



ANALYSE DE LA RÉPARTITION DES CHARGES ROUTIÈRES POUR LES TABLIERS DE TYPE PLATELAGE EN ALUMINIUM SUR POUTRES EN ACIER

Projet R809.1

Préparé par :

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

Bruno Massicotte, ing., Ph.D.
Professeur titulaire, Polytechnique Montréal

Bachir El-Hage, M.Sc.A.
Associé de recherche, Polytechnique Montréal

Fabien Lagier, Ph.D.
Associé de recherche, Polytechnique Montréal

Mario Fafard, ing., Ph.D.
Professeur invité, Université Laval

Réalisé pour le compte du ministère des Transports

Mars 2020

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le ministère des Transports du Québec pour le financement reçu dans le cadre de ce projet de recherche.

SOMMAIRE

Ce projet de recherche avait comme objectif le calcul plus juste de la répartition des efforts entre les poutres d'acier d'un tablier avec l'utilisation d'un platelage formé d'extrusions en aluminium dans le but d'améliorer les règles prescrites dans la norme CSA-S6. Le but premier était l'amélioration de la méthode simplifiée de la norme S6 qui est généralement utilisée pour la conception afin que son degré de précision soit comparable à celui obtenu pour les tabliers avec dalle de béton. Le projet de recherche avait aussi comme objectif d'établir la méthodologie devant être appliquée pour réaliser des analyses raffinées pour ce type de tablier de ponts.

Diverses dispositions constructives du platelage ont été envisagées : mixte ou non mixte, extrusions longitudinales ou transversales. Des analyses préliminaires ont d'abord démontré que le mode de construction mixte ou non mixte avait peu d'effet sur le calcul des efforts de conception, tout comme la disposition longitudinale ou transversale des extrusions, et ce, parce que la norme S6 exige que les poutres de rive et intérieures soient identiques.

Ensuite, les modèles de grillage de 398 ponts de 3 à 30 m de portée et de 1, 2 ou 3 voies ont été générés et analysés pour le cas de platelage non mixtes formés d'extrusions en aluminium orientées longitudinalement ou transversalement. L'extrusion choisie pour les analyses est celle développée dans le cadre d'un projet de recherche réalisé à l'université Laval. Cette étude a permis de constituer une base de données d'efforts dans les tabliers. Les résultats de l'analyse paramétrique ont d'abord servi à illustrer le manque de précision et à identifier les lacunes des règles présentées dans le code CSA-S6. Les résultats ont ensuite servi à élaborer une méthode simplifiée améliorée destinée à être proposée pour les futures éditions de la norme CSA-S6. Les nouvelles équations proposées donnent ainsi un niveau de précision comparable à celui obtenu pour les tabliers avec dalle en béton.

Enfin une étude de sensibilité portant sur deux paramètres constructifs a été réalisée pour les 398 ponts de l'étude paramétrique initiale. Dans un premier temps, un platelage plus épais et plus rigide a été considéré alors que dans un deuxième temps un contreventement intermédiaire à mi-portée a été inclus dans les modèles. Dans les deux cas on a observé une répartition différente des efforts entre les poutres de rive et les poutres intérieures, avec une meilleure répartition, donc des efforts de conception que la méthode améliorée proposée qui s'est avérée conservatrice.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS

Les analyses numériques réalisées dans le cadre de ce projet de recherche ont permis de développer une méthode simplifiée permettant de déterminer la répartition des charges routières entre les poutres de tablier. Cette méthode est plus précise que la méthode actuelle du code CSA-S6 et est tout à fait adaptée aux types de platelages en aluminium préconisés pour les ponts au Québec. Cette méthode améliorée pourra être intégrée à la prochaine édition du code CSA-S6 afin de remplacer la méthode actuelle qui s'est avérée trop conservatrice selon les résultats obtenus dans le cadre de ce projet. Les analyses numériques ont aussi permis d'illustrer que l'utilisation de platelages non mixtes longitudinaux, tel que préconisée par le Ministère, est tout à fait acceptable du point de vue répartition des efforts entre les poutres d'acier du tablier. Les conclusions de cette étude s'appliquent uniquement aux ponts d'une seule portée comportant un maximum de trois voies de circulation. Elles s'appliquent pour les tabliers formés d'extrusions jointes entre elles de manière continue.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte	1
1.2	Problématique des méthodes d'analyse du code CSA-S6	1
1.3	Bénéfices attendus pour le Ministère	2
1.4	Principes de développement durable	3
1.5	Objectifs	3
1.6	Étapes de réalisation	4
1.7	Propriétés des éléments structuraux du tablier	5
1.7.1	Extrusions de référence	5
1.7.2	Pont de référence	7
1.8	Organisation du rapport	8
2	MODÉLISATION DES TABLIERS	9
2.1	Approche	9
2.2	Modélisation du platelage seul	9
2.2.1	Propriétés du platelage de 135 mm	9
2.2.2	Propriétés des platelages pour les modèles de grillage	11
2.3	Élaboration des modèles de grillage	11
2.3.1	Validation des modèles	11
2.3.2	Propriétés des éléments longitudinaux	13
2.3.3	Propriétés des éléments transversaux	15
2.4	Sensibilité des propriétés du tablier – Platelage de 135 mm	16
2.4.1	Portée de l'étude	16
2.4.2	Rigidité des contreventements	17
2.4.3	Effets des propriétés du platelage et des contreventements intermédiaires	18
2.4.4	Effets de la rigidité des contreventements intermédiaires	21
2.4.5	Effets de la configuration du platelage	22
2.4.6	Sommaire	24
2.5	Modélisation du pont à platelage longitudinal de 135 mm non mixte	25
2.6	Facteurs d'essieux	26
2.7	Sommaire	28
3	ÉTUDE PARAMÉTRIQUE	29
3.1	Création des modèles	29
3.2	Géométrie des tabliers	29
3.2.1	Ponts considérés	29
3.2.2	Propriétés des poutres	31
3.2.3	Choix de l'extrusion de référence	33
3.2.4	Géométrie des ponts retenues	33

4	VALIDATION DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE DU CODE S6-19	34
4.1	Introduction	34
4.2	Étude statistique des résultats	34
4.3	Valeurs du coefficient D_T pour un platelage en aluminium	35
4.4	Moment fléchissant – ÉLUL/ÉLUT-1	36
4.4.1	Analyse des résultats	36
4.4.2	Influence des paramètres géométriques sur les résultats	37
4.4.3	Analyse des valeurs maximales	44
4.5	Effort tranchant – ÉLUL/ÉLUT-1	45
4.5.1	Analyse des résultats	45
4.5.2	Influence des paramètres géométriques sur les résultats	47
4.5.3	Analyse des valeurs maximales	54
4.6	Moment fléchissant – ÉLF/ÉLUT-2	55
4.6.1	Analyse des résultats	55
4.6.2	Influence des paramètres géométriques sur les résultats	56
4.6.3	Analyse des valeurs maximales	61
4.7	Effort tranchant – ÉLF/ÉLUT-2	64
4.7.1	Analyse des résultats	64
4.7.2	Influence des paramètres géométriques sur les résultats	66
4.7.3	Analyse des valeurs maximales	71
5	AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE	73
5.1	Approche utilisée pour l'amélioration des équations	73
5.2	Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	73
5.3	Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	77
5.4	Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2	81
5.5	Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2	85
5.6	Sommaire des résultats	88
6	SENSIBILITÉ DES PROPRIÉTÉS DES ÉLÉMENTS DU PONT	90
6.1	Effet des contreventements	90
6.1.1	Moment fléchissant – ÉLU/ÉLS1	90
6.1.2	Effort tranchant – ÉLU/ÉLS1	96
6.1.3	Moment fléchissant – ÉLF/ÉLS2	100
6.1.4	Effort tranchant – ÉLF/ÉLS2	104
6.1.5	Sommaire	108
6.2	Effet de la rigidité du platelage	108
6.2.1	Moment fléchissant – ÉLU/ÉLS1	109
6.2.2	Effort tranchant – ÉLU/ÉLS1	110
6.2.3	Moment fléchissant – ÉLF/ÉLS2	111
6.2.4	Effort tranchant – ÉLF/ÉLS2	112

	6.2.5 Sommaire	112
7	CONCLUSIONS	114
8	RÉFÉRENCES	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Tablier type visé par le projet de recherche	1
Figure 1.2	Géométrie de l'extrusion de 200 mm	6
Figure 1.3	Géométrie de l'extrusion de 135 mm	6
Figure 1.4	Section transversale du pont de référence	7
Figure 2.1	Calcul des inerties flexionnelles du platelage	10
Figure 2.2	Calcul des aires en cisaillement du platelage	10
Figure 2.3	Calcul de la rigidité torsionnelle du platelage	10
Figure 2.4	Exemples de conditions de chargement considérées	12
Figure 2.5	Géométrie du modèle de grillage pour le platelage longitudinal	13
Figure 2.6	Effet de l'inertie flexionnelle – contreventements rigides	18
Figure 2.7	Effet de l'inertie torsionnelle – contreventements rigides	19
Figure 2.8	Effet de l'inertie flexionnelle – sans contreventements intermédiaires	20
Figure 2.9	Effet de l'inertie torsionnelle – sans contreventements intermédiaires	21
Figure 2.10	Effet de l'inertie des contreventements	22
Figure 2.11	Effets de contreventements rigides pour les configurations du platelage	23
Figure 2.12	Effet de la condition sans contreventements pour les configurations du platelage	24
Figure 2.13	Cas de chargement spécifiés par le code CSA-S6-19	26
Figure 3.1	Espacement des poutres considéré	30
Figure 3.2	Nombre de poutres	31
Figure 3.3	Rigidité flexionnelle des tabliers (Massicotte et al. 2016)	32
Figure 3.4	Géométrie de l'extrusion	33

Figure 4.1	Comparaison du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	36
Figure 4.2	Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUTL-1 – variation du nombre de voies	38
Figure 4.3	Effet de la portée du pont sur le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	40
Figure 4.4	Effet de l'espacement entre les poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	41
Figure 4.5	Effet de la longueur du porte-à-faux sur le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Poutre extérieure	43
Figure 4.6	Comparaison du moment fléchissant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1	44
Figure 4.7	Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	45
Figure 4.8	Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 pour une poutre extérieure et une poutre intérieure	46
Figure 4.9	Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – variation du nombre de voies	48
Figure 4.10	Effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – variation du nombre de voies	50
Figure 4.11	Effet de la portée du pont sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1	51
Figure 4.12	Effet de l'espacement entre les poutres sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1	53
Figure 4.13	Comparaison de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1	54
Figure 4.14	Comparaison du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2	55
Figure 4.15	Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – variation du nombre de voies	57
Figure 4.16	Effet de la portée du pont sur le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2	59
Figure 4.17	Effet de l'espacement entre les poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2	60

Figure 4.18	Comparaison du moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2	62
Figure 4.19	Effet de l'espacement entre les poutres sur le moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2	63
Figure 4.20	Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-1	64
Figure 4.21	Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 pour une poutre extérieure et une poutre intérieure	65
Figure 4.22	Effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 – variation du nombre de voies	67
Figure 4.23	Effet de la portée du pont sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2	68
Figure 4.24	Effet de l'espacement entre les poutres sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2	70
Figure 4.25	Comparaison de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2	71
Figure 5.1	Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Poutre extérieure et intérieure	75
Figure 5.2	Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Ensemble des résultats et valeurs maximales	76
Figure 5.3	Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Poutre extérieure et intérieure	79
Figure 5.4	Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Ensemble des résultats et valeurs maximales	80
Figure 5.5	Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Poutre extérieure et intérieure	83
Figure 5.6	Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Ensemble des résultats et valeurs maximales	84
Figure 5.7	Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Poutre extérieure et intérieure	86
Figure 5.8	Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Ensemble des résultats et valeurs maximales	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Liste des rapports et étapes de réalisation	5
Tableau 1.2	Propriétés des extrusions de 200 mm et 135 mm	7
Tableau 1.3	Propriétés des poutres en acier	8
Tableau 2.1	Propriétés d'éléments de poutres pour un platelage de 200 mm	11
Tableau 2.2	Propriétés d'éléments de poutres pour un platelage de 135 mm	11
Tableau 2.3	Propriétés des éléments longitudinaux – Platelage longitudinal mixte	14
Tableau 2.4	Propriétés des éléments longitudinaux – Platelage longitudinal non mixte	14
Tableau 2.5	Propriétés des éléments longitudinaux – Platelage transversal mixte	14
Tableau 2.6	Propriétés des éléments longitudinaux – Platelage transversal non mixte	14
Tableau 2.7	Propriétés des éléments longitudinaux – Platelage transversal mixte	15
Tableau 2.8	Propriétés des éléments transversaux – Platelage longitudinal non mixte	16
Tableau 2.9	Propriétés des éléments transversaux – Platelage transversal mixte	16
Tableau 2.10	Propriétés des éléments transversaux – Platelage transversal non mixte	16
Tableau 2.11	Propriétés des éléments longitudinaux – Platelage longitudinal de 135 mm non mixte	25
Tableau 2.12	Propriétés des éléments transversaux – Platelage longitudinal de 135 mm non mixte	25
Tableau 2.13	Facteurs d'essieux à ÉLUT	27
Tableau 3.1	Paramètres géométriques de l'étude paramétrique	30

Tableau 4.1	Valeurs de D_T (m) pour les platelages en aluminium	35
Tableau 4.2	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	37
Tableau 4.3	Paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 - variation du nombre de voies	39
Tableau 4.4	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 1 voie	40
Tableau 4.5	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 2 voies et plus	41
Tableau 4.6	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	42
Tableau 4.7	Effet de la longueur du porte-à-faux sur les paramètres statistiques du moment fléchissant pour la poutre extérieure à l'ÉLUL/ÉLUT-1	43
Tableau 4.8	Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1	44
Tableau 4.9	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Moment fléchissant	45
Tableau 4.10	Paramètres statistique pour l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	47
Tableau 4.11	Paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 - variation du nombre de voies	49
Tableau 4.12	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 - variation du nombre de voies	51
Tableau 4.13	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 1 voie	52
Tableau 4.14	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 2 voies et plus	52
Tableau 4.15	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1	53
Tableau 4.16	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1	54

Tableau 4.17	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Effort tranchant	55
Tableau 4.18	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2	56
Tableau 4.19	Paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 - variation du nombre de voies	58
Tableau 4.20	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 1 voie	59
Tableau 4.21	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 2 voies et plus	60
Tableau 4.22	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2	61
Tableau 4.23	Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2	62
Tableau 4.24	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Moment fléchissant	63
Tableau 4.25	Paramètres statistique pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2	65
Tableau 4.26	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 - variation du nombre de voies	68
Tableau 4.27	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 1 voie	69
Tableau 4.28	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 2 voies et plus	69
Tableau 4.29	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2	70
Tableau 4.30	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1	71
Tableau 4.31	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Effort tranchant	72
Tableau 5.1	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Nouvelles valeurs de D_T	74

Tableau 5.2	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 –Poutre extérieure et intérieure	77
Tableau 5.3	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Valeurs maximales	77
Tableau 5.4	Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – variation de la portée	78
Tableau 5.5	Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 –Poutre extérieure et intérieure	81
Tableau 5.6	Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Valeurs maximales	81
Tableau 5.7	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Nouvelles valeurs de D_T	82
Tableau 5.8	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Poutre extérieure et intérieure	85
Tableau 5.9	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Valeurs maximales	85
Tableau 5.10	Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Poutre extérieure et intérieure	88
Tableau 5.11	Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Valeurs maximales	88
Tableau 5.12	Coefficients D_T , γ_c , γ_e et λ pour les ponts de type dalle sur poutres	89
Tableau 5.13	Coefficient γ_c pour le moment dans les poutres intérieures des ponts de type dalle sur poutres à l'ÉLF	89
Tableau 5.14	Coefficient γ_c pour l'effort tranchant pour les poutres intérieures et extérieures	89
Tableau 6.1	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1	91
Tableau 6.2	Paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 - variation du nombre de voies	92
Tableau 6.3	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – 1 voie	93

Tableau 6.4	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – 2 voies et plus	93
Tableau 6.5	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1	95
Tableau 6.6	Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1	96
Tableau 6.7	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Moment fléchissant	96
Tableau 6.8	Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1	97
Tableau 6.9	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1 - variation du nombre de voies	97
Tableau 6.10	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1 – 1 voie	98
Tableau 6.11	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1 – 2 voies et plus	98
Tableau 6.12	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1	99
Tableau 6.13	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1	99
Tableau 6.14	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Effort tranchant maximal	100
Tableau 6.15	Paramètres statistiques pour le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2	100
Tableau 6.16	Paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 - variation du nombre de voies	101
Tableau 6.17	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – 1 voie	102
Tableau 6.18	Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – 2 voies et plus	102
Tableau 6.19	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2	103

Tableau 6.20	Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2	103
Tableau 6.21	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2 – Moment fléchissant	104
Tableau 6.22	Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLS-2	104
Tableau 6.23	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2 - variation du nombre de voies	105
Tableau 6.24	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2 – 1 voie	105
Tableau 6.25	Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2 – 2 voies et plus	106
Tableau 6.26	Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2	107
Tableau 6.27	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2	107
Tableau 6.28	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2– Effort tranchant maximal	108
Tableau 6.29	Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1	109
Tableau 6.30	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Moment fléchissant	109
Tableau 6.31	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1	110
Tableau 6.32	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Effort tranchant maximal	110
Tableau 6.33	Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2	111
Tableau 6.34	Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2 – Moment fléchissant	111
Tableau 6.35	Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2	112

Tableau 6.36 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception
à l'ÉLF/ÉLS-2 – Effort tranchant maximal 112

GLOSSAIRE

CSA	Association canadienne de normalisation
ÉLF	État limite de fatigue
ÉLUL	État limite ultime
ÉLUT	État limite d'utilisation
MTQ	Ministère des Transports du Québec
SQDA	Stratégie québécoise de développement de l'aluminium

SYMBOLES

Liste de symboles non définis dans le code CSA-S6

A_d	Aire de chacune des membrures diagonales formant un contreventement intermédiaire
A_h	Aire de chacune des membrures horizontales formant un contreventement intermédiaire
D_x	Rigidité flexionnelle longitudinale des tabliers par unité de largeur
e_c	Distance des membrures du contreventement mesurée par rapport à un axe de référence
E	Rapport des efforts grillage / méthode simplifiée
E_G	Effort obtenu de la méthode du grillage
E_{max}	Effort maximal sollicitant une poutre
E_{MS}	Effort obtenu de la méthode simplifiée
E_{voie}	Effort maximal sollicitant une voie
F_R	Ratio des biais
F_T	Rapport des efforts sollicitant une poutre (Éq. 2.3)
h_c	Hauteur du contreventement (distance entre les membrures horizontales)
I_c	Distance des membrures du contreventement mesurée par rapport à un axe de référence
I_x	Inertie flexionnelle des poutres longitudinales
k_A	Paramètre d'ajustement des coefficients pour un percentile visé
L_d	Longueur d'une membrure diagonale formant un contreventement intermédiaire
V	Coefficient de variation égal au ratio de l'écart type sur la moyenne
V_A	Coefficient de variation du paramètre A
V_E	Coefficient de variation du ratio des efforts maximaux

δ	Biais, égal au ratio des valeurs moyennes du paramètre concerné pour l'analyse statistique
δ_A	Biais du rapport des efforts maximaux A
δ_E	Biais du rapport des efforts maximaux
σ	Écart type
σ_E	Écart type du rapport des efforts maximaux

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) est souvent confronté au choix de solutions alternatives pour la construction de tabliers des ponts pour neufs ou pour le remplacement de tabliers de ponts vieillissants. Le Ministère reste ainsi constamment à l'affût de solutions innovantes qui permettent d'améliorer l'efficacité structurale, la durabilité et les coûts sur le cycle de vie de ses interventions. À cette fin, le Ministère demeure à l'affût de méthodes et de matériaux innovants afin de lui permettre d'améliorer la conception ainsi que les techniques de construction et de réparation des ouvrages routiers. C'est dans ce contexte, et sous l'impulsion de la Stratégie québécoise de développement de l'aluminium (SQDA), que le Ministère s'est intéressé à la possibilité d'utiliser des platelages en aluminium extrudés et soudés dans les ponts routiers. Le projet porte sur les méthodes de calculs des tabliers formés de poutres en acier avec un platelage fait d'extrusions en aluminium, tel qu'illustré schématiquement sur la figure 1.1.

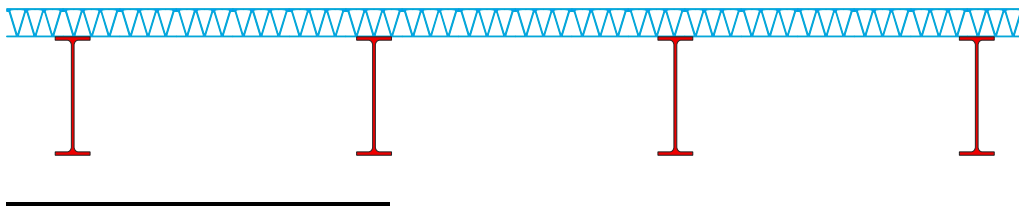


Figure 1.1 Tablier type visé par le projet de recherche

1.2 Problématique des méthodes d'analyse du code CSA-S6

Les platelages en aluminium sont des produits manufacturés qui peuvent prendre différentes formes selon la géométrie des extrusions, l'orientation de celles-ci sur les poutres, le mode d'assemblage des extrusions entre elles et le type de connexion aux poutres du tablier. Les différentes configurations affectent la répartition des charges routières entre les poutres supportant le platelage, qui sont généralement longitudinales pour les ponts courants mais qui peuvent être transversales pour les ponts à poutres triangulées, par exemple.

La méthode de calcul simplifiée permettant la détermination des efforts dans les poutres longitudinales a été introduite pour la première fois dans le chapitre 5 de la norme S6-14 (CSA, 2014). À défaut d'avoir des indications précises sur les propriétés de ce type de platelage et sur le mode de connexion aux poutres,

et compte tenu de la relative nouveauté de cette technologie, la condition la plus défavorable a été retenue dans la norme S6-14. Les mêmes coefficients ont été maintenus pour la dernière édition de cette norme (CSA, 2019). Ainsi, les facteurs de répartition de la surcharge routière entre les poutres d'un tablier sont considérés, de manière conservatrice, comme étant les mêmes pour un platelage en aluminium dans lequel les éléments sont solidaires entre eux que ceux spécifiés pour un platelage de bois faits d'éléments non reliés structuralement.

La rigidité réelle des platelages en aluminium n'a pas été considérée vu l'absence de données de sorte que l'effet bénéfique de cette rigidité sur la conception des poutres en acier n'a pas été considéré ce qui réduit l'efficacité structurale de cette solution. Ainsi le développement d'une méthode simplifiée qui prenne en considération les propriétés des platelages en aluminium pour déterminer plus précisément les facteurs de répartition des efforts causés par le trafic régulier sur les poutres d'acier est donc essentielle pour qu'une conception plus efficace de ce type de tablier par les ingénieurs concepteurs.

En parallèle, le comité en charge du chapitre 5 de la norme CSA-S6, qui porte sur les méthodes d'analyse, développe des exigences visant à guider les ingénieurs lorsque ceux-ci désirent utiliser des méthodes raffinées pour la détermination de la répartition des efforts sur les poutres du tablier. L'expertise développée au cours des dernières décennies pour l'analyse de ponts avec dalles de béton devra être étendue aux platelages d'aluminium. L'approche préconisée pour les platelages en aluminium devra prendre en considération les évolutions futures de ces platelages et fournir aux ingénieurs les indications nécessaires afin qu'ils puissent déterminer la répartition des efforts en fonction du type de platelage choisi.

1.3 Bénéfices attendus pour le Ministère

Ce projet de recherche précisera comment les platelages en aluminium répartissent la surcharge routière entre les poutres d'acier qui le supportent pour les tabliers de ponts routiers de courte et moyenne portée. Ceci permettra au MTQ de faire une conception plus efficace des poutres supportant le platelage, par rapport à ce qu'il est actuellement possible de faire selon les indications données par la norme S6-14. Le projet amènera des réponses claires quant aux différentes alternatives possibles pour l'utilisation de ces platelages afin de donner au Ministère les éléments requis pour établir les balises d'utilisation de cette nouvelle technologie. Le projet pourra également permettre la conception d'un éventuel projet pilote visant l'intégration d'un platelage en aluminium dans un tablier de pont routier sur le réseau du Ministère.

De manière générale, les résultats de ce projet de recherche contribueront à mieux définir le potentiel d'utilisation de l'aluminium comme matériau pour le platelage de ponts routiers et, en conséquence, à orienter les décisions du Ministère en ce qui concerne l'intégration des platelages en aluminium dans ses projets. Le Ministère pourra également contribuer de façon plus efficace à l'atteinte des objectifs établis dans la Stratégie québécoise de développement de l'aluminium (SQDA).

1.4 Principes de développement durable

Le présent projet de recherche rejoint les principes de la stratégie de développement durable adoptée par le Gouvernement du Québec pour les aspects suivants.

Efficacité économique : Ce projet contribue à faciliter l'utilisation innovante de l'aluminium dans les ouvrages routiers du Québec, incitant l'industrie à transformer l'aluminium primaire à l'intérieur des frontières du Québec plutôt qu'à l'extérieur, ce qui est favorable à la prospérité économique et au progrès social de différentes régions du Québec.

Protection de l'environnement : Ce projet favorise l'utilisation dans les ouvrages d'art d'un matériau doté d'une excellente résistance à la corrosion atmosphérique et qui est ainsi moins susceptible de se détériorer, au cours de la vie utile d'un ouvrage, que les matériaux traditionnels comme l'acier ou le béton normal, ce qui réduit les risques de dispersion de résidus de détérioration (lamelles de rouille, fragments de béton) dans l'environnement et réduit les besoins en opérations d'entretien susceptibles de générer des rebuts non recyclables.

Accès au savoir : Ce projet permet l'acquisition de connaissances sur le comportement d'un matériau innovant dans le domaine des ouvrages d'art.

1.5 Objectifs

L'objectif général du projet consiste à développer les exigences d'analyse des tabliers avec platelage en aluminium sur poutres d'acier afin d'améliorer les critères de conception de la norme CSA-S6 en vue de son introduction dans la prochaine édition de cette norme prévue pour 2025 et de l'introduction de ces mêmes facteurs dans le Manuel de Conception des Structures du MTQ (MTQ, 2018).

Le projet vise de plus les objectifs spécifiques suivants :

- développer une méthodologie permettant l'analyse raffinée de platelages en aluminium comportant des extrusions longitudinales ou transversales, avec ou sans action mixte entre le platelage et les poutres, dans le but de déterminer comment la surcharge routière spécifiée par la norme S6-19 (CSA, 2019) est répartie entre les poutres d'un tablier aluminium / acier;
- développer les équations permettant l'utilisation de la méthode simplifiée d'analyse des tabliers de la norme S6-19 selon la disponibilité des platelages et les limites technologiques actuelles pour des tabliers avec poutres d'acier longitudinales et platelage formé d'extrusions en aluminium en considérant les quatre configurations suivantes :
 - extrusions longitudinales et action mixte avec les poutres du tablier;
 - extrusions longitudinales sans action mixte avec les poutres;
 - extrusions transversales et action mixte avec les poutres du tablier;
 - extrusions transversales sans action mixte avec les poutres;
- établir les équations permettant d'appliquer la méthode simplifiée pour le calcul des facteurs de répartition des charges routières de la norme CSA-S6 pour les types de platelages en aluminium propres au Québec actuellement en cours de développement dans un autre projet de recherche du Ministère.

1.6 Étapes de réalisation

Le projet de recherche comporte cinq étapes de réalisation qui ont fait l'objet de trois rapports d'étape et d'un rapport final, tel que détaillés au tableau 1.1.

