS1

Condition	n	S_C (m)	γ_C
ELU, ELS1, ELS2 et ELF	Tous	$S_C \leq 0.5S$	1.0
		$0.5S < S_C \leq 0.6S$	$1.25 - 0.5S_c/S \leq 1.0$

Tableau B-4 – Coefficient γ_c pour l'effort tranchant pour les poutres intérieures et extérieures des ponts de type dalle sur poutres

Condition	n	S (m)	γ_C
ELU, ELS1, ELS2 et ELF	Tous	$S < 2.0$	$(S/2)^{0.25}$
		$2.0 \leq S$	1.0

Tableau B-5 – Coefficient γ_e pour le moment pour les poutres extérieures des ponts de type dalle sur poutres à l'ÉLF – Voir Figure B.1

Condition	n	L_e (m)	γ_e
ELS2 et ELF	1	Tous	0.0
	≥ 2	$L_e \leq 20$	$0.28(D_{VE}-1.0)\left[1+0.40(D_{VE}-1.0)^2\right]$
		$20 < L_e$	$0.28(D_{VE}-1.0)\left[1+\frac{160(D_{VE}-1.0)^2}{L_e^2}\right]$

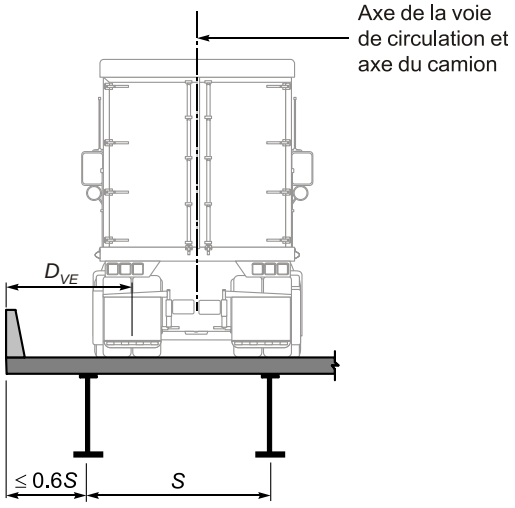


Figure B.1 – Position du camion pour le calcul de la fatigue pour la poutre de rive