Tableau 1.1 Liste des rapports et étapes de réalisation

Rapports et contenu	Description des étapes
1- Sélection du concept Rapport d'étape 1 (Massicotte et al, 2019a)	1- Sélection des ouvrages et des platelages La Direction générale des structures déterminera les géométries des ouvrages visés (nombre de voies, portée, espacement des poutres, etc.) et les types de platelages retenus pour ce projet : géométrie des extrusions, disposition sur les poutres et mode de connexion à celles-ci (i.e. avec action mixte ou non mixte).
	2- Revue bibliographique Une revue bibliographique spécifique aux objectifs visés sera réalisée en début de projet. Celle-ci portera sur les types de platelages ainsi que sur les approches d'analyse.
2- Validation de l'approche méthodologique Rapport d'étape 2 (Massicotte et al, 2019b)	3- Analyses raffinées Les propriétés des platelages choisis seront déterminées et des analyses raffinées par éléments finis pour un nombre limité d'ouvrages seront réalisées. Une méthode d'analyse raffinée destinée à l'analyse d'un grand nombre d'ouvrages, probablement par grillage, sera mise au point. Les conditions déterminées à l'étape précédente seront considérées.
3- Développement des méthodes simplifiée et raffinées Rapport d'étape 3 (Massicotte et al, 2020)	4- Méthode simplifiée La méthode d'analyse raffinée développée à l'étape précédente sera utilisée, dans le cadre d'une étude paramétrique, pour déterminer les efforts dans les poutres supportant le platelage, pour les différentes configurations de tabliers et de platelages retenus, afin de déterminer les relations destinées à l'utilisation de la méthode simplifiée de la norme S6-19.
4- Concept final Rapport final (présent rapport)	5- Concept final En collaboration avec le Ministère, les méthodes développées pourront être introduites dans le <i>Manuel de conception des structures</i> et proposées au comité technique de la norme S6 en charge du chapitre 5 sur les méthodes d'analyse, pour l'édition 2025 de cette norme.

1.7 Propriétés des éléments structuraux du tablier

1.7.1 Extrusions de référence

Deux géométries d'extrusions ont été considérées lors des travaux rapportés dans cette étude. L'extrusion de référence considérée, montrée sur la figure 1.2, est celle initialement développée à l'Université Laval dans le projet de recherche *Développement d'une solution de platelage en aluminium pour pont routier à*

poutres d'acier, avec action composite (R786.1). Les propriétés de cette extrusion sont données au tableau 1.2. Elle sera identifiée comme l'extrusion de 200 mm. En cours de projet, il a été convenu qu'une extrusion plus petite de 135 mm de profondeur, développée à l'Université Laval également, serait finalement retenue pour la suite du projet. Les dimensions de cette extrusion sont données sur la figure 1.3 alors que les propriétés sont données au tableau 1.3.

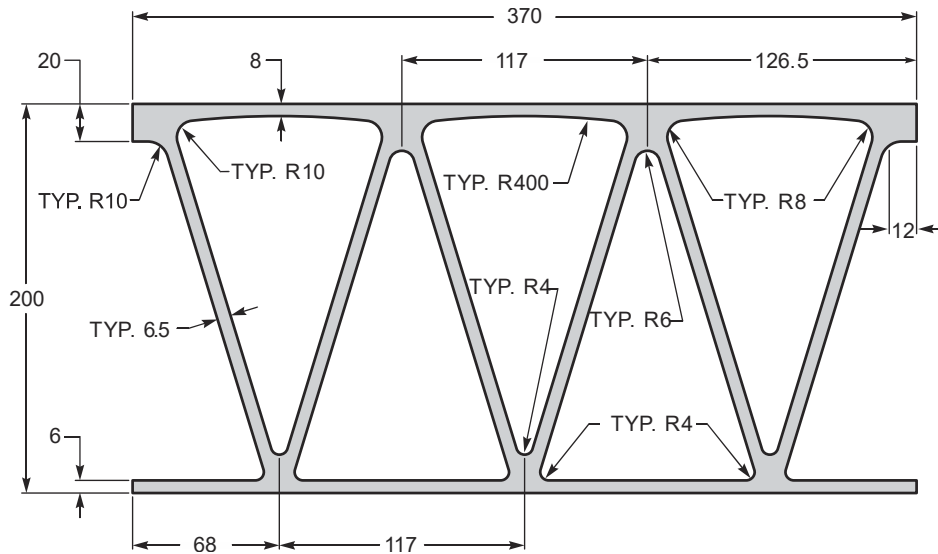


Figure 1.2 **Géométrie de l'extrusion de 200 mm**

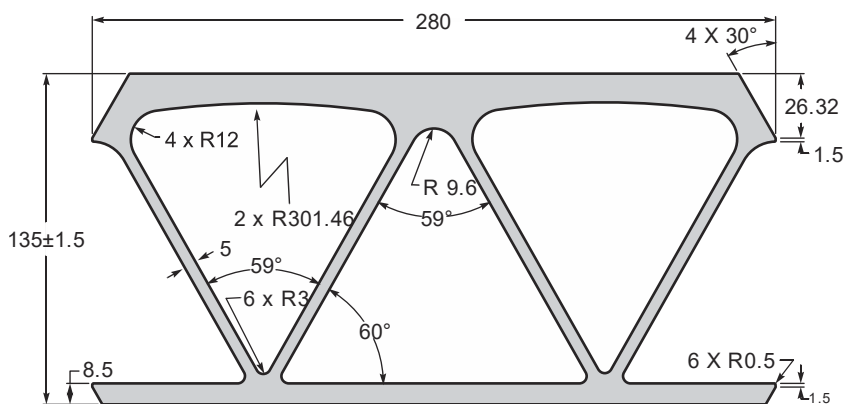


Figure 1.3 **Géométrie de l'extrusion de 135 mm**

Tableau 1.2 Propriétés des extrusions de 200 mm et 135 mm

Propriété	Extrusion de 200 mm	Extrusion de 135 mm
Aire (mm ²)	13 570	8 999
Centre de gravité (mm)	108.3	78.1
Inertie (mm ⁴)	74.95x10 ⁶	26.78x10 ⁶

1.7.2 Pont de référence

1.7.2.1 Géométrie du tablier

Le pont de référence est tiré de travaux réalisés à l'Université Laval dans le projet de recherche R786.1 mentionné plus haut. Il s'agit d'un tablier de 20 m de portée et 11.5 m de largeur avec une voie carrossable de 10.6 m, soit un pont de trois voies selon le code CSA-S6. Comme l'illustre la figure 1.4, le pont comporte quatre poutres longitudinales en acier espacées de 3.0 m avec deux porte-à-faux de 1.25 m. Les dimensions et propriétés des poutres sont données au tableau 1.3.

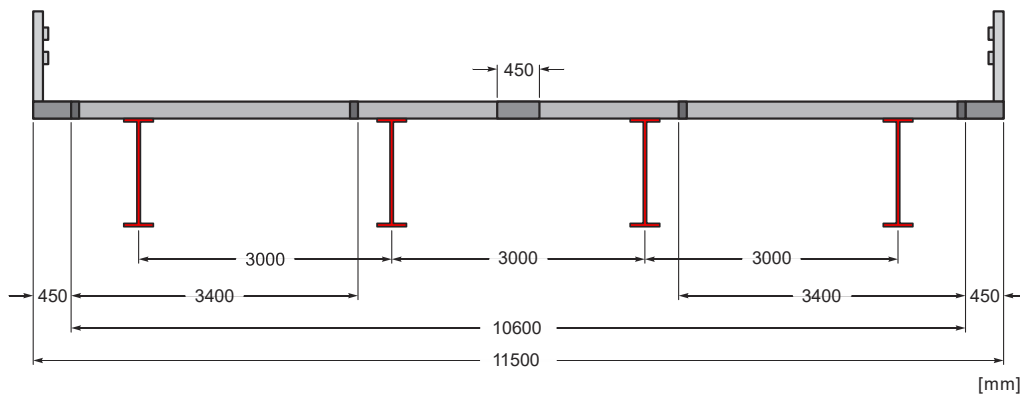


Figure 1.4 Section transversale du pont de référence

Tableau 1.3 Propriétés des poutres en acier

Propriété	Valeur
Dimensions des semelles (mm)	350×40
Dimensions de l'âme (mm)	1200×10
Aire (mm ²)	40 000
Inertie – axe fort (mm ⁴)	12 210 x10 ⁶
Inertie – axe faible (mm ⁴)	286 x10 ⁶
Constante de St-Venant (mm ⁴)	15.33x10 ⁶
Constante de gauchissement (mm ⁶)	109.9x10 ¹²

1.7.2.2 Propriétés des poutres et éléments secondaires

Les diaphragmes d'appui à modéliser sont des poutres en I et les contreventements sont en V. Les caractéristiques géométriques des éléments secondaires sont les suivantes :

- Diaphragmes d'appuis :
 - Semelle supérieure : 300x25 mm
 - Âme : 900x10 mm
 - Semelle inférieure : 300x25 mm
- Contreventements : en V formés de cornières 100×100×10 mm, 100 mm moins profonds que les poutres.

1.8 Organisation du rapport

Ce rapport final présente les résultats des études réalisées dans le cadre de ce projet de recherche et présentés dans les rapports d'étape. Outre les chapitres d'introduction et de conclusion, le rapport compte 5 chapitres principaux. La modélisation des tabliers est décrite au chapitre 2, le chapitre 3 décrit la méthodologie et les paramètres de l'étude paramétrique. Le chapitre 4 compare les résultats des études raffinées à la méthode simplifiée du code S6-19 alors que le chapitre 5 propose les équations permettant d'améliorer la méthode simplifiée dans le but d'être proposée pour la prochaine édition du code S6. Le chapitre 6 donne les résultats d'une étude de sensibilité de deux paramètres sur la distribution des efforts : la rigidité du platelage et la présence de contreventements intermédiaires.

2 MODÉLISATION DES TABLIERS

2.1 Approche

Les modèles de grillages utilisés dans l'étude paramétrique réalisée dans le cadre de ce projet de recherche ont été validés à l'aide de modèles par éléments finis tridimensionnels très raffinés. Par la suite, quatre enjeux principaux de la modélisation par grillage de tabliers avec platelage en aluminium ont été considérés dans le processus d'élaboration de l'approche de modélisation :

- la détermination des propriétés des éléments de grillage longitudinaux et transversaux visant à reproduire les caractéristiques orthotropes des extrusions;
- la considération des éléments de contreventements intermédiaires;
- la prise en considération de l'effet mixte ou non mixte;
- l'orientation des extrusions.

Les résultats des analyses associées à ces quatre enjeux sont traités dans les sections suivantes.

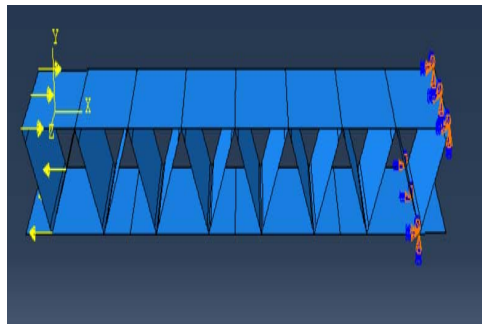
2.2 Modélisation du platelage seul

Une modélisation par éléments finis du platelage seul a d'abord été réalisée avant de faire la modélisation du pont type complet par grillage. Cette modélisation est une étape essentielle afin de déterminer les propriétés du platelage à utiliser avec les modèles de grillage. Le modèle a été réalisé avec le logiciel Abaqus pour les extrusions présentées au chapitre précédent. Les modèles sont présentés uniquement pour le platelage de 135 mm alors que les résultats sont donnés pour les deux platelages. Les détails sont donnés dans le mémoire de maîtrise de El-Hage (2019).

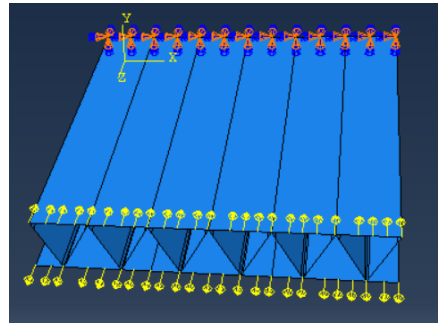
2.2.1 Propriétés du platelage de 135 mm

Les propriétés du platelage de 135 mm sont déterminées en utilisant des éléments de plaque/coque de 10 mm de dimension. Les modèles utilisés pour déterminer les inerties flexionnelles sont montrés sur la figure 2.1. Les modèles utilisés pour déterminer les aires en cisaillement sont montrés sur la figure 2.2. Le modèle utilisé pour déterminer la rigidité torsionnelle est montré sur la figure 2.3.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type
platelage en aluminium sur poutres en acier

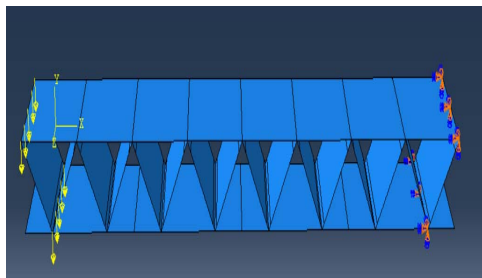


a) Modèle A – Inertie flexionnelle transversale

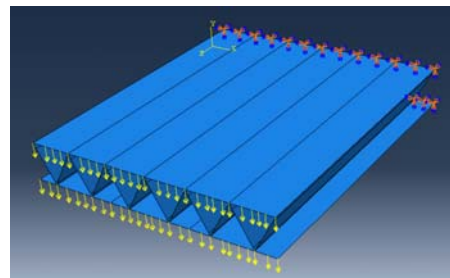


b) Modèle B – Inertie flexionnelle longitudinale

Figure 2.1 **Calcul des inerties flexionnelles du platelage**



a) Modèle C – Rigidité flexionnelle transversale



b) Modèle D – Rigidité flexionnelle longitudinale

Figure 2.2 **Calcul des aires en cisaillement du platelage**

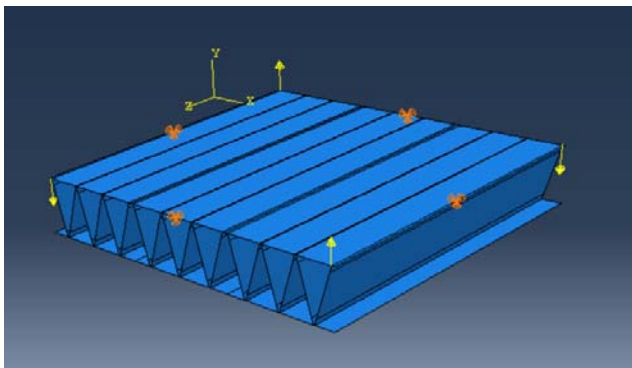


Figure 2.3 **Calcul de la rigidité torsionnelle du platelage**

2.2.2 Propriétés des platelages pour les modèles de grillage

Pour les modèles de grillage, trois propriétés sont requises dans chacune des directions : l'aire en cisaillement dans direction hors-plan (verticale), l'inertie de flexion par rapport au plan moyen du platelage et l'inertie de torsion bidirectionnelle. Les valeurs retenues dans cette étude sont données au tableau 2.1 pour les éléments de grillage associés à un platelage longitudinal ou transversal de 200 mm alors que les valeurs sont données au tableau 2.2 pour les platelages de 135 mm.

**Tableau 2.1 Propriétés d'éléments de poutres pour un
platelage de 200 mm**

Direction relative aux extrusions	A (mm ² /m)	A_v (mm ² /m)	I_x (mm ⁴ /m)	J_x (mm ⁴ /m)
Parallèle	36 700	10 900	217x10 ⁶	170x10 ⁶
Perpendiculaire	14 000	4 200	157x10 ⁶	170x10 ⁶

**Tableau 2.2 Propriétés d'éléments de poutres pour un
platelage de 135 mm**

Direction relative aux extrusions	A (mm ² /m)	A_v (mm ² /m)	I_x (mm ⁴ /m)	J_x (mm ⁴ /m)
Parallèle	32 139	7817	103x10 ⁶	112x10 ⁶
Perpendiculaire	20 000	24090	88x10 ⁶	112x10 ⁶

2.3 Élaboration des modèles de grillage

2.3.1 Validation des modèles

Des analyses raffinées par éléments finis tridimensionnelles ont été réalisées avec le logiciel ABAQUS afin de valider la modélisation par grillage du pont de référence décrit au chapitre 1 pour lequel le platelage de 200 mm a été retenu (Massicotte et al. 2019b). Pour les fins de la validation, une seule géométrie a été utilisée. Elle est toutefois typique dans sa construction à celles utilisées pour l'étude paramétrique, à savoir des éléments de poutres longitudinales principales qui incorporent les propriétés des poutres d'acier et du platelage associé, des éléments de platelage longitudinaux intercalaires, entre les poutres principales qui servent essentiellement à faire circuler les charges mobiles, et des éléments de platelage transversaux espacés à tous les mètres. À ces éléments s'ajoutent les diaphragmes d'appui et les contreventements

transversaux. Des cas de chargements typiques considérés sont illustrés sur la figure 2.4

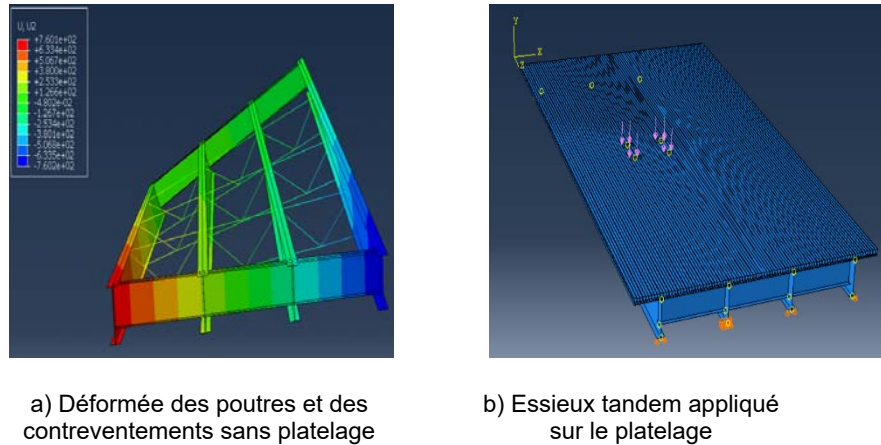


Figure 2.4 Exemples de conditions de chargement considérées

Les modèles de grillage ont été établis à l'aide du logiciel SAP2000. Pour vérifier les valeurs obtenues à partir des résultats d'éléments finis, il est nécessaire d'associer les propriétés structurales convenables aux éléments longitudinaux et transversaux constituant le grillage. Les principales caractéristiques mécaniques à calculer sont l'inertie flexionnelle I_x , l'inertie torsionnelle J_x et l'aire en cisaillement A_y . Pour les grillages sollicités transversalement à leur plan, l'aire axiale A , l'inertie par rapport à l'axe faible I_y et l'aire en cisaillement transversal A_x n'ont pas d'incidence sur les calculs.

Le modèle de grillage du pont de référence (voir figure 2.5) est donc constitué de 7 éléments longitudinaux espacés de 1.5 m dont les 4 poutres principales (bleu) et les 3 éléments représentant le platelage longitudinal (rouge clair). Pour les éléments transversaux, on utilise 21 éléments espacés de 1 m qui représentent le platelage transversal (jaune) auxquels s'ajoutent les diaphragmes d'appuis aux extrémités (rouge foncé) et les contreventements espacés à chaque 5 m (orange). Il importe de noter que les éléments de platelage transversaux sont liés aux éléments de poutres principales et de platelage intercalaires longitudinaux. Par contre les éléments de diaphragmes et contreventements ne sont attachés qu'aux poutres principales longitudinales.

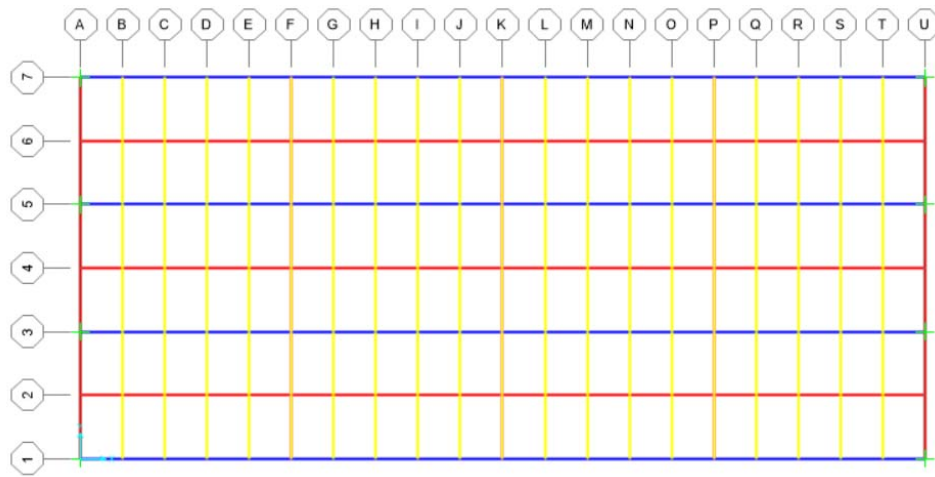


Figure 2.5 **Géométrie du modèle de grillage pour le platelage longitudinal**

La justesse des modèles de grillage a été validée en comparant les résultats obtenus avec ceux des analyses 3D par éléments finis pour des cas de chargements statiques. Ceci a été fait pour les quatre configurations du platelage de 200 mm :

- extrusions longitudinales et action mixte avec les poutres du tablier;
- extrusions longitudinales sans action mixte avec les poutres;
- extrusions transversales et action mixte avec les poutres du tablier;
- extrusions transversales sans action mixte avec les poutres;

Les analyses ont confirmé la justesse des modèles de grillage. Les analyses ont de plus fait ressortir la contribution des contreventements intermédiaires. Deux hypothèses de calcul des propriétés des contreventements intermédiaires ont été retenues, selon que le platelage était mixte ou non mixte.

2.3.2 Propriétés des éléments longitudinaux

Les propriétés calculées pour les éléments longitudinaux des modèles de grillage pour chacune des quatre configurations du platelage de 200 mm sont données du tableau 2.3 au tableau 2.6.

**Tableau 2.3 Propriétés des éléments longitudinaux
 – Platelage longitudinal mixte**

Propriété	Poutres de rive	Poutres intérieures	Platelage
I_x (mm ⁴)	19 590x10 ⁶	19 590x10 ⁶	325x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	340x10 ⁶	255x10 ⁶	255x10 ⁶
A_y (mm ²)	12 000	12 000	16 350

**Tableau 2.4 Propriétés des éléments longitudinaux
 – Platelage longitudinal non mixte**

Propriété	Poutres de rive	Poutres intérieures	Platelage
I_x (mm ⁴)	13 195x10 ⁶	13 195x10 ⁶	325x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	340x10 ⁶	255x10 ⁶	255x10 ⁶
A_y (mm ²)	12 000	12 000	16 350

**Tableau 2.5 Propriétés des éléments longitudinaux
 – Platelage transversal mixte**

Propriété	Poutres de rive	Poutres intérieures	Platelage
I_x (mm ⁴)	15 970x10 ⁶	15 970x10 ⁶	236x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	340x10 ⁶	255x10 ⁶	255x10 ⁶
A_y (mm ²)	12 000	12 000	6300

**Tableau 2.6 Propriétés des éléments longitudinaux
 – Platelage transversal non mixte**

Propriété	Poutres de rive	Poutres intérieures	Platelage
I_x (mm ⁴)	12 803x10 ⁶	12 803x10 ⁶	236x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	340x10 ⁶	255x10 ⁶	255x10 ⁶
A_y (mm ²)	12 000	12 000	6300

2.3.3 Propriétés des éléments transversaux

Pour les ponts à poutres d'acier avec dalles en béton, l'inertie transversale des contreventements intermédiaires est calculée en utilisant la relation approximative suivante (Massicotte, 2018) :

$$I_c = \sum A_h e_c^2 \quad (2.1)$$

où :

A_h Aire de chacune des membrures horizontales formant un contreventement intermédiaire;

e_c : Distance des membrures du contreventement mesurée par rapport à un axe de référence.

Des analyses sur ABAQUS pour le cas d'un platelage mixte ont démontré que l'axe neutre se situe environ au niveau de la membrure supérieure du contreventement. Donc seule l'aire de la membrure inférieure est considérée dans le calcul de l'inertie flexionnelle du contreventement transversal avec l'équation 2.1, avec une excentricité égale à la distance entre les membrures horizontales. Ainsi, l'inertie obtenue pour une cornière 100x100x10 mm avec une excentricité de 1180 mm. Pour la condition non mixte, l'inertie transversale des contreventements intermédiaires est celle correspondant aux cornières seules. Ainsi, l'inertie obtenue pour des cornières 100x100x10 mm distantes de 1180 mm. Les propriétés des éléments transversaux sont données du tableau 2.7 au tableau 2.10.

**Tableau 2.7 Propriétés des éléments longitudinaux
 – Platelage transversal mixte**

Propriété	Diaphragme d'extrémité	Contreventement intermédiaire	Platelage
I_x (mm ⁴)	3 820x10 ⁶	2 645x10 ⁶	157x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	3.3x10 ⁶	0	170x10 ⁶
A_y (mm ²)	9 000	0	4 200

**Tableau 2.8 Propriétés des éléments transversaux
 – Platelage longitudinal non mixte**

Propriété	Diaphragme d'extrémité	Contreventement intermédiaire	Platelage
I_x (mm ⁴)	3 820x10 ⁶	1322x10 ⁶	157x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	3.3x10 ⁶	0	170x10 ⁶
A_y (mm ²)	9 000	0	4 200

**Tableau 2.9 Propriétés des éléments transversaux
 – Platelage transversal mixte**

Propriété	Diaphragme d'extrémité	Contreventement intermédiaire	Platelage
I_x (mm ⁴)	3 820x10 ⁶	2 943x10 ⁶	217x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	3.3x10 ⁶	0	170x10 ⁶
A_y (mm ²)	9 000	0	10 900

**Tableau 2.10 Propriétés des éléments transversaux
 – Platelage transversal non mixte**

Propriété	Diaphragme d'extrémité	Contreventement intermédiaire	Platelage
I_x (mm ⁴)	3 820x10 ⁶	1322x10 ⁶	217x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	3.3x10 ⁶	0	170x10 ⁶
A_y (mm ²)	9 000	0	10900

2.4 Sensibilité des propriétés du tablier – Platelage de 135 mm

2.4.1 Portée de l'étude

L'étude de la sensibilité des propriétés des constituants du tablier de référence sur la répartition des charges entre les poutres de rive et intérieures a permis d'identifier les paramètres les plus importants quant à la répartition des charges entre les poutres dans le cas où, dans le futur, différents types de platelages pourraient être développés.

Les inerties en flexion et en torsion du platelage ont des effets sur la répartition des efforts qu'il importe de quantifier. Même si la contribution des

contreventements intermédiaires n'est pas considérée dans la méthode simplifiée du code CSA-S6 car leur nombre et leur rigidité ne sont pas réglementés, il est certain qu'ils contribuent à la répartition des efforts entre les poutres et leur effet bénéfique mérite d'être évalué.

L'étude s'intéresse d'abord à l'effet de la rigidité en flexion et en torsion du platelage puis à l'effet de la rigidité des contreventements intermédiaires. Ensuite, la répartition des efforts pour les quatre configurations de platelage est étudiée dans le cas avec et sans contreventements intermédiaires. Dans tous les cas les lignes d'influence du moment et de l'effort tranchant sont présentées.

2.4.2 Rigidité des contreventements

Les propriétés des contreventements ont été considérées pour les grillages en supposant une flexion en courbure simple et sans perte de rigidité due au flambement des éléments comprimés, condition qui pourrait survenir à l'approche de l'état limite ultime. De plus, advenant une condition de chargement qui induit des efforts tranchants, les diagonales seront sollicitées ce qui engendrera des déformations en cisaillement additionnelles. Considérer les déformations en cisaillement et négliger la membrure horizontale comprimée mène à une rigidité des contreventements qui constitue la borne inférieure lorsque ceux-ci sont considérés dans l'analyse. Ainsi, l'inertie équivalente en courbure double, où la contribution de la membrure horizontale supérieure comprimée d'un contreventement en V est négligée, est donnée par la relation suivante (Massicotte, 2018) :

$$I_c = \frac{S^3 h_c^2}{\left(\frac{24L_d^3}{A_d} + \frac{3S^3}{A_h} \right)} \quad (2.2)$$

où :

- A_h : Aire de chacune des membrures horizontales;
- A_d : Aire de chacune des diagonales formant un V;
- L_d : Longueur des diagonales;
- h_c : Hauteur du contreventement (distance entre les membrures horizontales);
- S : Espacement des poutres.

Dans la suite de cette section, on réfère à des contreventements rigides lorsque les propriétés incluent uniquement les rigidités en flexion sans négliger les membrures comprimées (M), ou à des contreventements flexibles, qui considèrent les déformations en cisaillement et négligent les membrures horizontales comprimées ($M+V$).

2.4.3 Effets des propriétés du platelage et des contreventements intermédiaires

Dans les figures suivantes, trois valeurs ont été utilisées pour l'inertie en flexion et en torsion du platelage : celles du platelage de référence de 135 mm et ces mêmes valeurs multipliées par 10 ou divisées par 10. L'effet de ces propriétés sur la répartition des charges entre les poutres a été regardé en fonction des propriétés attribuées aux contreventements intermédiaires. Les lignes d'influence pour les poutres de rive et intérieures pour des contreventements rigides sont présentées sur la figure 2.6 pour la condition de l'inertie flexionnelle alors que les résultats sont présentés sur la figure 2.7 pour la condition de l'inertie torsionnelle.

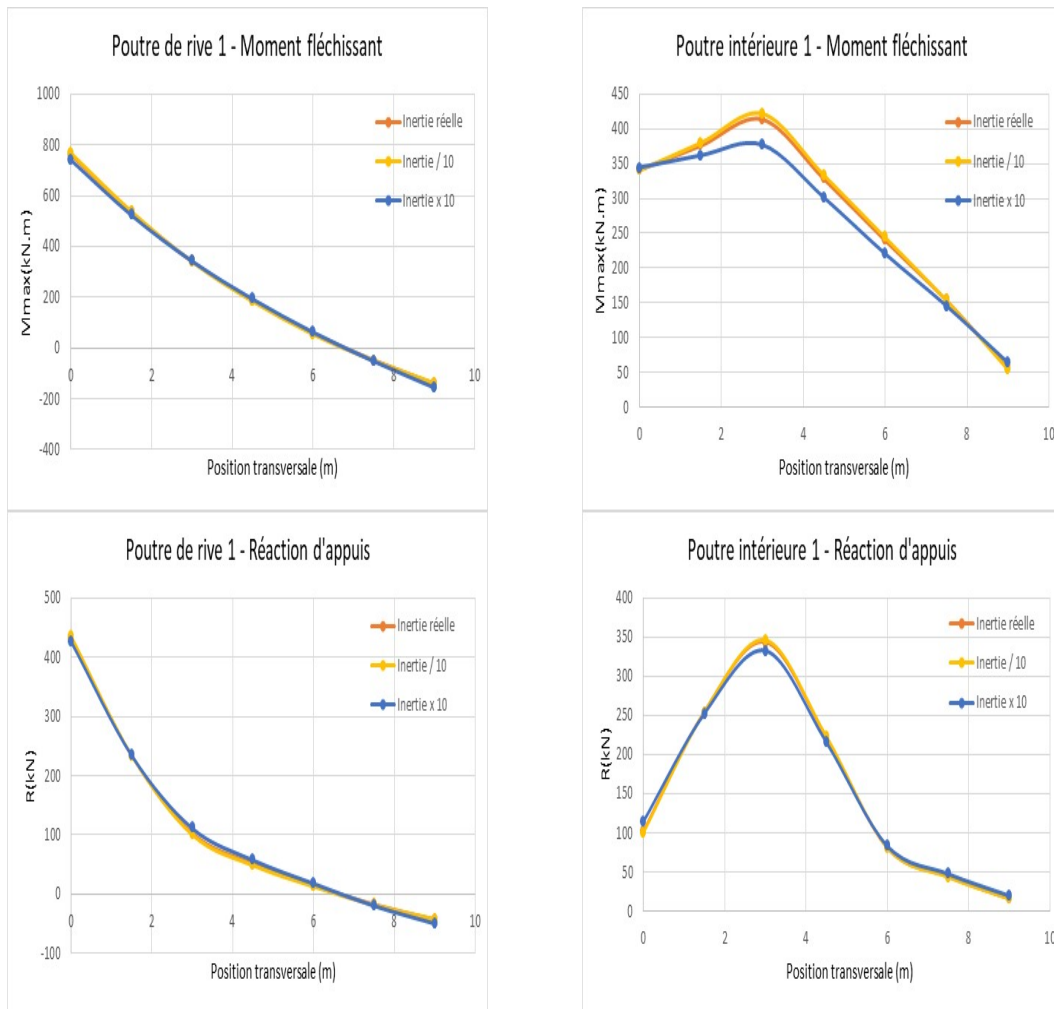


Figure 2.6 Effet de l'inertie flexionnelle – contreventements rigides

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

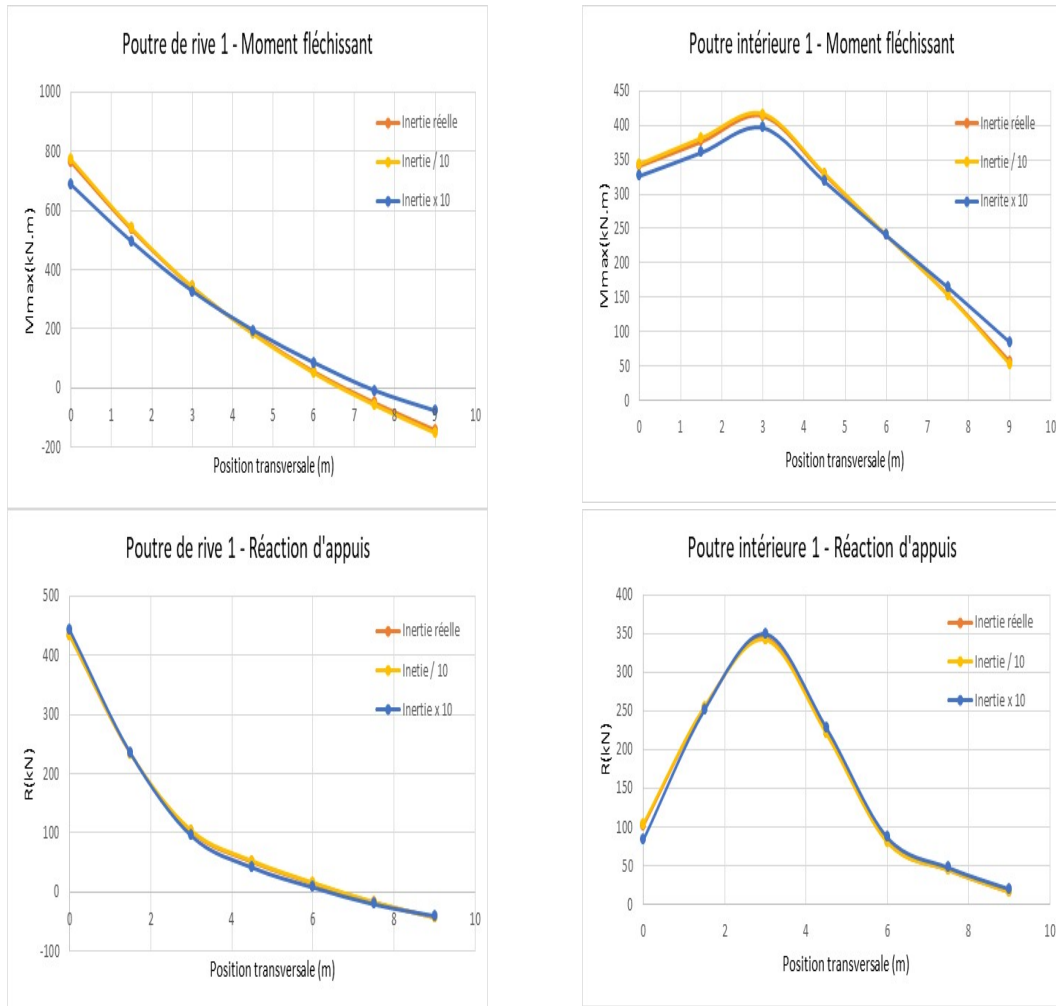


Figure 2.7 Effet de l'inertie torsionnelle – contreventements rigides

Les lignes d'influence pour les poutres de rive et intérieures dans le cas de l'inertie flexionnelle sans contreventements intermédiaires sont présentées sur la figure 2.8 alors que les résultats sont présentés sur la figure 2.9 pour l'inertie torsionnelle.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

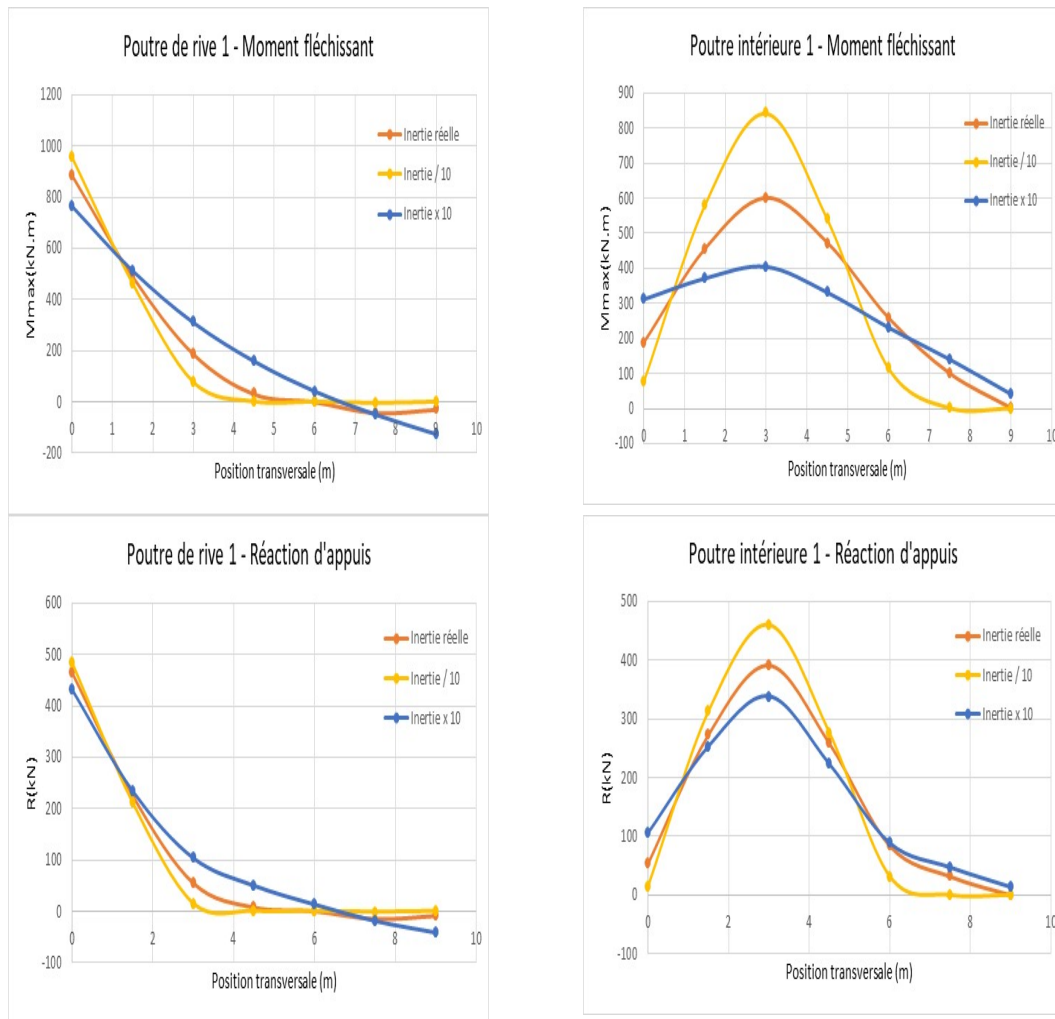


Figure 2.8 **Effet de l'inertie flexionnelle – sans contreventements intermédiaires**

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

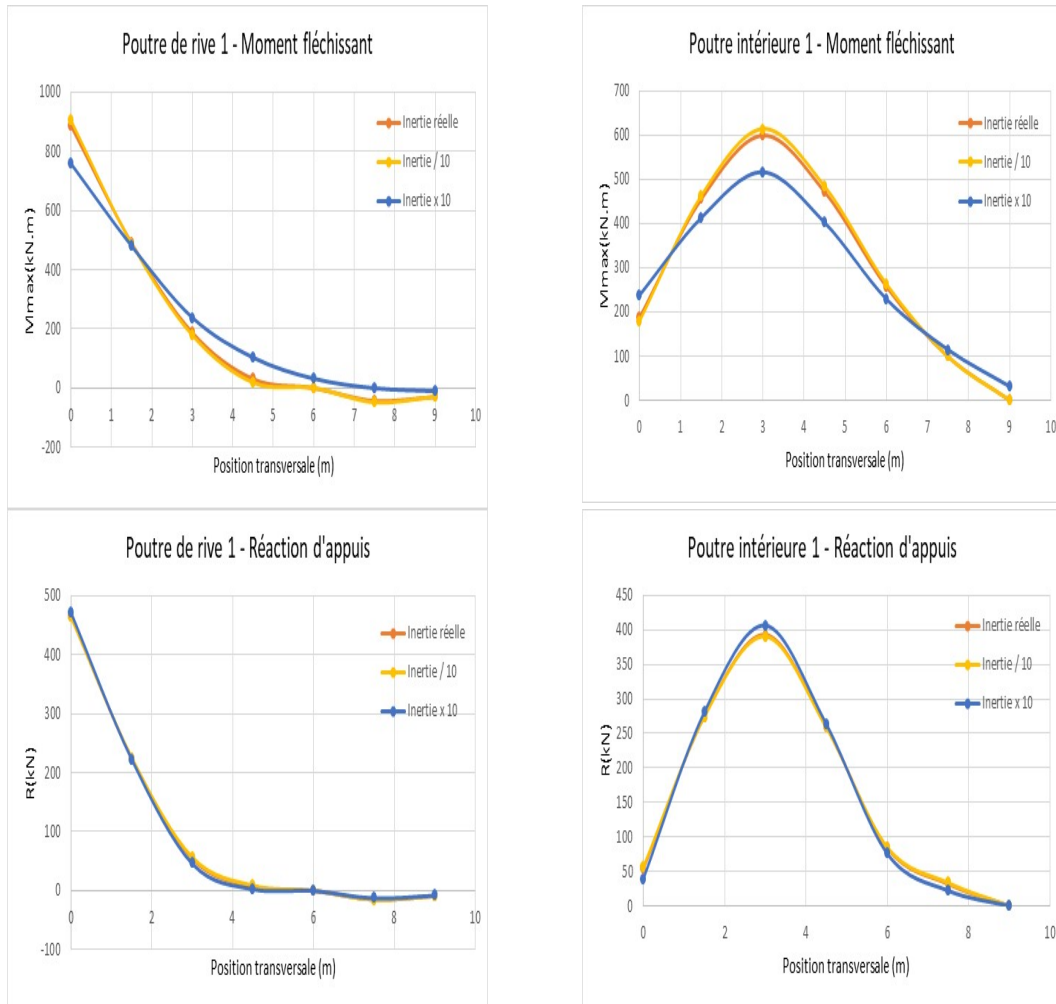


Figure 2.9 Effet de l'inertie torsionnelle – sans contreventements intermédiaires

2.4.4 Effets de la rigidité des contreventements intermédiaires

L'effet de la rigidité des contreventements est illustré sur la figure 2.10 dans le cas où les propriétés de référence du platelage sont considérées. Trois conditions sont illustrées : avec des contreventements flexibles ou rigides et sans contreventements.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

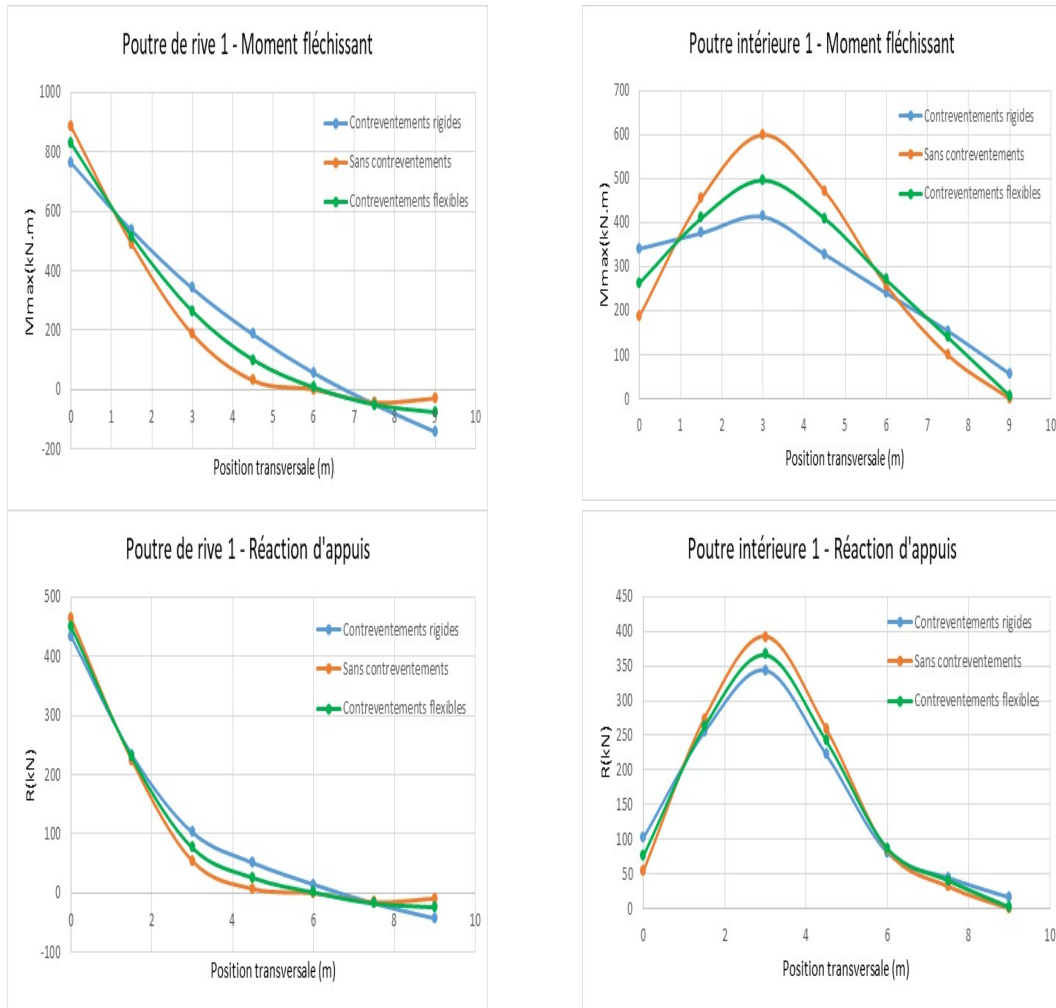


Figure 2.10 Effet de l'inertie des contreventements

2.4.5 Effets de la configuration du platelage

Les lignes d'influence pour les quatre configurations du platelage sont illustrées sur la figure 2.11 pour le cas avec contreventements intermédiaires rigides et sur la figure 2.12 pour le cas sans contreventements intermédiaires.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

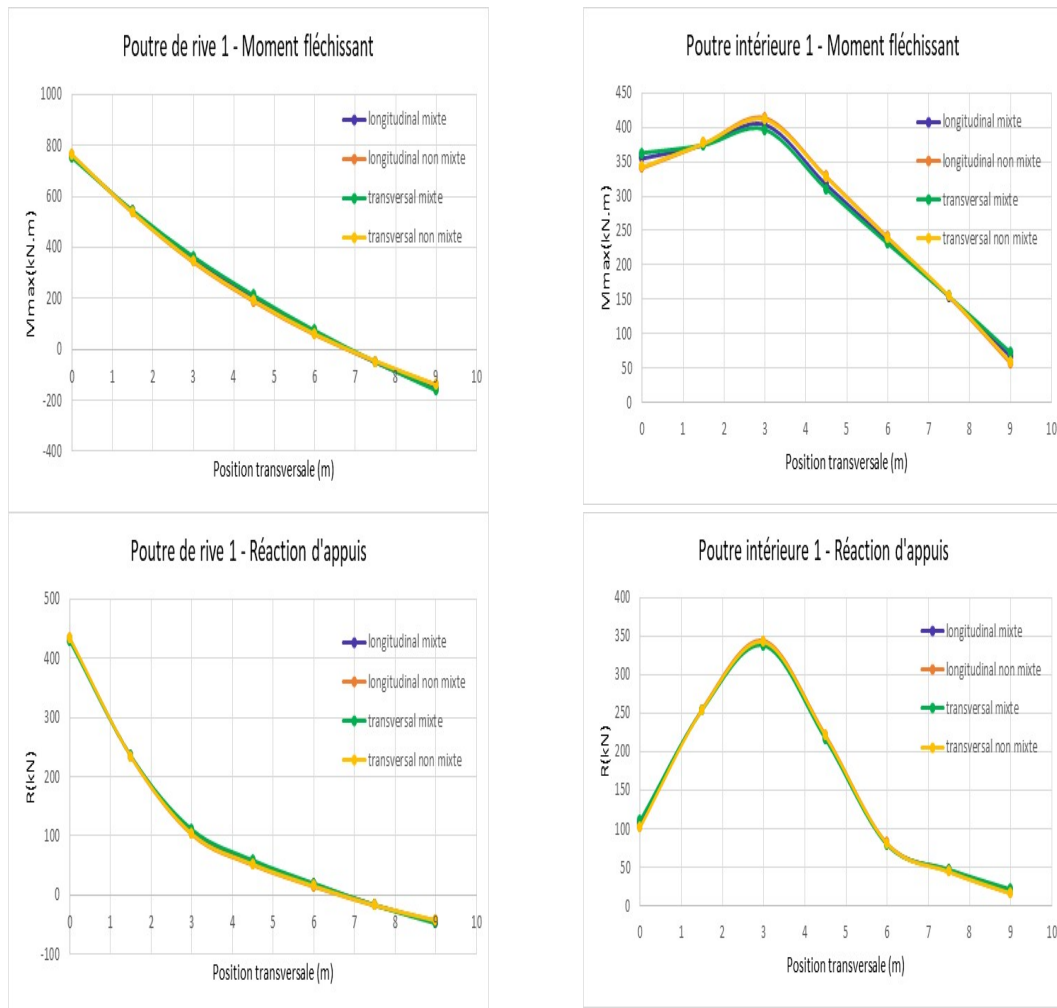


Figure 2.11 Effets de contreventements rigides pour les configurations du platelage

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

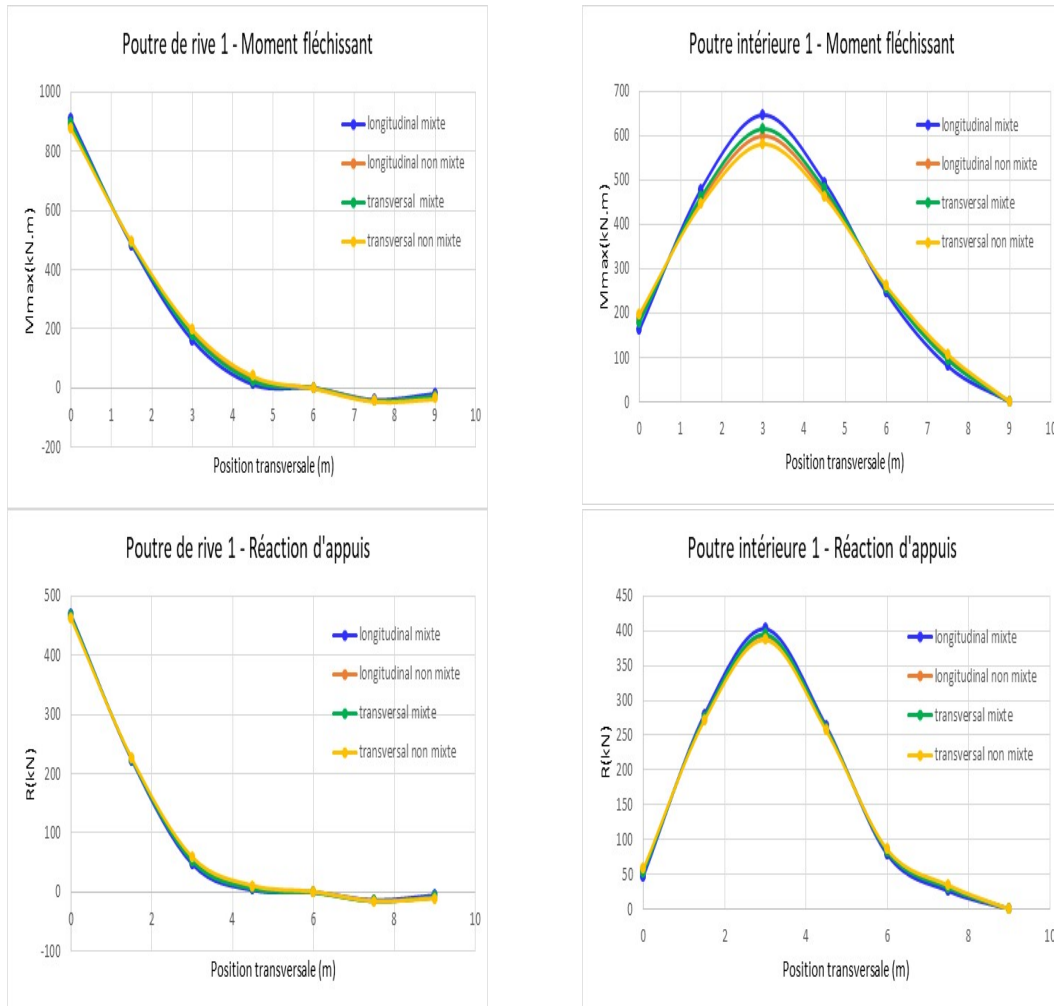


Figure 2.12 Effet de la condition sans contreventements pour les configurations du platelage

2.4.6 Sommaire

Les résultats de l'étude indiquent que la rigidité transversale est le paramètre le plus important, qu'elle soit procurée par la contribution des contreventements intermédiaires ou du platelage. L'effet est plus marqué pour la flexion que pour l'effort tranchant. La configuration du platelage (mixte ou non, transversal ou longitudinal) a peu d'effet sur la répartition des efforts, que ce soit avec ou sans contreventements intermédiaires.

2.5 Modélisation du pont à platelage longitudinal de 135 mm non mixte

L'inertie en flexion longitudinale des éléments longitudinaux correspondant aux poutres est déterminée à partir de la valeur théorique de l'inertie de chaque poutre. Comme la largeur tributaire est environ la même pour les poutres de rive et intérieures, l'inertie du tablier est divisée également entre les poutres. Pour les éléments de platelage intercalaires, l'inertie donnée au tableau 2.11 est utilisée. Il est supposé que ces éléments ont une largeur tributaire égale à la moitié de l'espacement des poutres principales, soit 1.5 m.

La rigidité torsionnelle retenue est celle correspondant au comportement bidirectionnel du platelage indiquée au tableau 2.2. Pour les éléments de platelage intercalaires et pour les poutres intérieures, une largeur tributaire de 1.5 m est utilisée. Pour les poutres de rive, une largeur de 2 m est utilisée, soit 1.25 m pour la partie en porte-à-faux et 0.75 m pour la partie intérieure. La contribution des poutres à la rigidité torsionnelle est donc négligée.

L'aire en cisaillement des poutres longitudinales est prise égale à l'aire de l'âme tirée des dimensions présentées au tableau 2.11. Pour les éléments de platelage, la valeur donnée au tableau 1.3 pour une largeur tributaire de 1.5 m est utilisée. Les propriétés des éléments longitudinaux sont données au tableau 2.11. Les propriétés des éléments transversaux sont données au tableau 2.12.

**Tableau 2.11 Propriétés des éléments longitudinaux
 – Platelage longitudinal de 135 mm non mixte**

Propriété	Poutres de rive	Poutres intérieures	Platelage
I_x (mm ⁴)	12 700x10 ⁶	12 700x10 ⁶	154x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	75.6x10 ⁶	56.7x10 ⁶	168x10 ⁶
A_y (mm ²)	12 000	12 000	11 700

**Tableau 2.12 Propriétés des éléments transversaux
 – Platelage longitudinal de 135 mm non mixte**

Propriété	Diaphragme d'extrémité	Contreventement intermédiaire	Platelage
I_x (mm ⁴)	3 820x10 ⁶	264x10 ⁶	88x10 ⁶
J_x (mm ⁴)	3.3x10 ⁶	0	112x10 ⁶
A_y (mm ²)	9 000	0	24 000

2.6 Facteurs d'essieux

Les modèles de grillage développés sont utilisés pour déterminer les facteurs d'essieux. La procédure adoptée consiste à faire circuler les roues du CL-625 (demi-camion) sur les éléments longitudinaux afin de tracer les lignes d'influence pour chaque poutre pour l'effort désiré. Les lignes d'influence sont ensuite utilisées afin de positionner les camions selon des différentes combinaisons spécifiées par le code CSA-S6, illustrées sur la figure 2.13, et en utilisant le facteur de simultanéité R_L approprié selon le nombre de voies chargées. Les règles retenues pour l'édition 2019 du code CSA-S6-19 sont appliquées.

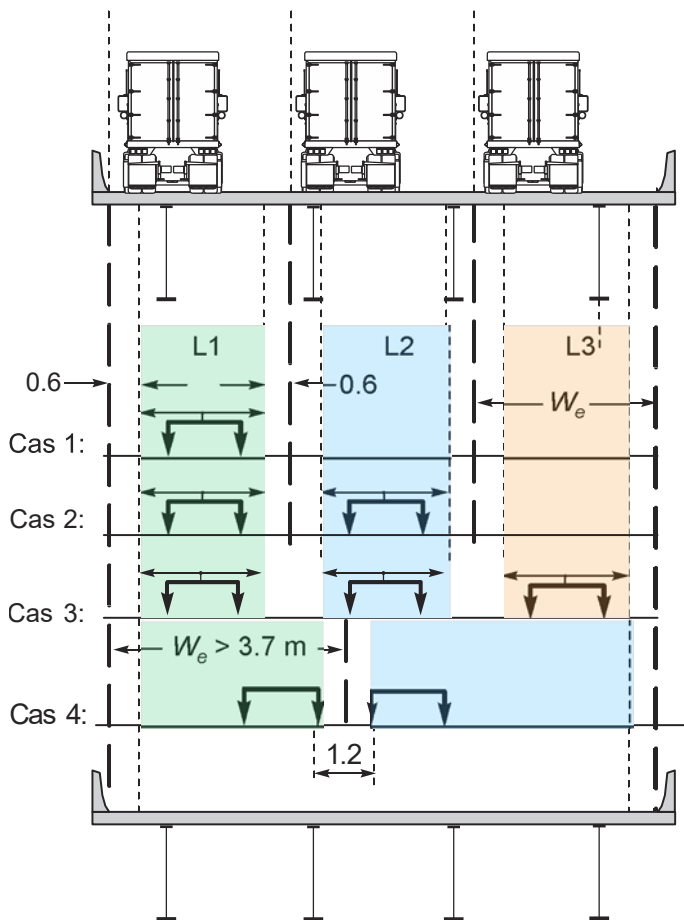


Figure 2.13 Cas de chargement spécifiés par le code CSA-S6-19

Les facteurs d'essieux F_T obtenus des analyses de grillage sont calculés en appliquant la relation suivante :

$$F_T = \frac{E_{\max}}{E_{\text{voie}}} \quad (2.3)$$

avec :

$E_{\max}$: l'effort maximal sollicitant une poutre;

E_{voie} : l'effort total causé par le camion CL-625 sur une voie;

Les valeurs obtenues des analyses de grillage peuvent être comparées aux valeurs préconisées par la méthode simplifiée du code CSA-S6. Les valeurs calculées pour les platelages en aluminium et les dalles en béton pour le pont de référence sont données au tableau 2.13 à l'état limite ultime. Ils sont comparés à la valeur maximale obtenue des analyses de grillage pour chacune des situations.

Tableau 2.13 Facteurs d'essieux à ÉLUT

Méthode d'analyse	Moment			Effort tranchant		
	Poutre extérieure	Poutre intérieure	Concep- tion	Poutre extérieure	Poutre intérieure	Concep- tion
Platelage aluminium S6	1.14	1.14	1.14	0.63	1.18	1.18
Dalle en béton S6	0.84	0.82	0.84	0.88	0.88	0.88
Éléments finis Avec contrev.	0.80	0.66	0.80	Note 1	Note 1	(1)
Éléments finis Sans contrev.	0.72	0.75	0.75	Note 1	Note 1	(1)
Grillage Extrusion 200 Contrev. rigide	0.80	0.67	0.80	0.76	0.83	0.83
Grillage Extrusion 135 Contrev. rigide	0.80	0.68	0.80	0.75	0.83	0.83
Grillage Extrusion 135 Contr. flexible	0.75	0.72	0.75	0.72	0.87	0.87
Grillage Extrusion 135 Sans contr.	0.71	0.77	0.77	0.73	0.90	0.90

(1) : Modèles non réalisés

2.7 Sommaire

Ces résultats indiquent que la rigidité des contreventements affecte peu la valeur de conception en flexion lorsque la poutre la plus critique est considérée. Cette comparaison indique également que la méthode actuelle est beaucoup trop sécuritaire. Les résultats indiquent également que la distribution des efforts entre les poutres dans le cas des platelages en aluminium s'approche davantage de la condition de dalle en béton que de la répartition isostatique actuellement considérée dans le code CSA-S6.

3 ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

3.1 Création des modèles

Une étude paramétrique sur des modèles de grillages a été réalisée en analysant un grand nombre de ponts. Un outil informatique a donc été développé à cette fin. Tout d'abord, le logiciel SAP2000 (CSI, 2018) a été choisi comme logiciel d'analyse, car celui-ci permet une interaction avec d'autres logiciels de programmation. De plus, ce logiciel permet d'effectuer des analyses de type charge mobile (*Moving Load*) par ligne d'influence. 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.

3.2 Géométrie des tabliers

3.2.1 Ponts considérés

L'étude paramétrique visant à développer la méthode simplifiée porte uniquement sur des ponts synthétiques sans contreventements intermédiaires, pour des platelages longitudinaux non mixtes.

Le premier rapport d'étape (Massicotte et al. 2019a) a indiqué la plage des valeurs choisies pour déterminer la géométrie des tabliers synthétiques de l'étude paramétrique. Il est considéré que l'espacement des poutres ne pouvait excéder le tiers de la portée ($S_{max} \leq L/3$) ni être moindre qu'un quinzième de la portée ($S_{min} \geq L/15$). À cela s'ajoute un espacement minimal de 0.6 m et un espacement maximal de 3.0 m. Ces limites ont été choisies pour rester dans des agencements géométriques pratiques. La longueur du porte-à-faux est fixée par des considérations pratiques. La valeur minimale de 0.3 m correspond à la valeur maximale de 0.5 S pour l'espacement de poutres minimal de 0.6 m alors que la valeur de 1.25 m est gouvernée par le type d'extrusion choisie. Des chasse-roues de 0.45 m ont également été retenus. Le tableau 3.1 résume les plages de variation des paramètres. Seuls des ponts de type *portée simple* seront considérés.

L'ensemble des paramètres indiqués au tableau 3.1 correspond à 972 ponts : 6 portées, 3 longueurs de porte-à-faux, 3 nombres de voies, 3 largeurs de voies, 7 nombres de poutres (3 à 8 selon les limites géométriques). Toutefois, en appliquant les paramètres indiqués plus haut, le nombre de ponts générés devient égal à 398. La figure 3.1 présente les plages d'espacements des poutres considérées selon la portée alors que la figure 3.2 montre les plages du nombre de poutres considérées selon la portée.

Tableau 3.1 Paramètres géométriques de l'étude paramétrique

Paramètres – Nombre	Plage de valeurs
Portée simple L (m)	3, 5, 10, 15, 20, 30
Espacement des poutres S (m)	$L = 3$ m : 0.6 à 1.0 m $L = 5$ m : 0.6 à 1.67 m $L = 10$ m : 0.67 à 3.0 m $L = 15$ m : 1.0 à 3.0 m $L = 20$ m : 1.33 à 3.0 m $L = 30$ m : 2.0 à 3.0 m
Longueur du porte-à-faux S_c	$0.3S, 0.5S, 0.6S$ $0.3 \text{ m} \leq S_c \leq 1.25 \text{ m}$
Nombre de voies (n) et largeur de chaussée W_c (m)	$n = 1$: W_c de 4.0 à 6.0 m $n = 2$: W_c de 6.1 à 10.0 m $n = 3$: W_c de 10.1 à 13.5 m
Largeur de voie $W_e = W_c / n$ (m)	Étroite (W_{e_min}) Moyenne Large (W_{e_max})

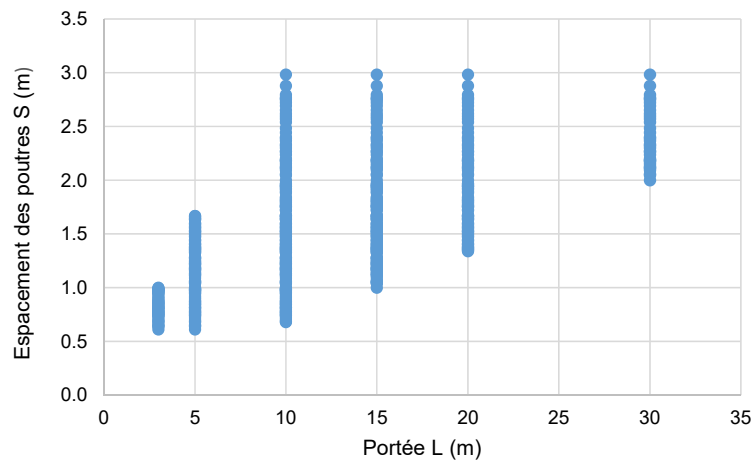


Figure 3.1 Espacement des poutres considéré

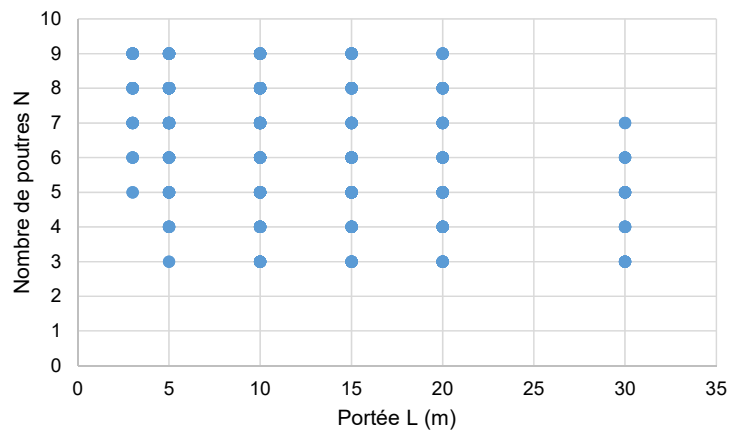


Figure 3.2 Nombre de poutres

3.2.2 Propriétés des poutres

Il est requis de déterminer les propriétés des poutres pour faire l'étude paramétrique. L'approche retenue est la même que celle utilisée pour les ponts en acier et en béton (Massicotte et al. 2016). Suite à l'étude des ponts courants, il est possible de déterminer la rigidité flexionnelle longitudinale des ponts en fonction des travées. La figure 3.3 montre la plage des propriétés considérées dans différentes études.

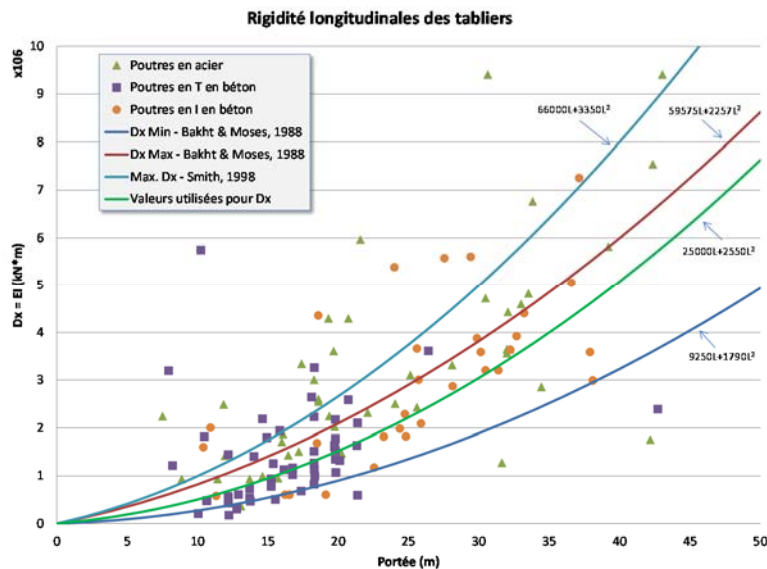


Figure 3.3 Rigidité flexionnelle des tabliers (Massicotte et al. 2016)

La relation suivante a été retenue pour le développement de la méthode simplifiée du code CSA-S6-14 :

$$D_x = 25000 L + 2550 L^2 \quad (3.1)$$

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

$$I_x = \frac{D_x S}{E} \quad (3.2)$$

La relation précédente provient de ponts mixtes avec dalle participante. Afin de s'assurer que les propriétés des poutres synthétiques utilisées soient réalistes, des vérifications additionnelles ont été réalisées : au niveau de la flèche et pour la variation de contraintes en fatigue. Dans les deux cas le facteur d'essieu pour les poutres mixtes à l'état limite d'utilisation 2 (ÉLUL-2) pour le calcul des flèches ou à l'état limite de fatigue (ÉLF) pour le calcul des contraintes a été utilisé. Le même facteur s'applique pour ces deux états limites, noté F_{TF} pour les fins de ce document.

Les vérifications ont permis de démontrer que l'inertie retenue pour le calcul des propriétés des éléments de grillage respecte les critères de conception de la condition en service pour la très grande majorité de tabliers analysés.

3.2.3 Choix de l'extrusion de référence

L'extrusion de référence considérée dans l'étude paramétrique, montrée sur la figure 3.4, est celle développée à l'Université Laval dans un autre projet de recherche (*Développement d'une solution de platelage en aluminium pour pont routier à poutres d'acier avec action composite (R786.1)*). Cette géométrie sera celle considérée pour les analyses des ponts pour la suite de ce chapitre.

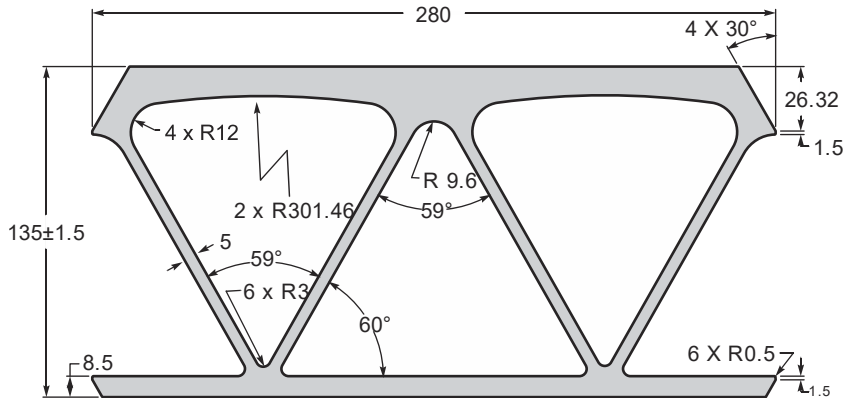


Figure 3.4 Géométrie de l'extrusion

3.2.4 Géométrie des ponts retenues

Les conditions à respecter concernant l'espacement des poutres et la longueur du porte-à-faux limitent le nombre des ponts à analyser. Si ces conditions n'étaient pas imposées alors le nombre de ponts à analyser serait égal à 972 ponts.

Ces conditions sont :

1. l'espacement des poutres S ne peut pas être inférieur au $1/15$ la longueur du pont L ;
2. l'espacement des poutres S ne peut pas être supérieur au tiers de la longueur du pont L ;
3. la longueur S_c du porte-à-faux ne peut pas être inférieure à 0.3 m;
4. la longueur S_c du porte-à-faux ne peut pas être supérieure à 1.25 m.

Avec ces conditions, le nombre de ponts à analyser est réduit à 398 ponts pour chaque configuration de platelage.

4 VALIDATION DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE DU CODE S6-19

4.1 Introduction

Des études similaires à celles faites par Alexandre Phan (Développement de la méthode d'analyse simplifiée du code CSA-S6 pour les ponts de type dalle sur poutres) ont été faites dans le cadre de ce projet mais avec le cas d'un platelage en aluminium sur poutres en acier uniquement. Dans les paragraphes qui suivent, les résultats pour les configurations de platelage longitudinal et transversal peuvent être rassemblés dans un but comparatif et cela pour le moment fléchissant et l'effort tranchant à l'ÉLUT/ÉLUL-1 et à l'ÉLF/ÉLUT-2.

4.2 Étude statistique des résultats

Une étude statistique des résultats est nécessaire pour pouvoir juger si la méthode simplifiée est sécuritaire ou non et d'évaluer son degré de précision. Les valeurs du moment fléchissant ou de l'effort tranchant obtenues par la méthode simplifiée de la norme CSA-S6-19 pour les poutres intérieures et extérieures peuvent être comparées à celles obtenues par les analyses de grillage faites sur les 398 ponts retenus, et cela, pour chacune des configurations du platelage prises en compte. Il est nécessaire de noter qu'une étude plus précise pourrait être faite en comparant les résultats de la méthode simplifiée à ceux des modèles d'éléments finis qui donnent une approximation la plus proche de la solution exacte. Cependant, les temps de calcul sont très élevés pour ces modèles vu la considération de charges mobiles et des conditions de contact entre le platelage et les poutres à prendre en compte et qui présentent un aspect non linéaire dans ces modèles. Cette approche est celle retenue pour les équations de la méthode simplifiée actuellement utilisée pour le code CSA-S6 pour les autres types de tabliers.

En notant E_G l'effort obtenu par la méthode de grillage et E_{MS} l'effort obtenu par la méthode simplifiée, la variable E peut être définie de la façon suivante :

$$E = \frac{E_G}{E_{MS}} \quad (4.1)$$

La moyenne de la variable est définie comme suit :

$$\delta_E = \overline{E} = \frac{\overline{E_G}}{E_{MS}} \quad (4.2)$$

En notant σ_E l'écart type de E , le coefficient de variation V_E est défini par :

$$V_E = \frac{\sigma_E}{\delta_E} \quad (4.3)$$

L'écart type est une mesure de la dispersion des valeurs d'une variable par rapport à la moyenne. Il est une bonne mesure de l'homogénéité de différents résultats sur une même variable. Par exemple, l'écart type permet de faire une comparaison entre les valeurs des efforts obtenus pour une poutre extérieure pour les différentes configurations de platelage. En revanche, l'écart type ne donne pas une bonne comparaison si des mesures ont été faites sur différentes variables vu que les ordres des grandeurs de ces variables peuvent être différents. L'introduction du coefficient de variation s'avère alors nécessaire puisque ce paramètre adimensionnel est indépendant de l'unité de mesure et permet de comparer la dispersion de variables différentes. Par exemple, le coefficient de variation peut être utilisé pour étudier la différence entre les efforts obtenus pour une poutre extérieure et ceux obtenus pour une poutre intérieure pour une même configuration de platelage.

Un autre paramètre plus représentatif du nombre d'échantillons qui se trouve du côté sécuritaire est le facteur k_A qui est un facteur très utilisé dans les études statistiques et qui est donné par la formule suivante :

$$k_A = \frac{1 - \delta_E}{\sigma_E} \quad (4.4)$$

Ce paramètre indique le nombre d'écarts types qui sépare le biais de 1.0. Ces paramètres seront utilisés pour la suite de l'étude pour pouvoir juger de la tendance de la méthode simplifiée à se situer du côté sécuritaire.

4.3 Valeurs du coefficient D_T pour un platelage en aluminium

Les valeurs du coefficient D_T spécifiées par la norme pour un platelage en aluminium sur poutres en acier sont alors données au tableau 4.1. Le coefficient D_T représente la largeur sur laquelle une voie est distribuée.

Tableau 4.1 Valeurs de D_T (m) pour les platelages en aluminium

Condition	n	Moment Poutres intérieures et extérieures	Effort tranchant Poutres intérieures	Effort tranchant Poutres extérieures
ÉLUL et ÉLUT-1	1	2.40	2.40	Répartition isostatique
	≥ 2	2.55	2.55	Répartition isostatique
ÉLUT-2 et ÉLF	Tous	2.40	2.40	Répartition isostatique

4.4 Moment fléchissant – ÉLUL/ÉLUT-1

Une comparaison entre la méthode simplifiée de la norme S6-14 avec la méthode du grillage pour le moment fléchissant à l'ÉLUL et à l'ÉLUT-1 sera étudiée pour la suite.

4.4.1 Analyse des résultats

Le graphe donnant les résultats de la méthode simplifiée par rapport aux résultats obtenus par les modèles de grillage est représenté à la figure 4.1. Une droite d'égalité entre les 2 méthodes est tracée pour situer les résultats de la méthode simplifiée par rapport à cette droite afin de visualiser si cette méthode est sécuritaire ou non.

Les résultats présentés à la donnent l'ensemble des moments calculés pour une poutre extérieure et intérieure par la méthode de grillage et comparés à ceux obtenus par la méthode simplifiée pour les 2 configurations de platelage longitudinal et transversal.

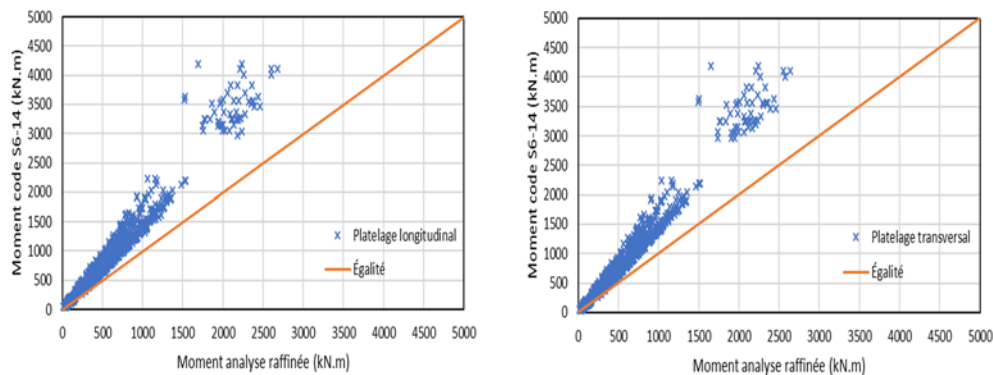


Figure 4.1 Comparaison du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Les résultats obtenus pour les 2 configurations de platelage n'ont pas été présentés sur le même graphique vu que les résultats pour les 2 cas sont très similaires et donc pour éviter toute confusion. En analysant les graphes à la figure 4.1, il est évident que la méthode simplifiée donne des résultats sécuritaires. Plus le moment fléchissant est grand plus les résultats de la méthode simplifiée s'éloignent de ceux de l'analyse raffinée. Cet écart, de l'ordre de 37%, est le plus grand pour les ponts de grande portée et dont l'espacement des poutres est relativement grand comparativement à la largeur du pont. Ceci peut s'expliquer par le fait que la relation liant le facteur d'essieu à l'espacement des poutres est une relation de proportionnalité, les autres paramètres ayant un effet moins sensible que l'espacement des poutres. Cet écart est donc plus ressenti pour les ponts de grande portée puisque le moment de voie du camion CL-625 augmente avec cette longueur. Le ratio M_{MS}/M_G est toutefois assez constant peu importe la portée.

Le tableau 4.2 donne les valeurs des paramètres statistiques de cette variable pour une poutre extérieure et intérieure et pour les 2 configurations de platelage.

**Tableau 4.2 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant
 à l'ÉLUL/ÉLUT-1**

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.602	0.094	0.156	4.225
	Intérieure	0.693	0.086	0.125	3.557
Transversal	Extérieure	0.606	0.093	0.154	4.232
	Intérieure	0.688	0.089	0.129	3.514

Les écarts entre les moyennes et les écarts type pour le platelage longitudinal et transversal sont minimales comme prévu. La moyenne pour les poutres extérieures et intérieures est de l'ordre de 0.6. Cela signifie que la méthode simplifiée est trop sécuritaire. En outre, le coefficient de variation est relativement faible et indique que la méthodologie sur laquelle la norme canadienne a été basée pour élaborer les équations simplifiées est appropriée. Finalement, la moyenne calculée pour la poutre extérieure est plus faible que celle pour une poutre intérieure mais avec une plus grande dispersion des résultats. La norme semble être plus conservatrice quant aux calculs du moment fléchissant extérieur. La différence entre les 2 valeurs est égale à 13.1% pour le cas du platelage longitudinal et 11.9% pour le cas du platelage transversal.

Dans ce qui suit, une étude de l'influence de quelques variables géométriques sur les paramètres statistiques a été faite.

4.4.2 Influence des paramètres géométriques sur les résultats

L'objet de cette section est d'étudier l'effet des différents paramètres géométriques sur la différence qui existe entre la méthode simplifiée et la méthode de grillage et sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLUL et l'ÉLUT-1. Les paramètres géométriques tels que déjà définis sont : le nombre de voies de calcul sur le pont n , la portée du pont L , la longueur du porte-à-faux S_c , et l'espacement entre les poutres S .

4.4.2.1 Influence du nombre de voies

Le nombre de voies est l'un des facteurs qui peut avoir un effet important sur la répartition des efforts sur les poutres. La norme CSA S6-14 spécifie que le coefficient D_T varie de 2.4 à 2.55, respectivement pour un nombre de voie égal à 1 jusqu'à un nombre de voies supérieur ou égal à 2. Cependant, il est plus approprié de considérer un coefficient D_T qui varie suivant le nombre de voies en fonction de la portée du pont.

Dans ce qui suit, seuls les graphes donnant les résultats pour un platelage longitudinal seront présentés. La figure 4.2 donne la différence entre les moments pour les 2 méthodes en variant le nombre de voies.

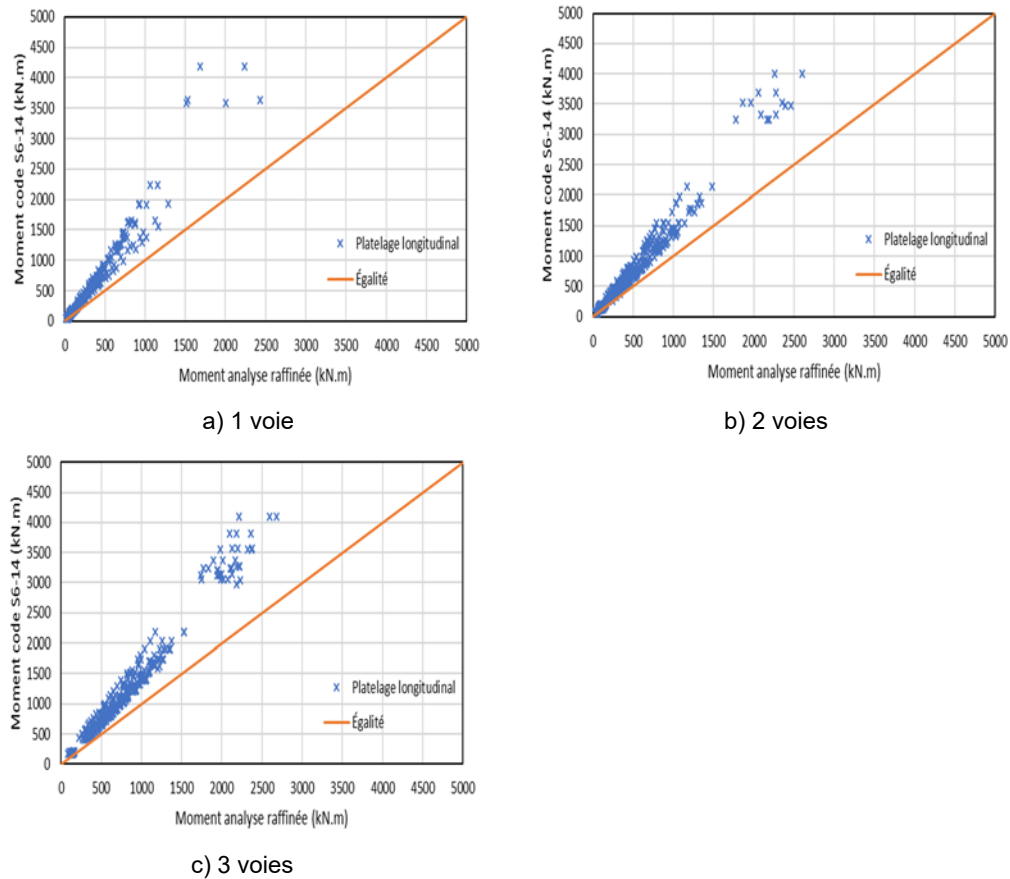


Figure 4.2 Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUTL-1 – variation du nombre de voies

Le tableau 4.3 donne les paramètres statistiques du moment fléchissant pour un nombre de voies variant de 1 à 3 et pour les 2 configurations de platelage longitudinal et transversal et pour les poutres extérieures et intérieures.

**Tableau 4.3 Paramètres statistiques du moment fléchissant à
 l'ÉLUL/ÉLUT-1 - variation du nombre de voies**

	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
1 voie	Longitudinal	Extérieure	0.559	0.095	0.169	4.658
		Intérieure	0.645	0.086	0.134	4.118
	Transversal	Extérieure	0.564	0.095	0.169	4.592
		Intérieure	0.641	0.092	0.143	3.914
2 voies	Longitudinal	Extérieure	0.622	0.086	0.138	4.416
		Intérieure	0.716	0.087	0.122	3.270
	Transversal	Extérieure	0.625	0.084	0.135	4.439
		Intérieure	0.712	0.088	0.124	3.263
3 voies	Longitudinal	Extérieure	0.637	0.080	0.125	4.540
		Intérieure	0.714	0.064	0.089	4.501
	Transversal	Extérieure	0.639	0.078	0.123	4.604
		Intérieure	0.708	0.065	0.091	4.514

D'après les résultats montrés au tableau 4.3, il est possible de constater que la moyenne augmente avec le nombre de voies. La méthode simplifiée est alors la plus sécuritaire pour un pont à une seule voie. Ceci peut s'expliquer par le fait que le facteur D_T est plus petit pour un pont à une seule voie que pour les ponts de deux voies et plus et donnant donc un facteur d'essieu plus grand.

4.4.2.2 Influence de la portée du pont

La longueur du pont ne semble pas être un paramètre important dans le calcul des facteurs d'essieu actuel pour les platelages en aluminium puisque ce paramètre ne figure pas dans les équations du coefficient D_T , du moins, selon les équations retenues dans le code S6-14. Cependant, d'après la figure 4.3, il est possible de remarquer que la longueur a une influence sur les résultats en visualisant le rapport des valeurs obtenues par les deux méthodes en fonction de la portée du pont.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

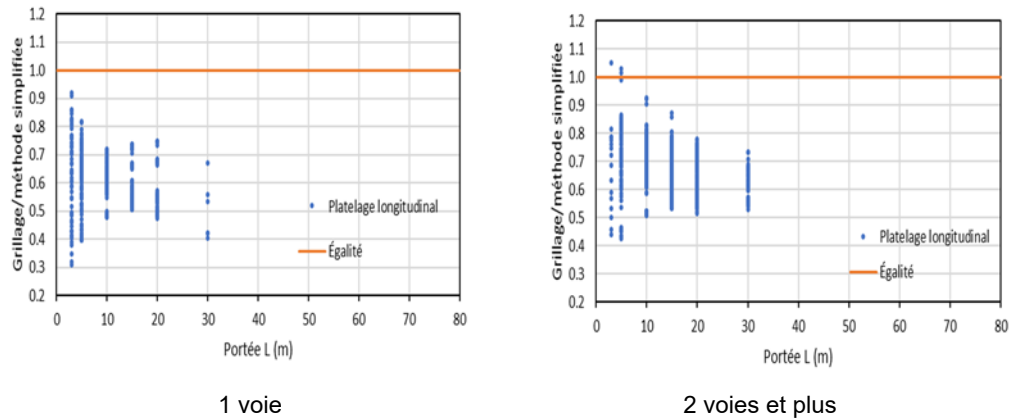


Figure 4.3 Effet de la portée du pont sur le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Pour les ponts à une voie, la méthode simplifiée donne des résultats sécuritaires pour toutes les portées du pont variant de 3 à 30 m. Pour les ponts à deux voies et plus la même conclusion peut être déduite sauf pour quelques cas où le rapport dépasse la valeur 1. Ces cas non sécuritaires correspondent à des ponts de petites portées où la largeur est petite et le nombre de poutres est égal à 8 et où le cas critique des charges correspond à 2 camions espacés transversalement de 1.2m et dont les roues de l'un des camions circulent sur une position très proche d'une poutre intérieure.

Les tableau 4.4 et tableau 4.5 permettent de bien voir la différence entre les moyennes et les coefficients de variation pour les différentes portées pour les ponts à une voie et les ponts à deux voies et plus. Pour chaque cas, deux tableaux ont été construits indiquant les valeurs obtenues pour les deux configurations de platelage.

Tableau 4.4 Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 1 voie

L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.638	0.169	0.266	2.134	0.639	0.175	0.274	2.065
5	0.641	0.100	0.156	3.588	0.643	0.098	0.153	3.628
10	0.611	0.049	0.081	7.886	0.609	0.048	0.079	8.145
15	0.587	0.056	0.095	7.400	0.585	0.059	0.100	7.083
20	0.573	0.077	0.134	5.585	0.571	0.080	0.140	5.360
30	0.502	0.096	0.191	5.196	0.499	0.100	0.201	5.012

**Tableau 4.5 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 2 voies et plus**

L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.689	0.163	0.237	1.908	0.684	0.164	0.239	1.927
5	0.723	0.116	0.161	2.385	0.725	0.115	0.158	2.393
10	0.700	0.087	0.124	3.463	0.698	0.085	0.122	3.548
15	0.689	0.076	0.110	4.112	0.686	0.073	0.107	4.290
20	0.669	0.064	0.096	5.138	0.664	0.062	0.093	5.408
30	0.628	0.050	0.080	7.447	0.622	0.049	0.078	7.767

Pour tous les nombres de voies, et en comparant les valeurs des moyennes, les résultats deviennent plus sécuritaires en augmentant la portée. En revanche, il est possible de remarquer que le coefficient de variation est le plus faible pour les portées moyennes de 10 à 15 m pour les ponts à une voie et pour les grandes portées de 20 à 30 m pour les ponts de deux voies et plus.

4.4.2.3 Influence de l'espacement entre les poutres

L'espacement des poutres joue un rôle important dans la distribution des efforts. C'est un paramètre qui est lié directement au calcul du facteur d'essieu. La figure 4.4 représente l'effet de l'espacement des poutres sur les rapports des moments entre les deux méthodes.

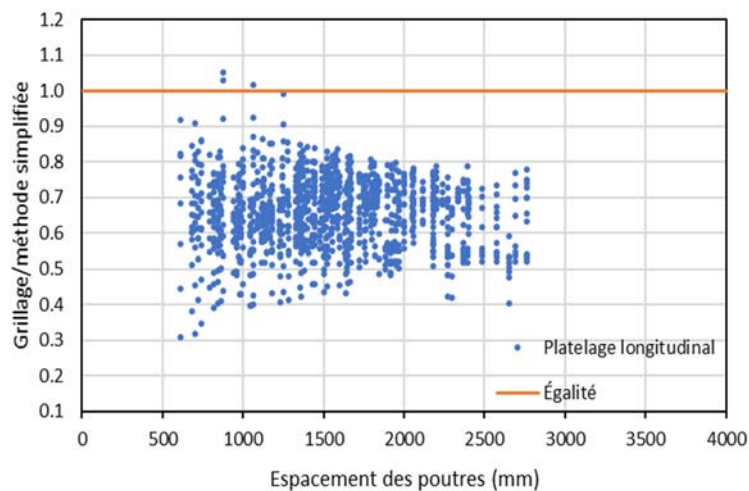


Figure 4.4 Effet de l'espacement entre les poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

La figure 4.4 montre toujours que la méthode simplifiée est une méthode sécuritaire. Pour des espacements relativement petits ($0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.25 \text{ m}$), il y a une grande dispersion des résultats. La méthode simplifiée pourra être

améliorée pour cette gamme d'espacements afin de réduire cette dispersion et avoir un fuseau de points plus étroit recouvrant tous les espacements possibles des poutres d'un pont.

Le tableau 4.6 montre les résultats des paramètres statistiques pour tous les intervalles des espacements couverts par l'analyse paramétrique dans le cadre de ce projet de recherche.

Tableau 4.6 Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.657	0.124	0.188	2.772
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.664	0.098	0.148	3.422
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.677	0.086	0.127	3.745
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.656	0.079	0.121	4.335
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.606	0.094	0.154	4.206

Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.658	0.125	0.191	2.728
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.663	0.097	0.147	3.466
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.674	0.085	0.126	3.834
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.652	0.079	0.121	4.423
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.603	0.092	0.152	4.329

Comme prévu à la section 4.4.1, les résultats pour les ponts présentant l'espacement des poutres le plus grand seront les plus sécuritaires comme montré pour l'intervalle d'espacement $2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$ pour lequel la moyenne est la plus faible. Une autre faible valeur de la moyenne est celle correspondant à l'intervalle $0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces espacements correspondent dans la plupart des cas aux ponts à une voie.

4.4.2.4 Influence de la longueur du porte-à-faux

L'influence de la longueur du porte-à-faux sur les résultats des efforts dans la poutre extérieure a été introduite dans la méthode simplifiée par le biais du coefficient γ_c . Ce coefficient peut être inférieur à 1 pour les longueurs des porte-à-faux supérieures à la moitié de l'espacement des poutres. Cependant la norme ne tient pas compte encore des porte-à-faux courts. Ainsi pour les porte-à-faux qui sont inférieurs à $0.5S$ la norme considère que le coefficient γ_c est le même que pour des porte-à-faux de $0.5S$ et est égal à 1.

La figure 4.5 donne les résultats obtenus du moment fléchissant pour une poutre extérieure pour les 3 longueurs du porte-à-faux : $0.3S$, $0.5S$ et $0.6S$ par la

méthode simplifiée en fonction du moment fléchissant obtenu par les analyses de grillage.

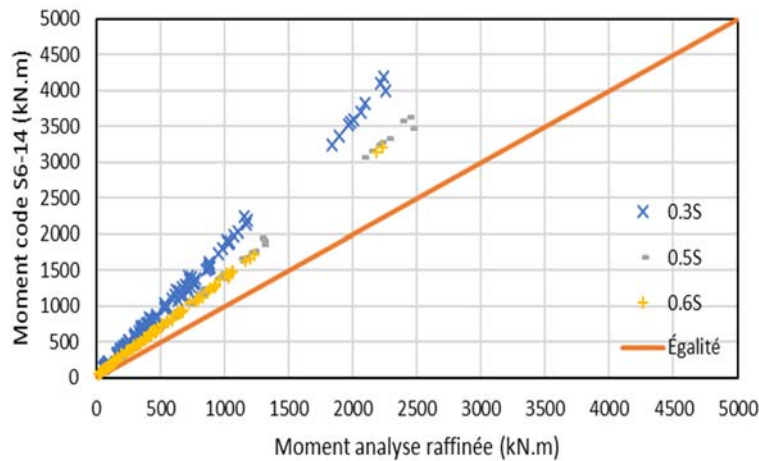


Figure 4.5 Effet de la longueur du porte-à-faux sur le moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Poutre extérieure

Comme déjà prévu, les résultats sont trop sécuritaires pour les longueurs des porte-à-faux égales à 0.3S. L'écart entre les résultats pour les longueurs de 0.5S et 0.6S est petit grâce au coefficient γ_c qui tient compte de l'influence de la longueur du porte-à-faux sur le moment de la poutre extérieure pour des longueurs jusqu'à 0.6S.

Le tableau 4.7 donne les valeurs des paramètres statistiques calculées pour les différentes longueurs du porte-à-faux.

Tableau 4.7 Effet de la longueur du porte-à-faux sur les paramètres statistiques du moment fléchissant pour la poutre extérieure à l'ÉLUL/ÉLUT-1

S_c	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
0.3S	0.524	0.045	0.086	10.594	0.529	0.044	0.083	10.744
0.5S	0.630	0.088	0.140	4.193	0.633	0.088	0.139	4.176
0.6S	0.654	0.086	0.131	4.039	0.657	0.085	0.130	4.030

La moyenne des valeurs augmente avec la longueur du porte-à-faux et donc les valeurs les plus sécuritaires correspondent à la longueur 0.3S.

4.4.3 Analyse des valeurs maximales

Dans la phase de conception, un dimensionnement uniforme est adopté en général pour toutes les poutres. C'est pour cette raison qu'il est utile de considérer les valeurs des moments maximaux pour la conception. Une étude a été donc faite en ne considérant que les valeurs maximales des moments fléchissant dans les poutres extérieures et intérieures. La figure 4.6 oppose le moment fléchissant maximal obtenu par la méthode simplifiée avec celui obtenu par la méthode de grillage.

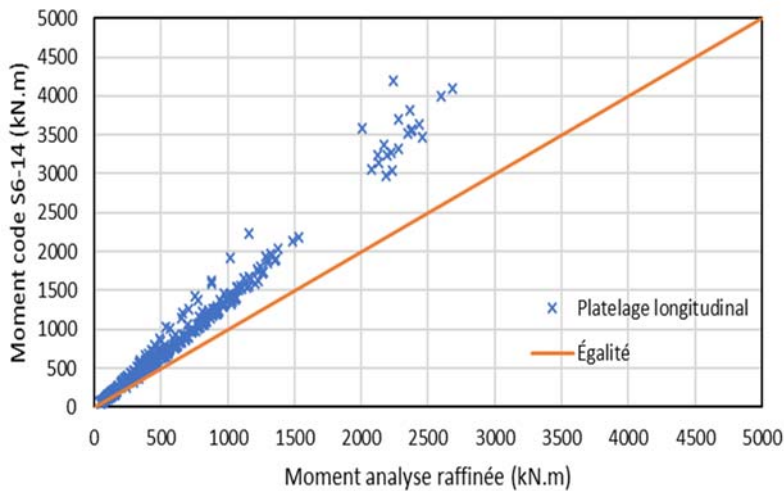


Figure 4.6 Comparaison du moment fléchissant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1

La même tendance est observée au niveau des résultats qu'à la section 4.4.1 où les résultats sont tous sécuritaires et celles qui le sont plus se trouvent au niveau des grandes portées. Les paramètres statistiques du ratio lié au moment fléchissant maximal sont donnés au tableau 4.8.

Tableau 4.8 Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.724	0.078	0.107	3.542
Transversal	max	0.722	0.079	0.109	3.523

La moyenne des valeurs est plus grande que celle pour chacune des moyennes calculées pour une poutre extérieure et intérieure au tableau 4.2 mais avec un coefficient de variation plus faible.

**Tableau 4.9 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Moment
 fléchissant**

Configuration du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernants	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Extérieure	90	398	23%
	Intérieure	308		77%
Transversal	Extérieure	95	398	24%
	Intérieure	303		76%

D'après ces résultats, c'est le moment fléchissant dans la poutre intérieure qui gouverne dans la plupart des cas.

4.5 Effort tranchant – ÉLUL/ÉLUT-1

Une comparaison entre la méthode simplifiée de la norme S6-14 avec la méthode du grillage pour l'effort tranchant à l'ÉLUL et à l'ÉLUT-1 sera étudiée pour la suite.

4.5.1 Analyse des résultats

Les résultats présentés à la figure 4.7 donnent l'ensemble des valeurs d'effort tranchant pour une poutre extérieure et intérieure par la méthode de grillage et comparés à ceux obtenus par la méthode simplifiée pour le platelage longitudinal uniquement.

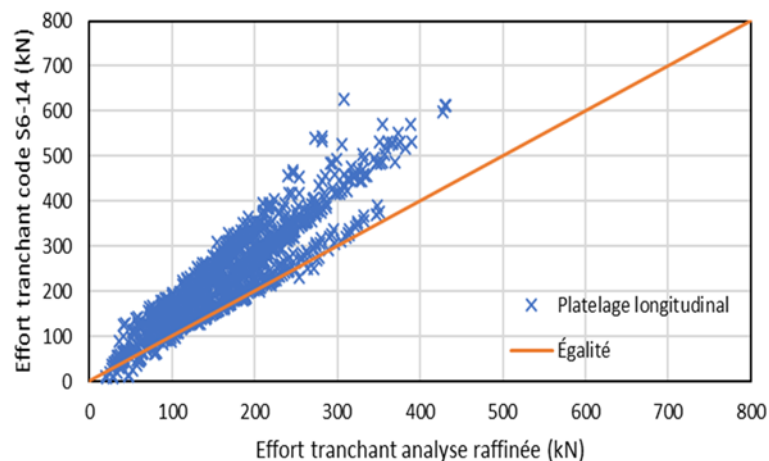


Figure 4.7 Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Les résultats obtenus pour le platelage transversal n'ont pas été présentés sur les graphiques puisque les résultats pour les 2 configurations de platelage sont très similaires comme le montre l'étude statistique détaillée dans les paragraphes suivants. En analysant les graphes à la figure 4.7, il est évident que la méthode simplifiée donne des résultats sécuritaires en général. Cependant, des résultats non sécuritaires ont été notés surtout au niveau des faibles valeurs de l'effort tranchant pour une poutre extérieure. En effet, la norme CSA S6-14 spécifie que pour un platelage en aluminium une répartition isostatique doit être considérée pour le calcul de l'effort tranchant dans une poutre extérieure.

Pour mieux visualiser les résultats, la figure 4.8 donne la comparaison de l'effort tranchant donné par la norme à celui obtenu par les modèles de grillage pour une poutre extérieure et intérieure séparément.

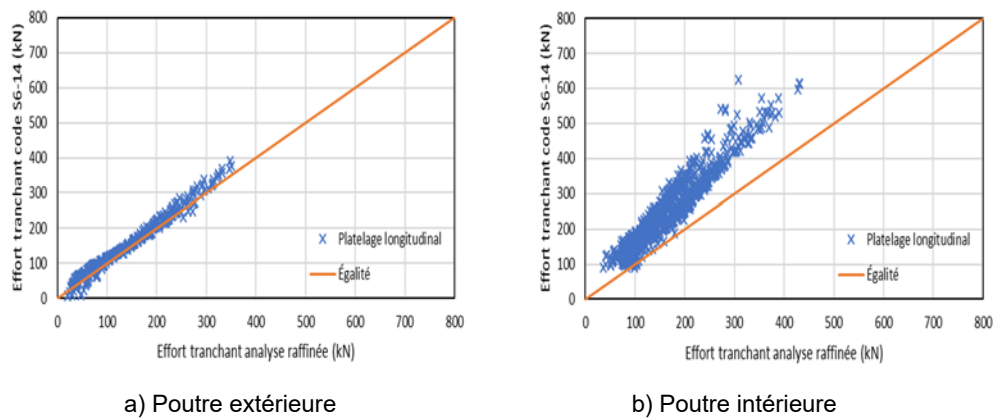


Figure 4.8 Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 pour une poutre extérieure et une poutre intérieure

Il est possible de remarquer que les résultats non sécuritaires proviennent de la poutre extérieure. La poutre intérieure présente des résultats sécuritaires et plus l'effort tranchant est grand plus les résultats de la méthode simplifiée s'éloignent de ceux de l'analyse raffinée.

Les résultats des paramètres statistiques calculés pour les poutres extérieures et intérieures pour les 2 configurations du platelage sont donnés au tableau 4.10.

**Tableau 4.10 Paramètres statistique pour l'effort tranchant à
 l'ÉLUL/ÉLUT-1**

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.966	0.333	0.345	0.104
	Intérieure	0.669	0.099	0.148	3.351
Transversal	Extérieure	0.967	0.335	0.347	0.099
	Intérieure	0.664	0.102	0.154	3.284

La moyenne obtenue pour l'effort tranchant pour la poutre extérieure est bien inférieure à 1. Ceci mène à la tendance à croire que les résultats sont sécuritaires pour une poutre extérieure. En revanche, la dispersion de ces résultats est grande à cause des ratios de l'ordre de 3 et de 4 obtenus pour les ponts dont l'espacement des poutres est relativement petit. La lacune que présente la considération de la répartition isostatique se manifeste au niveau de ces types de pont. Pour une poutre intérieure, les résultats sont sécuritaires avec une moyenne de l'ordre de 0.67 et une bonne dispersion des résultats de l'ordre de 0.1 pour l'écart-type.

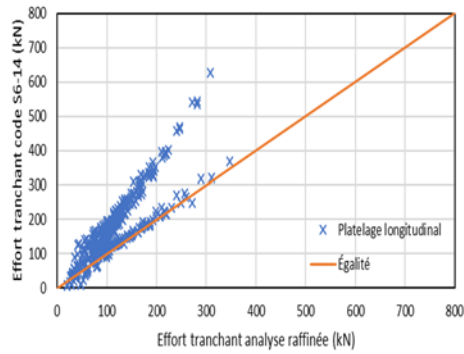
4.5.2 Influence des paramètres géométriques sur les résultats

L'objet de cette section est d'étudier l'effet des différents paramètres géométriques sur la différence qui existerait entre la méthode simplifiée et la méthode de grillage et sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLUL et l'ÉLUT-1. Les paramètres géométriques tels que déjà définis sont : le nombre de voies sur le pont n , la portée du pont L , la longueur du porte-à-faux S_c , l'espacement entre les poutres S .

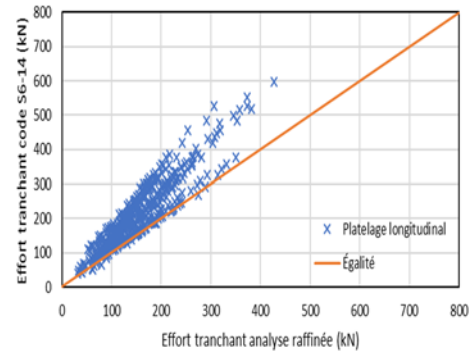
4.5.2.1 Influence du nombre de voies

La figure 4.9 donne les résultats de l'effort tranchant en comparant l'ensemble des valeurs de l'effort tranchant obtenus par la méthode simplifiée avec celles obtenues par les modèles de grillage et en variant le nombre de voies existant sur le pont.

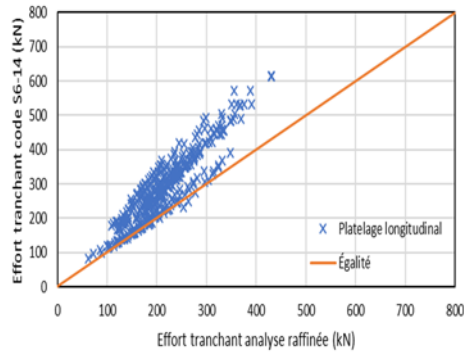
Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier



a) 1 voie



b) 2 voies



c) 3 voies

Figure 4.9 Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – variation du nombre de voies

Sur la figure 4.9, les points qui s'écartent de la ligne d'égalité sont ceux qui correspondent aux efforts tranchants de la poutre intérieure tandis que ceux sont trop proches de cette courbe correspondent aux efforts tranchant de la poutre extérieure.

Cela est confirmé par les résultats statistiques donnés pour la poutre extérieure et intérieure pour un nombre de voies allant de 1 à 3 et qui sont présentés dans le tableau 4.11.

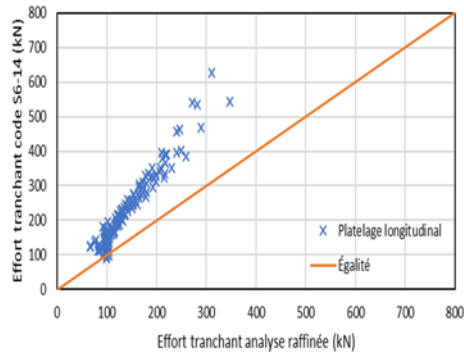
**Tableau 4.11 Paramètres statistiques de l'effort tranchant à
 l'ÉLUL/ÉLUT-1 - variation du nombre de voies**

	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
1 voie	Longitudinal	Extérieure	1.033	0.533	0.516	-0.062
		Intérieure	0.620	0.123	0.198	3.090
	Transversal	Extérieure	1.033	0.537	0.520	-0.061
		Intérieure	0.614	0.129	0.211	2.989
2 voies	Longitudinal	Extérieure	0.915	0.094	0.103	0.906
		Intérieure	0.680	0.086	0.126	3.728
	Transversal	Extérieure	0.917	0.099	0.107	0.840
		Intérieure	0.674	0.088	0.130	3.708
3 voies	Longitudinal	Extérieure	0.942	0.053	0.056	1.096
		Intérieure	0.704	0.060	0.086	4.907
	Transversal	Extérieure	0.945	0.053	0.057	1.035
		Intérieure	0.700	0.061	0.087	4.940

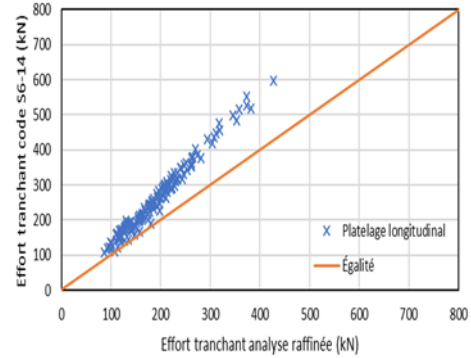
D'après le tableau 4.11, il est évident que les ponts à une voie sont ceux qui représentent la plus grande dispersion des résultats pour l'effort tranchant de la poutre extérieure. Cela est prévu car les ponts qui couvrent le plus grand nombre de tabliers à petit espacement entre les poutres sont les ponts à une voie. Une approche peut être considérée pour remédier à ce problème en prenant les efforts maximaux de conception dans la suite des résultats.

Dans ce qui suit, les valeurs maximales calculées par la méthode simplifiée et celles calculées par la méthode de grillage seront uniquement considérées. La figure 4.10 représente l'effort tranchant maximal calculé par la norme en fonction de celui calculé par la méthode de grillage en variant le nombre de voies.

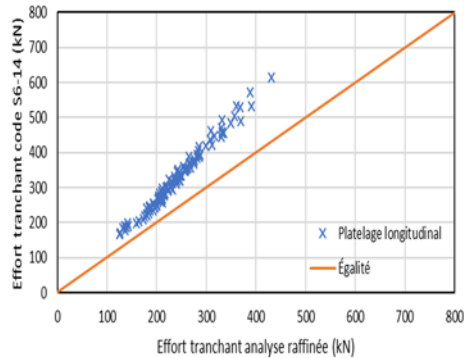
Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier



a) 1 voie



b) 2 voies



c) 3 voies

Figure 4.10 Effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – variation du nombre de voies

Les résultats pour les ponts à une voie semblent les plus sécuritaires sauf pour les ponts de petites portées et pour des espacements des poutres relativement petits.

Les résultats statistiques pour l'effort tranchant maximal sont donnés au tableau 4.12 pour le nombre de voies variant de 1 à 3.

Tableau 4.12 Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 - variation du nombre de voies

	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{vu}	σ_{vu}	V_{vu}	k_A
1 voie	Longitudinal	max	0.657	0.117	0.178	2.937
	Transversal	max	0.657	0.122	0.186	2.816
2 voies	Longitudinal	max	0.750	0.060	0.080	4.153
	Transversal	max	0.746	0.059	0.079	4.291
3 voies	Longitudinal	max	0.745	0.036	0.048	7.089
	Transversal	max	0.741	0.037	0.049	7.052

La moyenne la plus petite est celle qui correspond à un nombre de voies égal à 1 mais avec une plus grande dispersion des résultats.

4.5.2.2 Influence de la portée du pont

La figure 4.11 présente les résultats du ratio de l'effort tranchant maximal obtenu par la méthode simplifiée et celui obtenu par la méthode de grillage en fonction de la portée du pont.

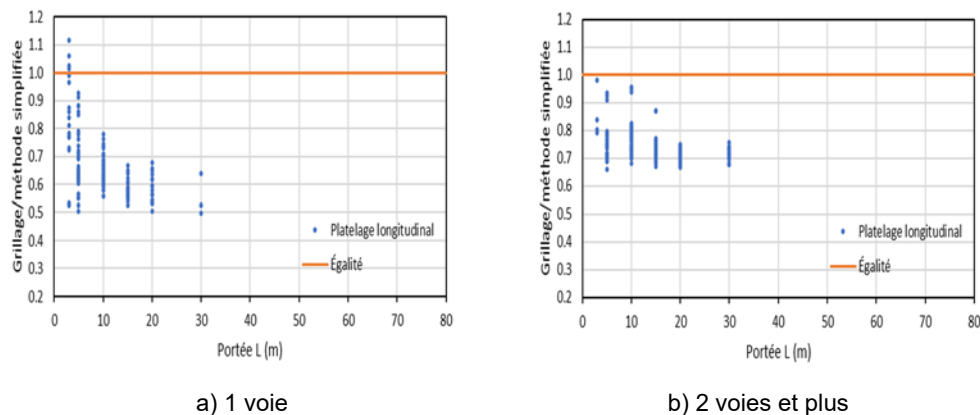


Figure 4.11 Effet de la portée du pont sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Pour les ponts à deux voies et plus, la méthode simplifiée donne des résultats sécuritaires pour toutes les portées du pont variant de 3 à 30 m. Pour les ponts à une voie, seules les portées de 3 m présentent des résultats non sécuritaires avec une plus grande dispersion des résultats. La figure 4.11 indique que plus la portée du pont augmente plus la dispersion des résultats diminue pour le nombre de voies variant de 1 à 3.

Les conclusions ci-dessus sont confirmées par l'étude statistique faite sur les ponts à une voie et à deux voies et plus en variant la longueur du pont de 3 à

30 m. les valeurs calculées sont détaillées dans le tableau 4.13 et le tableau 4.14.

**Tableau 4.13 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 1 voie**

<i>L</i> (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.846	0.165	0.194	0.936	0.847	0.176	0.207	0.872
5	0.683	0.109	0.159	2.917	0.685	0.117	0.170	2.697
10	0.647	0.051	0.079	6.903	0.644	0.055	0.085	6.477
15	0.581	0.031	0.054	13.44	0.580	0.033	0.057	12.69
20	0.585	0.049	0.084	8.438	0.583	0.052	0.089	7.998
30	0.554	0.062	0.111	7.239	0.553	0.062	0.112	7.195

**Tableau 4.14 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – 2 voies et plus**

<i>L</i> (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.843	0.063	0.074	2.506	0.853	0.076	0.089	1.948
5	0.746	0.064	0.086	3.974	0.748	0.063	0.085	3.975
10	0.780	0.049	0.062	4.535	0.782	0.050	0.064	4.342
15	0.736	0.033	0.045	8.059	0.740	0.034	0.046	7.638
20	0.711	0.021	0.030	13.51	0.716	0.023	0.032	12.51
30	0.709	0.024	0.034	12.21	0.715	0.023	0.032	12.27

Pour les ponts à une voie, les valeurs des moyennes pour toutes les portées sont plus petites que celles pour les ponts à deux voies et plus. Les résultats sont donc plus sécuritaires pour les ponts à une voie.

4.5.2.3 Influence de l'espacement entre les poutres

L'effet de l'espacement des poutres sur les résultats peut être visualisé à la figure 4.12 où est présenté le ratio méthode simplifiée et méthode de grillage en fonction de l'espacement des poutres. Cet effet est aussi présent dans le coefficient γ_c propre à l'effort tranchant qui est fonction de cet espacement. Le tableau 4.15 présente les résultats des statistiques en fonction de l'espacement des poutres.

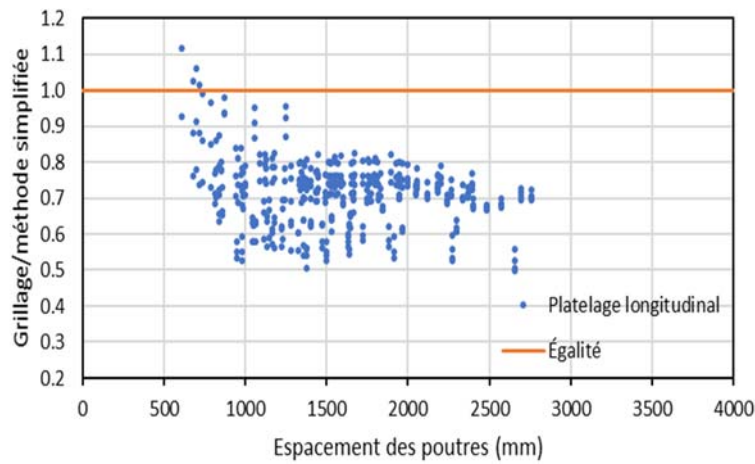


Figure 4.12 Effet de l'espacement entre les poutres sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Tableau 4.15 Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Espace des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.776	0.128	0.165	1.750
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.694	0.096	0.138	3.191
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.715	0.069	0.096	4.139
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.702	0.055	0.078	5.439
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.656	0.080	0.122	4.310

Espace des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.776	0.135	0.174	1.665
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.691	0.096	0.138	3.226
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.712	0.068	0.096	4.228
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.699	0.055	0.079	5.430
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.653	0.080	0.123	4.317

La plus grande valeur de la moyenne correspond à l'intervalle de petit espacement $0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$ avec la plus grande dispersion des valeurs bien que pour cette gamme d'espacement le facteur γ_c est inférieur à 1, ce qui a tendance à augmenter les facteurs d'essieux. La moyenne la plus grande est enregistrée pour l'intervalle $1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$ vu qu'à partir de 2 m, le coefficient γ_c reste constant et prend sa valeur maximale 1.

4.5.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour la flexion, les valeurs maximales de l'effort tranchant sont considérées ici pour l'ensemble des résultats. Cela permet de faire la comparaison avec l'ensemble des résultats obtenus en considérant la poutre extérieure et la poutre intérieure séparément. La figure 4.13 donne l'effort tranchant maximal obtenue par la méthode simplifiée avec celui obtenu par la méthode de grillage.

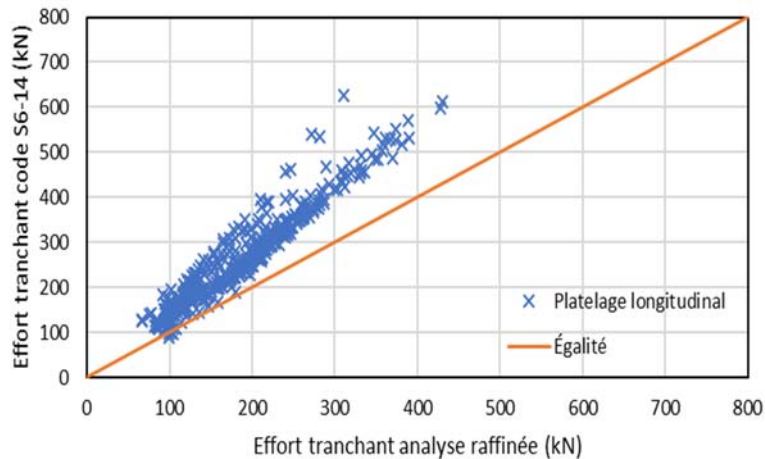


Figure 4.13 Comparaison de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1

D'après la figure ci-dessus, il est possible de remarquer que les points qui étaient proches de la courbe d'égalité et du point d'ordonné 0 ont disparu. En adoptant les valeurs extrêmes, ces cas critiques s'éliminent de l'étude, d'où le résultat. Cette observation mène à remarquer que dans la plupart des cas, c'est la poutre intérieure qui gouverne le dimensionnement à l'effort tranchant. Les paramètres statistiques du ratio lié à l'effort tranchant maximal sont donnés au tableau 4.16.

Tableau 4.16 Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.714	0.093	0.131	3.073
Transversal	max	0.711	0.095	0.133	3.047

La moyenne des valeurs est plus grande que celle pour une poutre intérieure donnée au tableau 4.10 mais avec un coefficient de variation plus faible. En

outre, la poutre intérieure gouverne le cisaillement comme le montre le tableau 4.17.

**Tableau 4.17 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Effort tranchant**

Configuration du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernants	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Extérieure	36	398	9%
	Intérieure	362		91%
Transversal	Extérieure	41	398	10%
	Intérieure	357		90%

4.6 Moment fléchissant – ÉLF/ÉLUT-2

Une comparaison entre la méthode simplifiée de la norme S6-14 avec la méthode du grillage pour le moment fléchissant à l'ÉLF et à l'ÉLUT-2 sera étudiée pour la suite.

4.6.1 Analyse des résultats

Le graphe donnant les résultats de la méthode simplifiée par rapport aux résultats obtenus par les modèles de grillage est représenté à la figure 4.14. Une droite d'égalité entre les deux méthodes est tracée pour situer les résultats de la méthode simplifiée par rapport à cette droite et savoir si cette méthode est sécuritaire ou non.

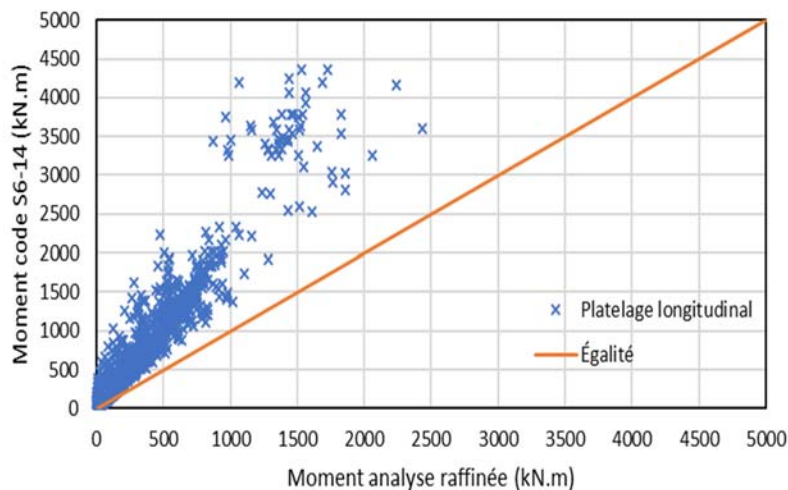


Figure 4.14 Comparaison du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2

Les résultats présentés à la figure 4.14 donnent l'ensemble des moments calculés pour une poutre extérieure et intérieure par la méthode de grillage et comparés à ceux obtenus par la méthode simplifiée pour le platelage longitudinal.

En analysant les graphes à la figure 4.14, il est évident que la méthode simplifiée donne des résultats sécuritaires aussi à l'ÉLF. Les résultats du moment fléchissant semblent plus sécuritaires à l'ÉLF que celles à l'ÉLUL. Ceci s'explique par le fait que les moments fléchissants obtenus par la méthode de grillage sont beaucoup plus faibles que celles issus de cette méthode à l'ÉLUL vu que le cas critique de chargement d'un camion à l'ÉLF est un seul camion situé au centre d'une voie. Les résultats sont donnés dans le tableau 4.18.

**Tableau 4.18 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant
 à l'ÉLF/ÉLUT-2**

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.376	0.199	0.530	3.128
	Intérieure	0.514	0.121	0.235	4.018
Transversal	Extérieure	0.383	0.199	0.519	3.108
	Intérieure	0.509	0.120	0.236	4.085

Les moyennes ont significativement diminué par rapport à celles à l'ÉLUL. Les résultats sont beaucoup plus sécuritaires dans ce cas. La grande dispersion des résultats vient des petits ratios obtenus pour les ponts étroits et à petite portées.

Dans ce qui suit, une étude de l'influence de quelques variables géométriques sur les paramètres statistiques à l'ÉLF a été détaillée pour savoir comment les paramètres géométriques affectent la distribution des efforts.

4.6.2 Influence des paramètres géométriques sur les résultats

L'objet de cette section est d'étudier l'effet des différents paramètres géométriques sur la différence qui existerait entre la méthode simplifiée et la méthode de grillage et sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF et l'ÉLUT-2.

4.6.2.1 Influence du nombre de voies

Comme déjà vu, le nombre des voies a une influence sur la distribution des efforts entre les poutres. Cependant, à l'ÉLF, la norme CSA S6-14 ne fait pas une distinction entre le nombre de voies existant sur un pont et indique que le coefficient D_T est égal à 2.4 pour tous les nombres de voies.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type
 platelage en aluminium sur poutres en acier

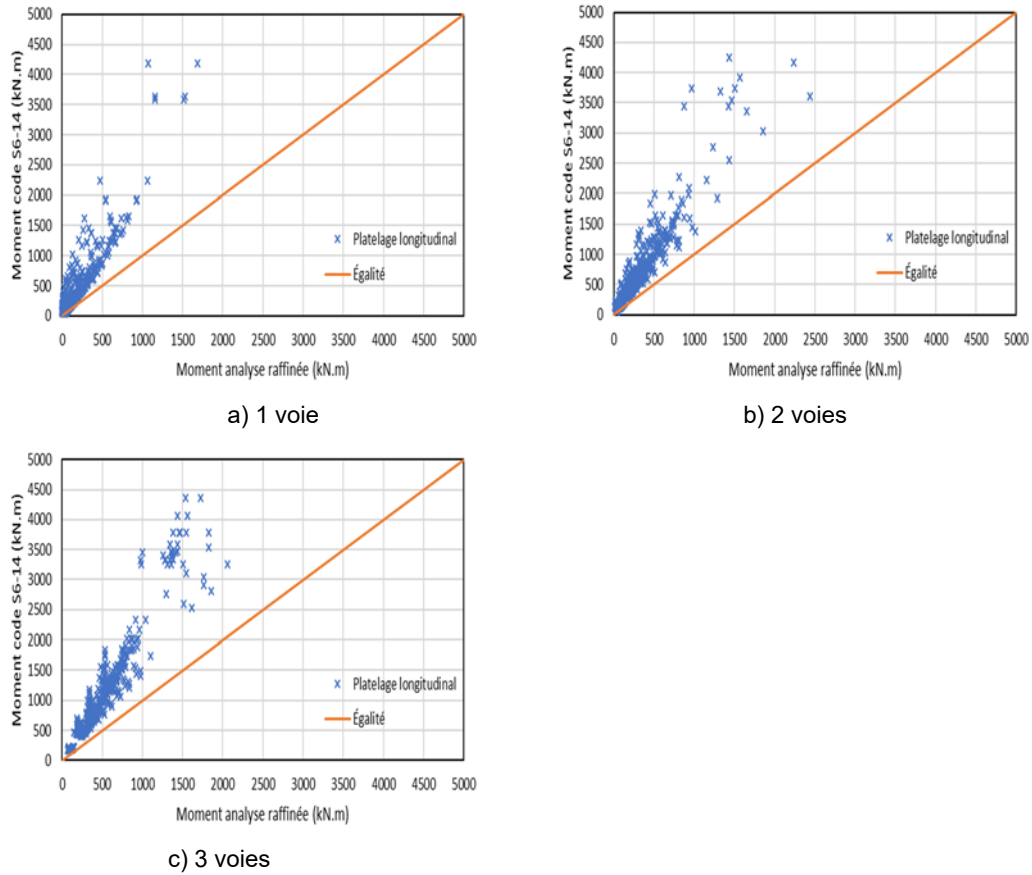


Figure 4.15 Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – variation du nombre de voies

D'après la figure ci-dessus, il est possible de remarquer que la méthode simplifiée est trop sécuritaire et pour tous les nombres de voies. Afin de déterminer lequel des cas est le plus sécuritaire, une étude statistique a été faite sur la poutre intérieure et extérieure pour chacun des nombres de voies. Les résultats sont alors présentés dans le tableau 4.19.

**Tableau 4.19 Paramètres statistiques du moment fléchissant à
 l'ÉLF/ÉLUT-2 - variation du nombre de voies**

	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
1 voie	Longitudinal	Extérieure	0.176	0.135	0.769	6.085
		Intérieure	0.547	0.133	0.243	3.397
	Transversal	Extérieure	0.183	0.136	0.744	6.009
		Intérieure	0.543	0.133	0.246	3.430
2 voies	Longitudinal	Extérieure	0.474	0.134	0.282	3.930
		Intérieure	0.504	0.130	0.259	3.803
	Transversal	Extérieure	0.482	0.132	0.274	3.926
		Intérieure	0.500	0.129	0.258	3.876
3 voies	Longitudinal	Extérieure	0.526	0.087	0.165	5.463
		Intérieure	0.493	0.085	0.172	5.983
	Transversal	Extérieure	0.531	0.085	0.160	5.528
		Intérieure	0.487	0.083	0.171	6.169

Contrairement à l'ÉLUL, la moyenne des valeurs pour une poutre intérieure diminue avec le nombre de voies tandis que cette moyenne augmente pour une poutre extérieure. La méthode simplifiée est alors la plus sécuritaire pour un pont à trois voies pour la poutre intérieure et pour un pont à une voie pour une extérieure.

Le coefficient de variation est très grand pour les ponts à une voie pour la poutre extérieure. La raison principale derrière cette dispersion est que les poutres extérieures pour les ponts étroits et avec un nombre de poutres élevé sont peu sollicitées sous l'effet de la charge critique du camion positionné au centre d'une voie à l'ÉLF.

4.6.2.2 Influence de la portée du pont

Pour le cas d'un platelage en aluminium de la norme CSA-S6-14, la portée n'a pas été prise en compte dans les calculs des coefficients D_T et λ . Cependant, la figure 4.16 indique qu'il y a une certaine corrélation entre la portée et la distribution des efforts puisque les points présentant le ratio entre la méthode simplifiée et la méthode de grillage varient d'une longueur à une autre.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

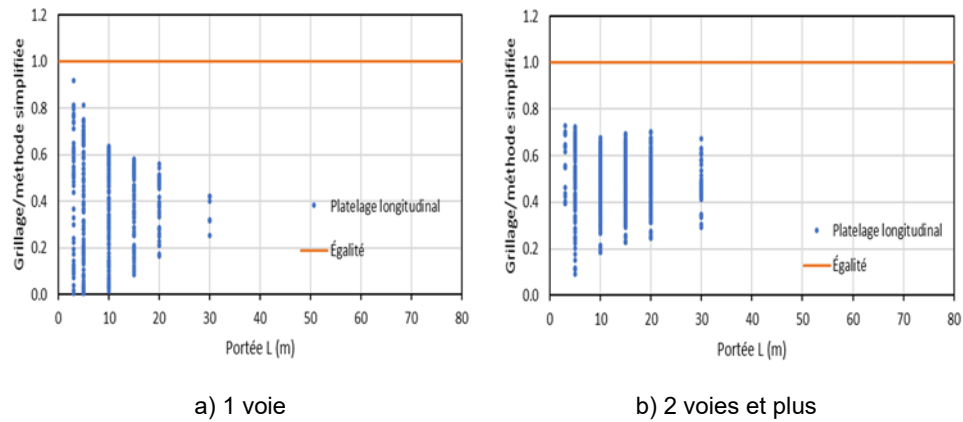


Figure 4.16 Effet de la portée du pont sur le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2

Pour les ponts à une voie, la méthode simplifiée donne des résultats plus dispersés surtout pour les ponts à petites portées. La méthode simplifiée est toujours sécuritaire quant aux calculs du moment fléchissant à l'ÉLF pour toutes les portées variant de 3 à 30 m et pour tous les nombres de voies.

Les tableau 4.20 et tableau 4.21 permettent de distinguer entre les ponts à une voie et les ponts à deux voies en variant la portée de 3 à 30 m en calculant les paramètres statistiques propres à chaque cas et pour les deux configurations de platelage.

Tableau 4.20 Effet de la portée sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 1 voie

	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
L (m)	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.404	0.284	0.703	2.100	0.402	0.283	0.705	2.113
5	0.432	0.268	0.619	2.121	0.433	0.265	0.612	2.137
10	0.419	0.202	0.481	2.882	0.418	0.194	0.465	2.993
15	0.406	0.153	0.376	3.889	0.405	0.145	0.357	4.117
20	0.402	0.114	0.283	5.529	0.400	0.107	0.267	5.601
30	0.357	0.063	0.176	10.25	0.355	0.058	0.163	11.29

**Tableau 4.21 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 2 voies et plus**

L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.561	0.120	0.213	3.665	0.557	0.121	0.217	3.669
5	0.531	0.169	0.318	2.775	0.532	0.166	0.312	2.815
10	0.501	0.113	0.226	4.409	0.499	0.110	0.220	4.569
15	0.492	0.092	0.187	5.528	0.489	0.091	0.186	5.623
20	0.481	0.088	0.184	5.874	0.478	0.089	0.187	5.850
30	0.476	0.080	0.167	6.579	0.473	0.081	0.172	6.469

D'après ces tableaux, il est possible de remarquer que les moyennes et les coefficients de variation diminuent avec la portée. La méthode simplifiée semble plus cohérente quant aux calculs du moment fléchissant dans les poutres des ponts à grandes portée mais elle surestime ces efforts puisque la moyenne la plus faible est celle qui correspond aux plus grandes longueurs des ponts.

4.6.2.3 Influence de l'espacement entre les poutres

La figure 4.17 représente l'effet de l'espacement des poutres sur les rapports.

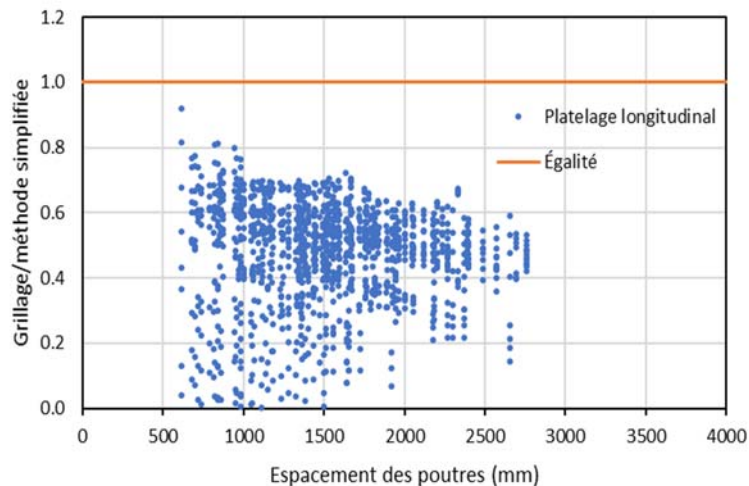


Figure 4.17 Effet de l'espacement entre les poutres sur le moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2

La figure 4.17 montre toujours que la méthode simplifiée est une méthode très sécuritaire. Pour des espacements relativement petits il y a une grande dispersion des résultats. Un grand nombre de ratios variant de 0.2 à 0.4 est enregistré pour cette gamme d'espacements. Ces ratios proviennent

essentiellement des moments surestimés dans les poutres extérieures par la méthode simplifiée. Le tableau 4.22 montre les résultats des paramètres statistiques pour tous les intervalles des espacements couverts par l'analyse paramétrique.

Tableau 4.22 Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2

Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.461	0.237	0.514	2.272
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.471	0.169	0.359	3.127
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.479	0.127	0.264	4.121
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.473	0.103	0.217	5.141
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.438	0.095	0.216	5.945

Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.461	0.235	0.509	2.299
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.470	0.166	0.352	3.195
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.477	0.124	0.259	4.229
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.470	0.101	0.215	5.248
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.435	0.092	0.210	6.165

Les résultats sont tous sécuritaires pour tous les intervalles d'espacement. Les cas les plus sécuritaires correspondent aux ponts présentant l'espacement des poutres le plus grand. Les moyennes pour les espacements variant de 0.6 à 1m sont inférieures à celle pour l'intervalle d'espacement $1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$ mais avec une plus grande dispersion des résultats.

4.6.3 Analyse des valeurs maximales

Une étude a été faite en ne considérant que les valeurs maximales entre le moment fléchissant dans la poutre extérieure et dans la poutre intérieure. La figure 4.18 oppose le moment fléchissant maximal obtenue par la méthode simplifiée avec celui obtenu par la méthode de grillage alors que le tableau 4.23 donne les nouveaux paramètres statistiques calculés.

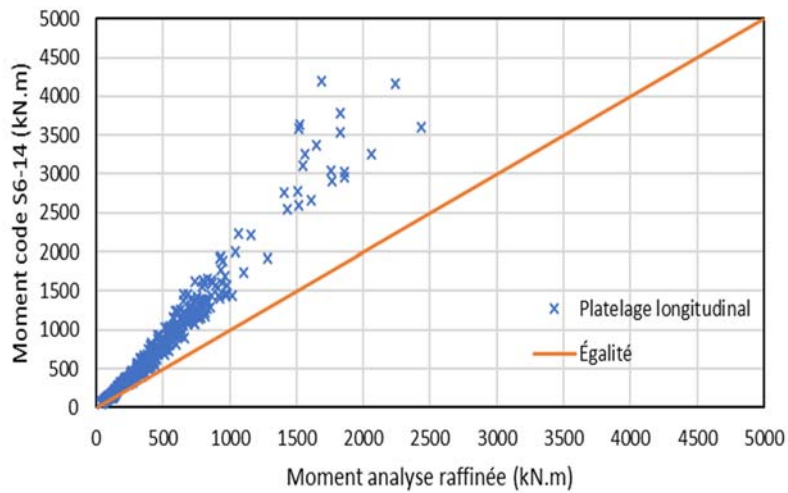


Figure 4.18 Comparaison du moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2

Tableau 4.23 Paramètres statistiques du moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.638	0.090	0.141	4.014
Transversal	max	0.633	0.091	0.144	4.031

La moyenne des valeurs est plus grande que celle pour chacune des moyennes calculées pour une poutre extérieure et intérieure et avec une dispersion des résultats plus réduite. Ce résultat est prévu puisque les cas où le moment fléchissant dans la poutre extérieure est faible sont gouvernés par le moment fléchissant de la poutre intérieure. Cette amélioration de la dispersion est visualisée à la figure 4.19 présentant le ratio des moments en fonction de l'espacement des poutres.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type
platelage en aluminium sur poutres en acier

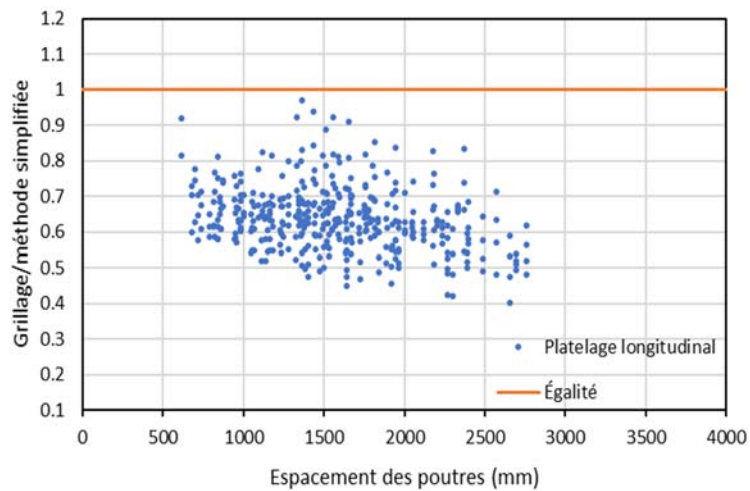


Figure 4.19 Effet de l'espacement entre les poutres sur le moment fléchissant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2

Similairement à l'ÉLUL, le nombre de cas où la poutre intérieure conditionne le dimensionnement pour le moment fléchissant est bien supérieur à celui où la poutre extérieure joue ce rôle, comme le montre le tableau 4.24.

Tableau 4.24 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Moment fléchissant

Configuration du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernants	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Extérieure	72	398	18%
	Intérieure	326		82%
Transversal	Extérieure	77	398	19%
	Intérieure	321		81%

D'après ces résultats, c'est le moment fléchissant dans la poutre intérieure qui gouverne aussi dans la plupart des cas à l'ÉLF.

4.7 Effort tranchant – ÉLF/ÉLUT-2

Une comparaison entre la méthode simplifiée de la norme S6-14 avec la méthode du grillage pour l'effort tranchant à l'ÉLF et à l'ÉLUT-2 sera étudiée pour la suite.

4.7.1 Analyse des résultats

Les résultats présentés à la figure 4.20 donnent l'ensemble des valeurs d'effort tranchant pour une poutre extérieure et intérieure par la méthode de grillage et comparés à ceux obtenus par la méthode simplifiée pour le platelage longitudinal seulement pour la même raison expliquée pour l'étude du moment fléchissant.

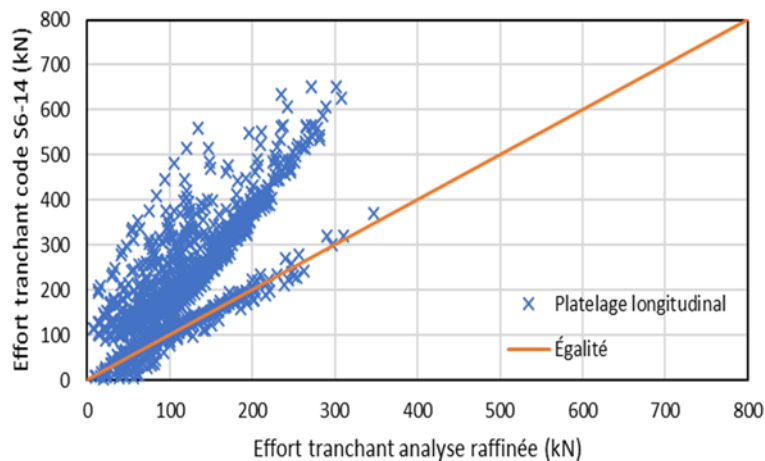


Figure 4.20 Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-1

Le graphe ci-dessus peut être divisé en deux parties. La première partie est celle qui correspond à la poutre intérieure et dont les résultats sont en général sécuritaires et les points s'éloignent de la courbe d'égalité avec l'augmentation de l'effort tranchant. La deuxième partie est celle qui correspond à la poutre extérieure et dont les résultats sont en général non sécuritaires à cause de la considération de la répartition isostatique. La figure 4.21 présente la comparaison de l'effort tranchant entre la méthode simplifiée et la méthode du grillage est donnée pour les poutres extérieures et intérieures séparément.

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

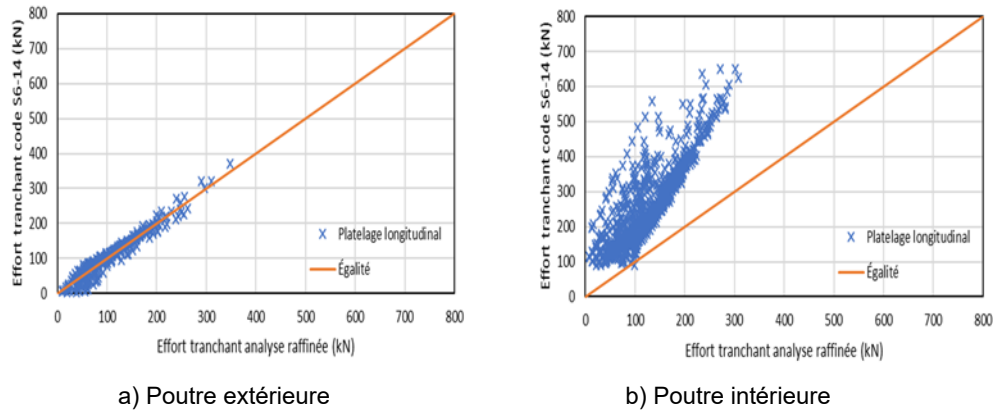


Figure 4.21 Comparaison de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 pour une poutre extérieure et une poutre intérieure

Il est possible de remarquer que les résultats non sécuritaires proviennent de la poutre extérieure. La poutre intérieure présente des résultats sécuritaires et plus l'effort tranchant est grand plus les résultats de la méthode simplifiée s'éloignent de ceux de l'analyse raffinée.

Les résultats des paramètres statistiques calculés pour les poutres extérieures et intérieures pour les deux configurations du platelage sont donnés au tableau 4.25. Les modèles où le camion n'a aucun effet sur la poutre de rive ont été exclus de cette analyse pour le calcul de l'effort tranchant dans la poutre extérieure.

Tableau 4.25 Paramètres statistique pour l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	1.225	0.968	0.790	-0.233
	Intérieure	0.485	0.134	0.276	3.852
Transversal	Extérieure	1.246	1.014	0.814	-0.243
	Intérieure	0.479	0.134	0.279	3.898

La moyenne obtenue pour l'effort tranchant pour la poutre extérieure est supérieure à celle obtenu pour l'ÉLUL. Ceci est prévu parce que la position critique du camion est au milieu d'une voie et que le nombre de cas où le camion a un effet négligeable sur la poutre de rive augmente. La dispersion des résultats augmente aussi à cause de l'existence des ponts avec un espacement des poutres moyen pour lequel en réalité la poutre de rive est sollicitée mais la

répartition isostatique donne une valeur faible de l'effort tranchant à cause de la position transversale du camion qui se trouve loin de cette poutre.

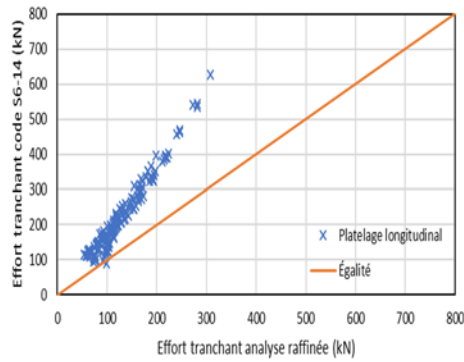
4.7.2 Influence des paramètres géométriques sur les résultats

L'objet de cette section est d'étudier l'effet des différents paramètres géométriques sur la différence qui existerait entre la méthode simplifiée et la méthode de grillage et sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLF et l'ÉLUT-2. Pour la suite, seules les valeurs maximales seront considérées dans l'analyse des résultats pour éviter la grande dispersion issue de l'effort tranchant calculé dans la poutre extérieure.

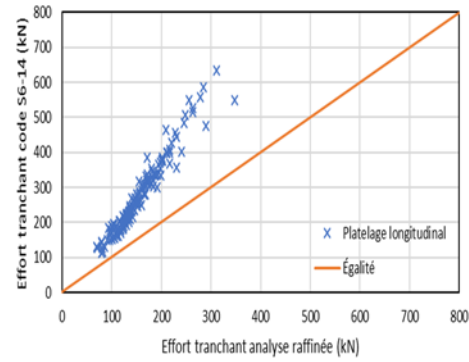
4.7.2.1 Influence du nombre de voies

La figure 4.22 donne les résultats de l'effort tranchant en comparant l'ensemble des valeurs de l'effort tranchant maximal obtenus par la méthode simplifiée avec celles obtenues par les modèles de grillage et en variant le nombre de voies existant sur le pont.

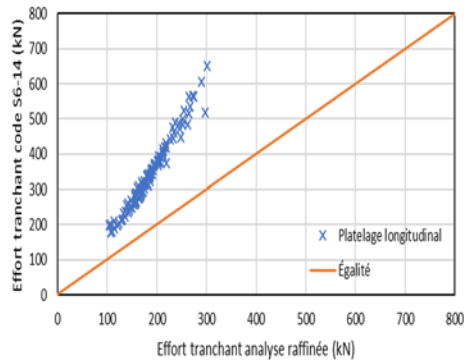
Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type
 platelage en aluminium sur poutres en acier



a) 1 voie



b) 2 voies



c) 3 voies

Figure 4.22 Effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 – variation du nombre de voies

Les résultats sont en général sécuritaires quel que soit le nombre de voies existant sur le pont. Plus le nombre de voies augmente, plus les résultats deviennent plus sécuritaires comme le confirme le tableau 4.26.

Tableau 4.26 Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 - variation du nombre de voies

	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{vu}	σ_{vu}	V_{vu}	k_A
1 voie	Longitudinal	max	0.601	0.096	0.159	4.176
	Transversal	max	0.594	0.100	0.169	4.046
2 voies	Longitudinal	max	0.579	0.056	0.096	7.533
	Transversal	max	0.575	0.057	0.099	7.476
3 voies	Longitudinal	max	0.549	0.036	0.066	12.469
	Transversal	max	0.545	0.037	0.068	12.318

La moyenne la plus petite est celle qui correspond à un nombre de voies égal à 3 mais avec une plus petite dispersion des résultats. Ce résultat confirme bien que les ponts à trois voies sont les plus sécuritaires.

4.7.2.2 Influence de la portée du pont

La figure 4.23 présente les résultats du ratio de l'effort tranchant maximal obtenu par la méthode simplifiée et celui obtenu par la méthode de grillage en fonction de la portée du pont.

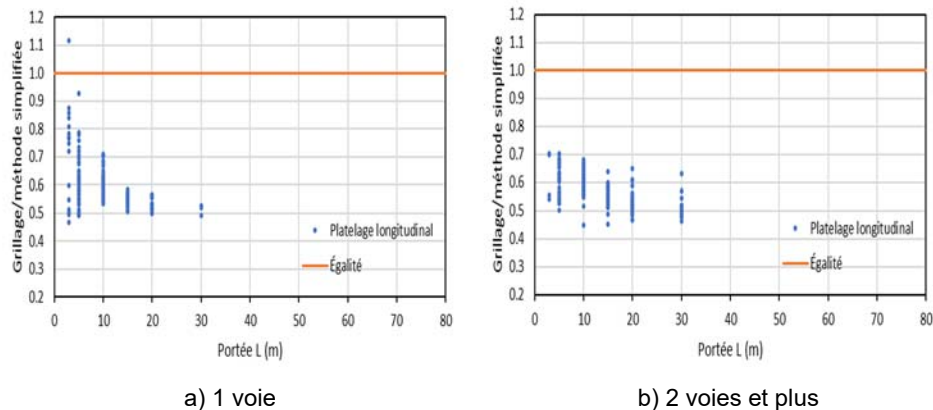


Figure 4.23 Effet de la portée du pont sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2

Pour les ponts à deux voies et plus, la méthode simplifiée donne des résultats conservateurs pour toutes les portées du pont variant de 3 à 30 m. Pour les ponts à une voie, seule la longueur de 3 m présente un seul cas non sécuritaire.

L'étude statistique faite sur les ponts à une voie et à deux voies et plus en variant la longueur du pont de 3 à 30 m est détaillée dans le tableau 4.27 et le tableau 4.28.

**Tableau 4.27 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 1 voie**

<i>L</i> (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.716	0.168	0.235	1.685	0.705	0.182	0.259	1.621
5	0.617	0.096	0.155	4.005	0.613	0.103	0.169	3.747
10	0.609	0.044	0.072	8.892	0.603	0.047	0.078	8.451
15	0.549	0.020	0.037	22.41	0.543	0.021	0.038	21.923
20	0.531	0.022	0.042	21.03	0.525	0.023	0.044	20.42
30	0.512	0.015	0.029	33.22	0.507	0.015	0.030	32.95

**Tableau 4.28 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2 – 2 voies et plus**

<i>L</i> (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.625	0.076	0.122	4.926	0.609	0.076	0.125	5.148
5	0.608	0.056	0.092	7.022	0.605	0.059	0.098	6.660
10	0.598	0.037	0.061	10.95	0.595	0.037	0.062	11.03
15	0.551	0.027	0.049	16.70	0.547	0.028	0.050	16.47
20	0.530	0.031	0.059	14.95	0.526	0.033	0.062	14.48
30	0.512	0.039	0.076	12.50	0.508	0.041	0.080	12.12

Pour les ponts à une voie, les valeurs des moyennes pour les faibles portées sont plus grandes que celles pour les ponts à deux voies et plus avec la plus grande dispersion des valeurs. D'après les tableaux ci-dessus, les résultats deviennent de plus en plus conservateurs avec la longueur du pont.

4.7.2.3 Influence de l'espacement entre les poutres

L'effet de l'espacement des poutres sur les résultats peut être visualisé à la figure 4.24. Le tableau 4.29 présente les résultats des statistiques en fonction de l'espacement des poutres.

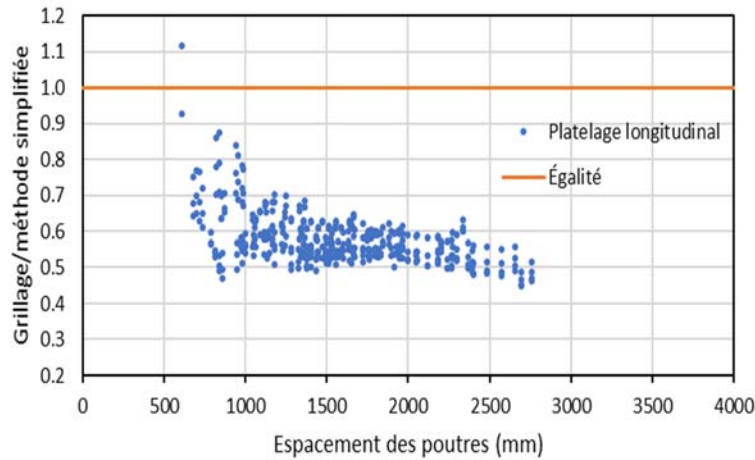


Figure 4.24 Effet de l'espacement entre les poutres sur l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2

Tableau 4.29 Effet de l'espacement entre les poutres sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2

Espace des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.657	0.121	0.184	2.837
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.583	0.051	0.087	8.182
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.566	0.034	0.060	12.77
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.539	0.036	0.066	12.93
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.494	0.032	0.064	16.03

Espace des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.649	0.130	0.200	2.705
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.579	0.053	0.092	7.906
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.562	0.036	0.063	12.34
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.535	0.037	0.069	12.60
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.491	0.031	0.063	16.42

La plus grande valeur de la moyenne correspond à l'intervalle de petit espacement $0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$ avec la plus grande dispersion des valeurs bien que pour cette gamme d'espacement le facteur γ_c est inférieur à 1, ce qui a tendance à augmenter les facteurs d'essieux. Ceci est dû effectivement aux cas critiques où la position du camion vient maximiser l'effort tranchant dans la poutre intérieure.

4.7.3 Analyse des valeurs maximales

Comme pour la flexion, les valeurs maximales de l'effort tranchant sont considérées ici pour l'ensemble des résultats. La figure 4.25 donne l'effort tranchant maximal obtenue par la méthode simplifiée avec celui obtenu par la méthode de grillage.

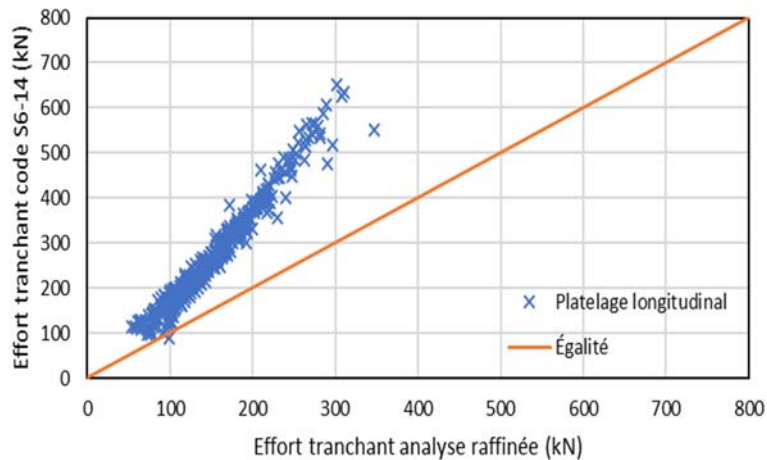


Figure 4.25 Comparaison de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLUT-2

D'après la figure ci-dessus, les mêmes conclusions sont déduites que celles à l'ÉLUL. Il est possible de remarquer que les points qui étaient proches de la courbe d'égalité et du point d'ordonné 0 ont disparu. La tendance de la courbe pour les valeurs maximales est similaire à celle de la poutre intérieure. Les paramètres statistiques du ratio lié à l'effort tranchant maximal sont donnés au tableau 4.30.

Tableau 4.30 Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLUL/ÉLUT-1

Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.579	0.073	0.126	5.772
Transversal	max	0.574	0.075	0.131	5.652

La moyenne des valeurs est plus grande que celle pour une poutre intérieure donnée au tableau 4.25 mais avec un coefficient de variation plus faible. La position transversale du camion à l'ÉLF réduit davantage le nombre de cas où la poutre extérieure gouvernerait comme le montre le tableau 4.31.

**Tableau 4.31 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Effort tranchant**

Configuration du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernants	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Extérieure	30	398	8%
	Intérieure	368		92%
Transversal	Extérieure	30	398	8%
	Intérieure	368		92%

5 AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

5.1 Approche utilisée pour l'amélioration des équations

L'étude statistique faite au chapitre 4 permet de faire les constants suivants :

1. la méthode simplifiée est trop sécuritaire à l'ÉLUL pour le moment fléchissant et l'effort tranchant;
2. la méthode simplifiée est davantage sécuritaire à l'ÉLF pour le moment fléchissant et l'effort tranchant;
3. la répartition isostatique donne des résultats non sécuritaires au niveau du calcul de l'effort tranchant pour une poutre extérieure;
4. dans la plupart des cas, c'est la poutre intérieure qui conditionne le dimensionnement à l'ÉLUL et l'ÉLF et pour les 2 types d'efforts.

Pour améliorer les résultats, des propositions d'équations seront faites dans ce chapitre en utilisant les équations de la méthode simplifiée propres aux tabliers avec dalle en béton sur poutres en acier. L'approche utilisée ici est d'utiliser la formule propre aux calculs du facteur D_T pour une poutre intérieure d'un tablier avec une dalle en béton en utilisant un facteur de réduction convenable et de considérer cette même équation pour une poutre extérieure.

La méthodologie ici consiste à injecter les équations de D_T propres à la dalle en béton et de voir quels sont les nouveaux paramètres statistiques calculés. Suivant les résultats, le facteur de réduction sera estimé et une équation pour le calcul du facteur D_T sera proposée.

5.2 Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

La valeur visée ici pour le paramètre k_A est 1.65 (voir équation 3.4), une valeur qui correspond au quantile 5% pour une distribution statique suivant la loi normale. Cette valeur de 5% est la plus fréquemment utilisée en structures, notamment pour la fatigue. Pour le moment fléchissant, l'équation correspondant au calcul de D_T pour une poutre intérieure pour un nombre de voies égal à 2 et plus est utilisée. Cette équation donne en général la valeur de D_T la plus faible des facteurs d'essieu :

$$D_T = 4.60 - 5.2 / \sqrt{L_e + 5} \geq 2.80 \quad (5.1)$$

L'expression pour λ des tabliers avec dalle de béton est retenue, soit $\lambda = 0.1 - 0.25/L_e$. Le paramètre γ_c est pris égal à 1 puisque c'est la poutre intérieure qui gouverne.

En comparant les nouveaux moments obtenus par la méthode simplifiée avec les moments obtenus par la méthode de grillage pour un platelage en aluminium, il est possible de remarquer qu'il y a des résultats non sécuritaires. Ce résultat est prévu puisqu'une dalle en béton a tendance de mieux distribuer

les efforts. En cherchant les nouveaux paramètres statistiques calculés $\delta_{M,1}$ et $\sigma_{M,1}$, pour une poutre intérieure, il est possible de réduire la moyenne (ou le biais) en visant une valeur de k_A égale à 1.65. En supposant que l'écart type et le biais changent proportionnellement, la nouvelle moyenne devient égale à :

$$\delta_{M,2} = 1 - 1.65 \times \sigma_{M,1} \quad (5.2)$$

Le facteur de réduction est ainsi égal à :

$$F_R = \frac{\delta_{M,2}}{\delta_{M,1}} \quad (5.3)$$

Le tableau 5.1 donne les résultats des paramètres statistiques obtenus avec les nouvelles valeurs de D_T avant et après correction.

**Tableau 5.1 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Nouvelles valeurs de D_T**

Avant correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.905	0.184	0.204	0.517
	Intérieure	0.996	0.104	0.105	0.038
Transversal	Extérieure	0.910	0.184	0.202	0.492
	Intérieure	0.990	0.106	0.107	0.098
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.711	0.139	0.195	2.085
	Intérieure	0.790	0.077	0.097	2.737
Transversal	Extérieure	0.715	0.137	0.192	2.077
	Intérieure	0.785	0.078	0.099	2.761

Le facteur de réduction est égal à :

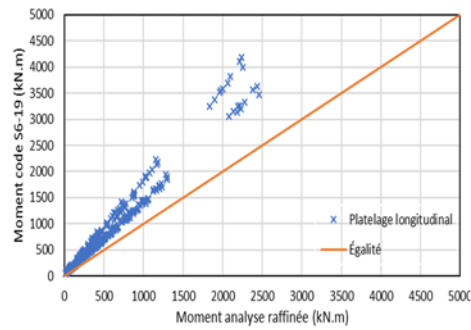
$$F_R = \frac{0.828}{0.996} = 0.83.$$

La nouvelle équation de D_T devient :

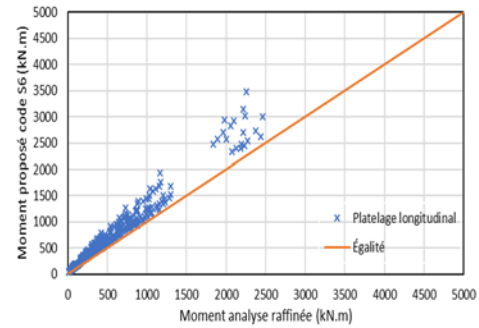
$$D_T = 3.8 - 4.4 / \sqrt{L_e + 5} \geq 2.55 \quad (5.4)$$

Les figures suivantes présentent les graphes obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_T utilisées initialement au chapitre 4 et après la correction de ce facteur selon la nouvelle équation. La figure 5.1 donne les

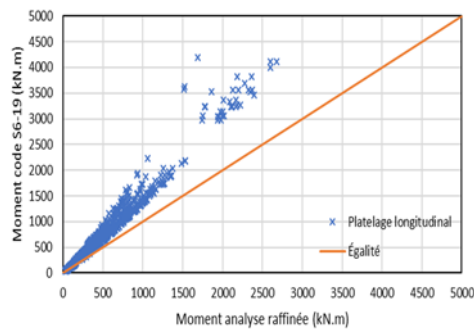
résultats pour une poutre intérieure et extérieure et la figure 5.2 donne les
 résultats pour l'ensemble des poutres ainsi que les valeurs maximales obtenues.



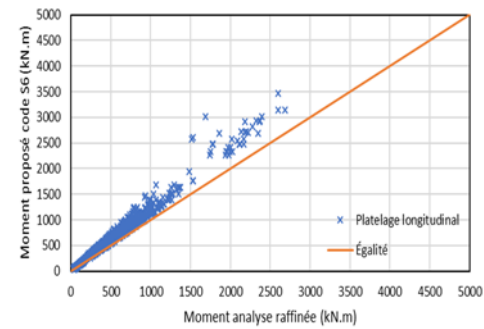
a) Poutre extérieure avant correction



b) Poutre extérieure après correction



c) Poutre intérieure avant correction



d) Poutre intérieure après correction

Figure 5.1 Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Poutre extérieure et intérieure

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

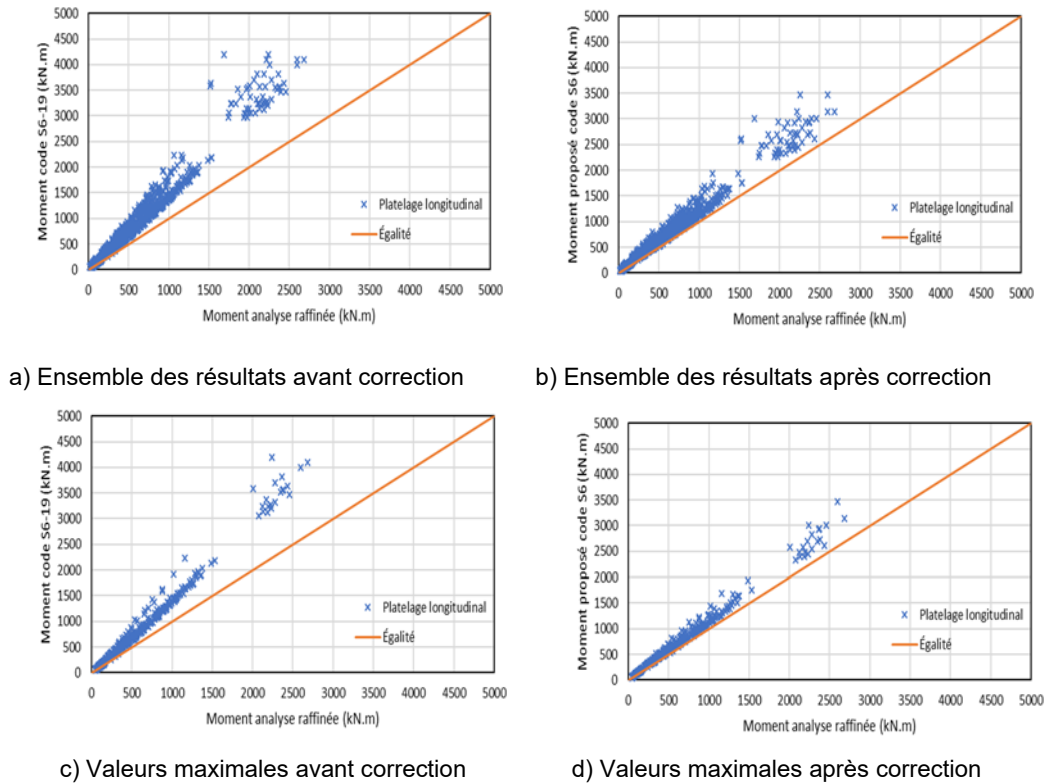


Figure 5.2 Moment fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Ensemble des résultats et valeurs maximales

Après la correction de l'équation de D_7 , le nuage des points s'approche de la courbe d'égalité tout en restant du côté sécuritaire. La dispersion des résultats s'est améliorée pour une poutre intérieure et pour les valeurs maximales mais pas pour une poutre extérieure puisque l'équation de base était celle d'une poutre intérieure et il existe des cas où c'est la poutre extérieure qui gouverne. L'important est l'amélioration de la dispersion des résultats maximaux puisque ce sont ces valeurs qui conditionnent le dimensionnement. Les tableaux suivants donnent les paramètres statistiques obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_7 propres à l'aluminium.

**Tableau 5.2 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 –Poutre extérieure et intérieure**

Avant correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.602	0.094	0.156	4.225
	Intérieure	0.693	0.086	0.125	3.557
Transversal	Extérieure	0.606	0.093	0.154	4.232
	Intérieure	0.688	0.089	0.129	3.514
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.711	0.139	0.195	2.085
	Intérieure	0.790	0.077	0.097	2.737
Transversal	Extérieure	0.715	0.137	0.192	2.077
	Intérieure	0.785	0.078	0.099	2.761

**Tableau 5.3 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Valeurs maximales**

Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.724	0.078	0.107	3.542
Transversal	max	0.722	0.079	0.109	3.523
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.847	0.069	0.081	2.231
Transversal	max	0.844	0.069	0.082	2.253

La moyenne est plus proche de 1 que pour le cas avant la correction du facteur D_T avec une valeur de k_A toujours supérieure à 1.65 et donc avec des résultats qui sont toujours du côté sécuritaire. La dispersion des résultats est améliorée par le fait que le nouveau facteur D_T tient compte de la portée et ainsi pour le coefficient λ .

5.3 Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1

La norme S6 spécifie une valeur de D_T constante que ça soit pour une dalle en béton ou un platelage en aluminium. D'après les résultats du chapitre 4, la considération d'une répartition isostatique donnait des résultats non conservateurs. Pour l'effort tranchant, l'équation correspondant au calcul de D_T pour une poutre intérieure et pour une dalle en béton a été utilisée pour la poutre

de rive et la poutre intérieure. La valeur de λ est ici toujours égale à 0. Les autres paramètres nécessaires pour le calcul du facteur d'essieu sont inchangés. En comparant les nouvelles valeurs obtenues par la méthode simplifiée avec les celles obtenues par la méthode de grillage pour un platelage en aluminium, il est possible de remarquer qu'il y a des résultats non conservateurs. Des équations de D_T en fonction de la portée L_e seront considérées pour le cas de l'effort tranchant pour tenir compte de l'efficacité que présenterait le pont de plus grande portée dans la distribution des efforts entre les poutres.

La nouvelle équation de D_T est ainsi :

$$D_T = 3.9 - 3.6 / \sqrt{L_e} \leq 3.1 \quad (5.5)$$

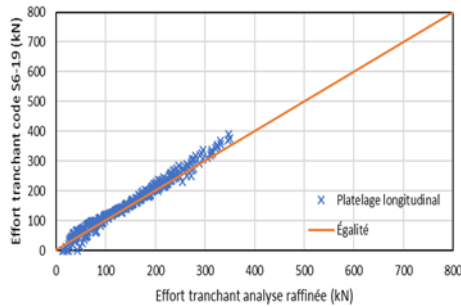
Le principal problème de la méthode simplifiée est qu'elle donnait des résultats non conservateurs pour les petites portées. Avec l'introduction de cette nouvelle équation, ce problème est réglé comme on peut le voir d'après le tableau 5.4.

**Tableau 5.4 Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à
 l'ÉLUL/ÉLUT-1 – variation de la portée**

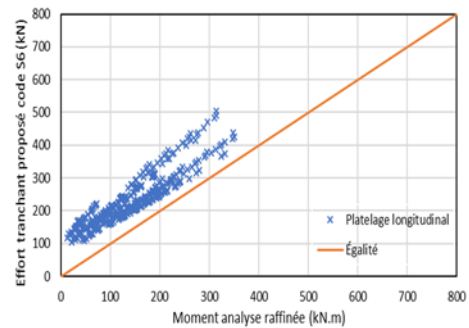
L (m)	Avant correction							
	1 voie				2 voies et plus			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.846	0.165	0.194	0.936	0.853	0.076	0.089	1.948
5	0.683	0.109	0.159	2.917	0.748	0.063	0.085	3.975
10	0.647	0.051	0.079	6.903	0.782	0.050	0.064	4.342
15	0.581	0.031	0.054	13.438	0.740	0.034	0.046	7.638
20	0.585	0.049	0.084	8.438	0.716	0.023	0.032	12.514
30	0.554	0.062	0.111	7.239	0.715	0.023	0.032	12.269
L (m)	Après correction							
	1 voie				2 voies et plus			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.642	0.125	0.194	2.866	0.609	0.054	0.089	7.231
5	0.652	0.104	0.159	3.358	0.671	0.057	0.085	5.764
10	0.744	0.059	0.079	4.346	0.847	0.054	0.064	2.818
15	0.720	0.039	0.054	7.273	0.862	0.040	0.046	3.480
20	0.754	0.063	0.084	3.875	0.870	0.028	0.032	4.743
30	0.716	0.080	0.111	3.573	0.869	0.028	0.032	4.630

Après correction, les moyennes pour les petites portées ont diminué et la valeur de k_A a augmenté pour être supérieure à 1.65 pour la portée de 3 m. les résultats sont maintenant plus sécuritaires pour les petites portées. Pour les autres portées, la moyenne a augmenté. Les résultats ne sont plus trop conservateurs surtout pour les grandes portées où la valeur de k_A a significativement diminué. Cette nouvelle équation conduit à un surdimensionnement pour l'effort tranchant pour les grandes portées.

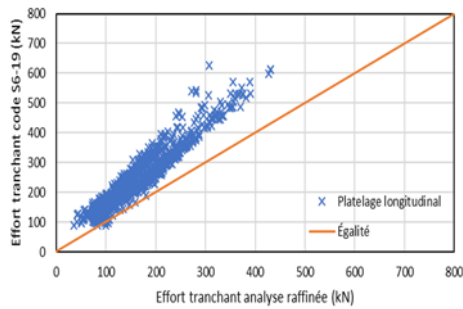
Comme pour le moment fléchissant, les figures suivantes présentent les graphes obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_7 utilisées initialement au chapitre 4 et après la correction de ce facteur suivant la nouvelle équation. La figure 5.3 donne les résultats pour une poutre intérieure et extérieure et la figure 5.4 donne les résultats pour l'ensemble des poutres ainsi que les valeurs maximales obtenues.



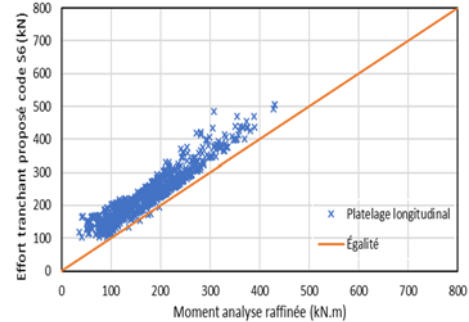
a) Poutre extérieure avant correction



b) Poutre extérieure après correction



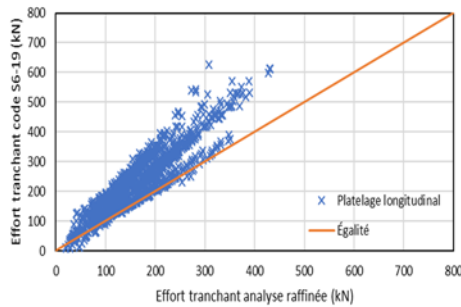
c) Poutre intérieure avant correction



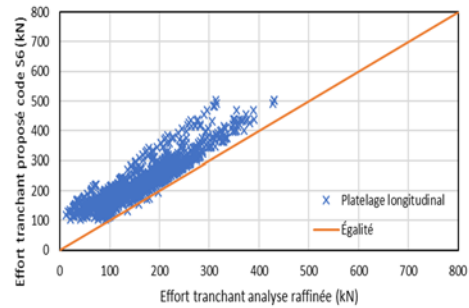
d) Poutre intérieure après correction

Figure 5.3 Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Poutre extérieure et intérieure

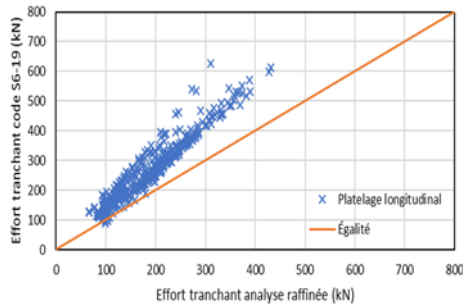
Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier



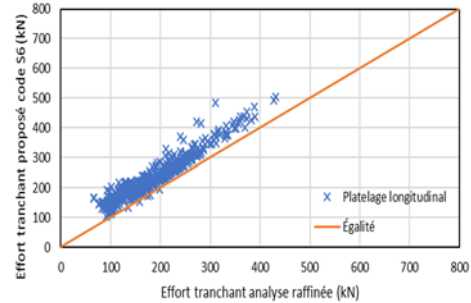
a) Ensemble des résultats avant correction



b) Ensemble des résultats après correction



c) Valeurs maximales avant correction



d) Valeurs maximales après correction

Figure 5.4 Effort tranchant à l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Ensemble des résultats et valeurs maximales

Comme pour le moment fléchissant, après la correction de l'équation de D_T , le nuage des points s'approche de la courbe d'égalité tout en restant du côté sécuritaire. Les résultats non sécuritaires obtenus par la répartition isostatique pour une poutre extérieure ont été éliminés et c'est la poutre de rive qui présente les résultats les plus sécuritaires après la correction du facteur D_T . Les tableaux suivants donnent les paramètres statistiques obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_T utilisées initialement au chapitre 4 et après la correction de ce facteur suivant la nouvelle équation.

**Tableau 5.5 Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à
 l'ÉLUL/ÉLUT-1 –Poutre extérieure et intérieure**

Avant correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.966	0.333	0.345	0.104
	Intérieure	0.669	0.099	0.148	3.351
Transversal	Extérieure	0.967	0.335	0.347	0.099
	Intérieure	0.664	0.102	0.154	3.284
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.572	0.178	0.311	2.402
	Intérieure	0.725	0.125	0.172	2.200
Transversal	Extérieure	0.574	0.179	0.313	2.377
	Intérieure	0.720	0.128	0.177	2.194

**Tableau 5.6 Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à
 l'ÉLUL/ÉLUT-1 – Valeurs maximales**

Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.714	0.093	0.131	3.073
Transversal	max	0.711	0.095	0.133	3.047
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.782	0.106	0.135	2.054
Transversal	max	0.780	0.106	0.135	2.088

La moyenne est plus proche de 1 que celui du cas avant la correction du facteur D_T avec une valeur de k_A toujours supérieure à 1.65 et donc les résultats sont toujours du côté sécuritaire. La dispersion des résultats pour une poutre extérieure a été beaucoup améliorée et la proposition d'une équation pour le paramètre D_T au lieu de la répartition isostatique semble plus adéquate.

5.4 Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2

À l'ÉLF, les résultats étaient plus sécuritaires qu'à l'ÉLUL. Une autre équation a été proposée en suivant la même démarche faite à l'ÉLUL et en considérant $\lambda = 0.05$ et $\gamma_e = 0$ puisque c'est la poutre intérieure qui gouverne à l'ÉLF. Le paramètre γ_c a été modifié en partant des équations pour une poutre intérieure d'une dalle en béton mais en tenant compte des cas où la valeur de γ_c calculée

pour une poutre intérieure diffère bien de celle calculée pour une poutre extérieure si la distinction entre les deux poutres est faite. Ces cas correspondent à des ponts sur lesquels il existe théoriquement 2 voies et plus mais qui sont très étroits pour accommoder ces voies. La poutre extérieure sera alors plus sollicitée dans ce cas et les valeurs de γ_c calculées pour une poutre intérieure seront trop grandes par rapport à celle pour une poutre extérieure de façon à avoir des résultats non sécuritaires pour ces ponts. En rassemblant les résultats statistiques pour une poutre extérieure avec les équations de γ_c propres à une poutre intérieure, la même démarche pourra être considérée pour calculer le facteur de réduction associée et qui sera appliquée à la formule de γ_c pour une poutre intérieure, pour un nombre de voies supérieur ou égal à 2 et pour un espacement compris entre 1.2 et 3 m puisque c'est pour cette gamme d'espacements que les ponts présentent ces cas les plus critiques.

Le facteur de réduction est égal à 0.9 et la nouvelle formule de γ_c pour n supérieure ou égale à 2 et pour $1.2 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$:

$$\gamma_c = 0.9 + 0.9(0.3S - 0.36)(L_e - 10)/40 \quad (5.6)$$

**Tableau 5.7 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Nouvelles valeurs de D_T**

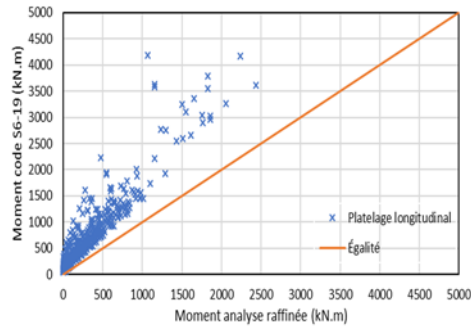
Avant correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.537	0.299	0.557	1.547
	Intérieure	0.850	0.181	0.213	0.829
Transversal	Extérieure	0.546	0.298	0.545	1.524
	Intérieure	0.841	0.179	0.213	0.888
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.470	0.252	0.537	2.101
	Intérieure	0.679	0.154	0.226	2.091
Transversal	Extérieure	0.478	0.251	0.526	2.080
	Intérieure	0.672	0.152	0.225	2.163

Le facteur de réduction est égal à : $F_R = \frac{0.701}{0.850} = 0.83$.

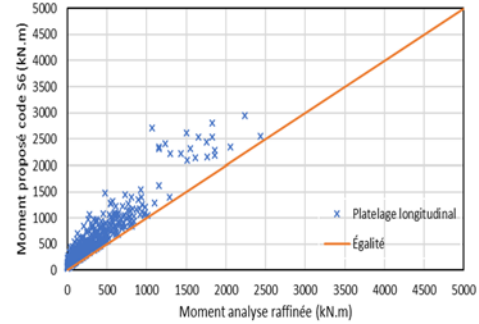
En partant de l'équation de D_T pour un nombre de voies égal à 2 puisque pour les petites portées le nombre de voies égal à 2 donne des valeurs de D_T inférieures à celui pour le nombre de voies égal à 1 et pour les grandes portées le nombre de voies égal à 2 donne des valeurs de D_T inférieures à celui pour le nombre de voies égal à 3 et plus. La nouvelle équation de D_T devient :

$$D_T = 4 - 2.5 / \sqrt{L_e} \quad (5.7)$$

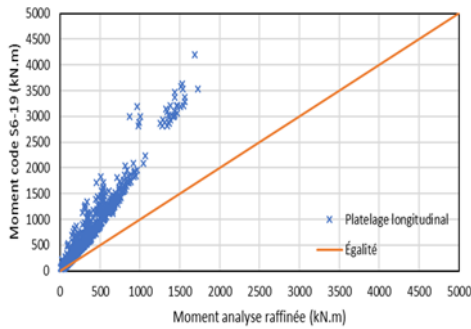
Les figures suivantes présentent les graphes obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_7 utilisées initialement au chapitre 4 et après la correction de ce facteur suivant la nouvelle équation.



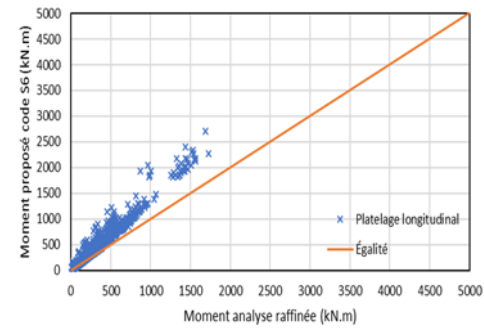
a) Poutre extérieure avant correction



b) Poutre extérieure après correction



c) Poutre intérieure avant correction



d) Poutre intérieure après correction

Figure 5.5 Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Poutre extérieure et intérieure

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier

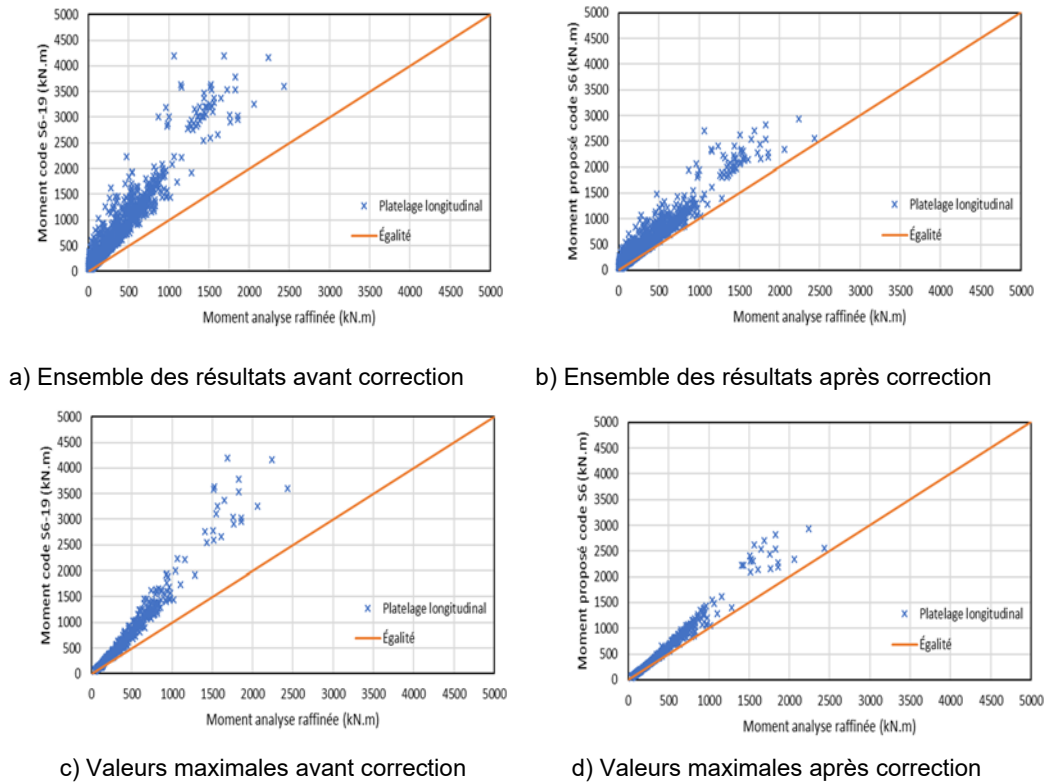


Figure 5.6 Moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Ensemble des résultats et valeurs maximales

La tendance est similaire à celle observée à l'ÉLUL. Après la correction de l'équation de D_T , le nuage des points s'approche de la courbe d'égalité tout en restant du côté sécuritaire. Le coefficient de variation s'est amélioré pour une poutre intérieure et pour les valeurs maximales mais pas pour une poutre extérieure puisque l'équation de base était celle d'une poutre intérieure et il existe des cas où c'est la poutre extérieure qui gouverne. Les tableaux suivants donnent les paramètres statistiques obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_T utilisées initialement au chapitre 4 et après la correction de ce facteur suivant la nouvelle équation.

**Tableau 5.8 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Poutre extérieure et intérieure**

Avant correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.376	0.199	0.530	3.128
	Intérieure	0.514	0.121	0.235	4.018
Transversal	Extérieure	0.383	0.199	0.519	3.108
	Intérieure	0.509	0.120	0.236	4.085
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.470	0.252	0.537	2.101
	Intérieure	0.679	0.154	0.226	2.091
Transversal	Extérieure	0.478	0.251	0.526	2.080
	Intérieure	0.672	0.152	0.225	2.163

**Tableau 5.9 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Valeurs maximales**

Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.638	0.090	0.141	4.014
Transversal	max	0.633	0.091	0.144	4.031
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.794	0.076	0.096	2.717
Transversal	max	0.788	0.078	0.099	2.721

La moyenne est plus proche de 1 que celui du cas avant la correction du facteur D_T avec une valeur de k_A toujours supérieure à 1.65 et donc les résultats sont toujours du côté sécuritaire. La dispersion des résultats est améliorée par le fait que le nouveau facteur D_T tient compte de la portée.

5.5 Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2

La norme CSA-S6 spécifie une valeur de D_T constante que ce soit pour une dalle en béton ou une dalle en aluminium. D'après les résultats du chapitre 4, la considération d'une répartition isostatique donnait des résultats non conservateurs. Pour l'effort tranchant, l'équation correspondant au calcul de D_T pour une poutre intérieure et pour une dalle en béton a été utilisée pour la poutre de rive et la poutre intérieure. La valeur de λ est ici toujours égale à 0. Les autres

paramètres nécessaires pour le calcul du facteur d'essieu sont inchangés. En comparant les nouvelles valeurs obtenues par la méthode simplifiée avec les celles obtenues par la méthode de grillage pour un platelage en aluminium, il est possible de remarquer qu'il y a des résultats non sécuritaires.

La nouvelle équation de D_T est :

$$D_T = 5.2 - 5.4 / \sqrt{L_e} \quad (5.8)$$

Comme pour le moment fléchissant, les figures suivantes présentent les graphes obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_T utilisées initialement au chapitre 4 et après la correction de ce facteur suivant la nouvelle équation.

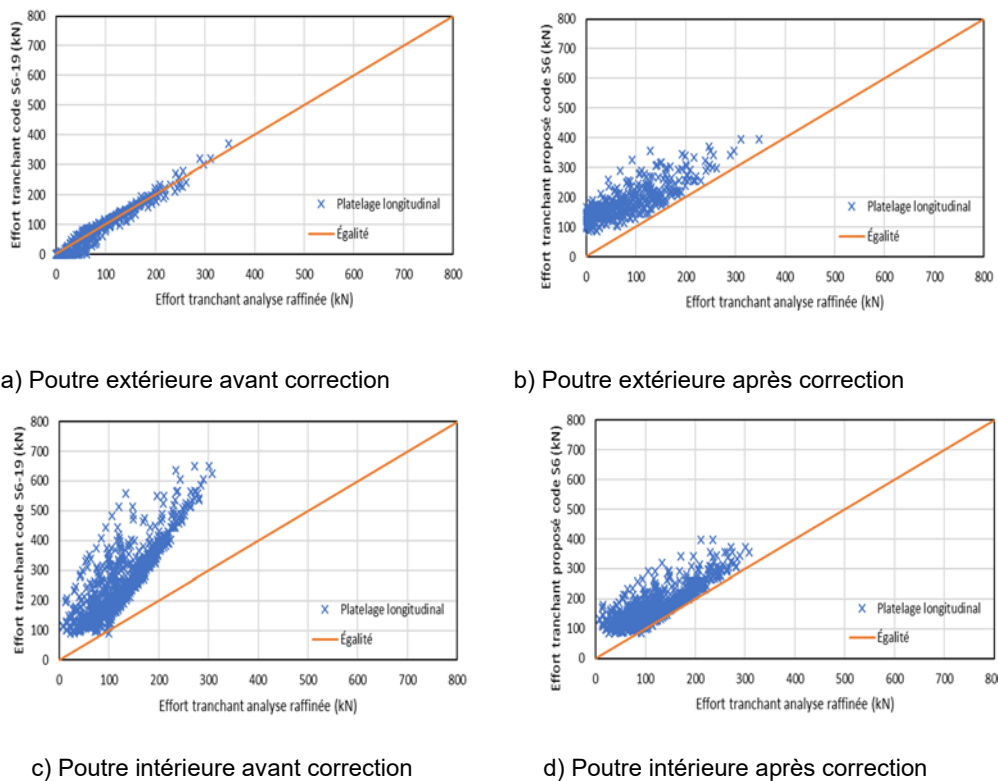
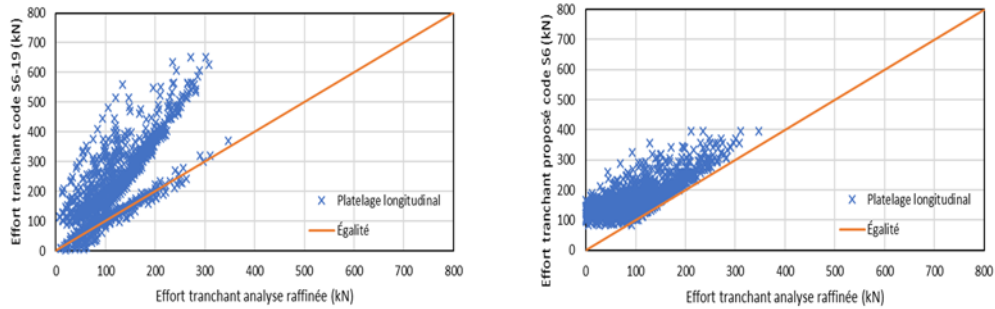


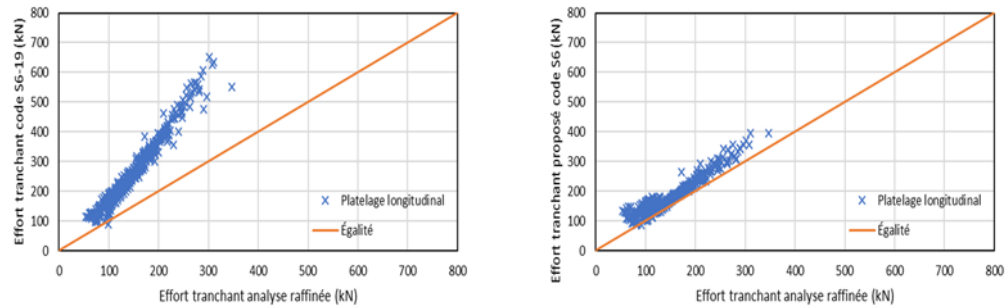
Figure 5.7 Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Poutre extérieure et intérieure

Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier



a) Ensemble des résultats avant correction

b) Ensemble des résultats après correction



c) Valeurs maximales avant correction

d) Valeurs maximales après correction

Figure 5.8 Effort tranchant à l'ÉLF/ÉLUT-2 – Ensemble des résultats et valeurs maximales

Comme pour le moment fléchissant, après la correction de l'équation de D_T , le nuage des points s'approche de la courbe d'égalité tout en restant du côté sécuritaire. Les résultats non sécuritaires obtenus par la répartition isostatique pour une poutre extérieure ont été éliminés et c'est la poutre de rive qui présente les résultats les plus sécuritaires après la correction du facteur D_T . Les tableaux suivants donnent les paramètres statistiques obtenus pour un platelage en aluminium avec les valeurs de D_T utilisées initialement au chapitre 4 et après la correction de ce facteur suivant la nouvelle équation.

**Tableau 5.10 Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à
 l'ÉLF/ÉLUT-2 –Poutre extérieure et intérieure**

Avant correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	1.225	0.968	0.790	-0.233
	Intérieure	0.485	0.134	0.276	3.852
Transversal	Extérieure	1.246	1.014	0.814	-0.243
	Intérieure	0.479	0.134	0.279	3.898
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Extérieure	0.407	0.258	0.633	2.297
	Intérieure	0.691	0.204	0.296	1.515
Transversal	Extérieure	0.412	0.258	0.625	2.282
	Intérieure	0.683	0.204	0.299	1.554

**Tableau 5.11 Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à
 l'ÉLF/ÉLUT-2 – Valeurs maximales**

Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.579	0.073	0.126	5.772
Transversal	max	0.574	0.075	0.131	5.652
Après correction					
Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	max	0.804	0.103	0.124	1.697
Transversal	max	0.797	0.105	0.128	1.731

Le coefficient de variation a diminué après correction pour les valeurs maximales mais l'écart type est un peu plus grand puisque qu'il existe toujours des ratios de faibles valeurs et il y a une plus grande différence entre ces ratios et les valeurs nouvellement calculées. Ces ratios faibles correspondent toujours à des ponts à 1 seule voie et à des faibles portées. La moyenne a augmenté en revanche, ce qui évite de se situer du côté trop sécuritaire des résultats.

5.6 Sommaire des résultats

Le tableau 5.12 résume les résultats obtenus pour les nouveaux coefficients nécessaires aux calculs des facteurs d'essieu à l'ÉLUL et l'ÉLF.

**Tableau 5.12 Coefficients D_T , γ_c , γ_e et λ
 pour les ponts de type dalle sur poutres**

Condition	Effet des charges	n	D_T (m)	λ	γ_c	γ_e
ÉLUL et ÉLUT-1	Moment fléchissant	Tous	$D_T = 3.8 - \frac{4.4}{\sqrt{L_e + 5}} \geq 2.55$	$0.10 - \frac{0.25}{L_e}$	1.0	Sans objet
	Effort tranchant	Tous	$D_T = 3.9 - \frac{3.6}{\sqrt{L_e}} \leq 3.1$	0	Tableau 5.14	Sans objet
ÉLUT-2 et ÉLF	Moment fléchissant	Tous	$D_T = 4 - \frac{2.5}{\sqrt{L_e}}$	0.05	Tableau 5.13	0
	Effort tranchant	Tous	$D_T = 5.2 - \frac{5.4}{\sqrt{L_e}}$	0	Tableau 5.14	0

**Tableau 5.13 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
ÉLUT-2 et ÉLF	1	Tous	Tous	1.0
	≥ 2	$L_e \leq 10$	Tous	1.0
		$10 < L_e \leq 30$	$S \leq 1.2$	1.0
			$1.2 < S \leq 3$	$0.9 + \frac{0.9(0.3S - 0.36)(L_e - 10)}{40}$

**Tableau 5.14 Coefficient γ_c pour l'effort tranchant pour les
 poutres intérieures et extérieures**

Condition	n	S (m)	γ_c
ÉLUL, ÉLUT-1, ÉLUT-2 et ÉLF	Tous	$S < 2.0$	$(S/2)^{0.25}$
		$2.0 \leq S$	1.0

6 SENSIBILITÉ DES PROPRIÉTÉS DES ÉLÉMENTS DU PONT

6.1 Effet des contreventements

Cette section présente les résultats obtenus en introduisant des contreventements entre les poutres dans les modèles de grillage obtenus par l'étude paramétrique. Les propriétés des contreventements adoptés dans cette étude sont celles du pont de référence. Les contreventements sont en V et formés de cornières 100×100×10 mm. Ils sont positionnés 100 mm des semelles inférieures et supérieures des poutres.

Dans cette étude paramétrique, les contreventements ont été modélisés au niveau de la mi-portée de chaque pont retenu dans l'analyse paramétrique. Les contreventements sont considérés comme étant fléchis en courbure simple (voir Éq. 2.1). L'étude statistique faite sur ces modèles permet la comparaison avec les résultats obtenus pour les ponts sans aucun contreventement et la visualisation de l'effet des contreventements sur les efforts induits sur les poutres de rive et poutres intérieure pour les 2 configurations de platelage adoptées dans cette étude.

6.1.1 *Moment fléchissant – ÉLU/ÉLS1*

6.1.1.1 Ensemble des résultats

Le tableau 6.1 présente l'ensemble des résultats. En analysant les résultats, il est possible de remarquer que le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 est plus important dans la poutre extérieure dans le cas où il y a présence des contreventements puisque le biais des résultats augmente mais avec une meilleure dispersion des résultats. Le cas inverse est observé au niveau de la poutre intérieure. La différence entre les résultats pour le platelage longitudinal et transversal reste toujours minime comme pour le cas où aucun contreventement n'est présent.

**Tableau 6.1 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1**

Configuration du platelage	Présence des contreventem ents	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Longitudinal	Non	Extérieure	0.602	0.094	0.156	4.225
		Intérieure	0.693	0.086	0.125	3.557
Transversal	Non	Extérieure	0.606	0.093	0.154	4.232
		Intérieure	0.688	0.089	0.129	3.514
Longitudinal	Oui	Extérieure	0.632	0.083	0.131	4.447
		Intérieure	0.645	0.093	0.144	3.814
Transversal	Oui	Extérieure	0.633	0.082	0.130	4.475
		Intérieure	0.645	0.094	0.145	3.790

Une étude d'influence des paramètres géométriques a été aussi faite. Ces paramètres géométriques restent toujours les suivants : portée du pont, nombre de voies et l'espacement des poutres.

6.1.1.2 Variation du nombre de voies

Le calcul des paramètres statistiques a été fait en faisant varier le nombre de voies présentes sur le pont et en comparant les résultats entre le cas où les contreventements ne sont pas modélisés et celui où ils le sont. Les paramètres statistiques sont donnés au tableau 6.2.

**Tableau 6.2 Paramètres statistiques du moment fléchissant à
 l'ÉLU/ÉLS-1 - variation du nombre de voies**

		Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Sans contreventements intermédiaires	1 voie	Longitudinal	Extérieure	0.559	0.095	0.169	4.658
			Intérieure	0.645	0.086	0.134	4.118
		Transversal	Extérieure	0.564	0.095	0.169	4.592
			Intérieure	0.641	0.092	0.143	3.914
	2 voies	Longitudinal	Extérieure	0.622	0.086	0.138	4.416
			Intérieure	0.716	0.087	0.122	3.270
		Transversal	Extérieure	0.625	0.084	0.135	4.439
			Intérieure	0.712	0.088	0.124	3.263
	3 voies	Longitudinal	Extérieure	0.637	0.080	0.125	4.540
			Intérieure	0.714	0.064	0.089	4.501
		Transversal	Extérieure	0.639	0.078	0.123	4.604
			Intérieure	0.708	0.065	0.091	4.514
Avec contreventements intermédiaires	1 voie	Longitudinal	Extérieure	0.601	0.093	0.155	4.284
			Intérieure	0.603	0.099	0.164	4.031
		Transversal	Extérieure	0.603	0.092	0.153	4.301
			Intérieure	0.602	0.100	0.166	3.978
	2 voies	Longitudinal	Extérieure	0.650	0.074	0.114	4.721
			Intérieure	0.676	0.091	0.135	3.561
		Transversal	Extérieure	0.651	0.073	0.113	4.756
			Intérieure	0.675	0.092	0.136	3.540
	3 voies	Longitudinal	Extérieure	0.650	0.064	0.098	5.500
			Intérieure	0.652	0.071	0.109	4.875
		Transversal	Extérieure	0.650	0.064	0.098	5.502
			Intérieure	0.651	0.072	0.110	4.859

Le biais des résultats montre que les contreventements ont tendance à amplifier le moment fléchissant dans la poutre extérieure alors que plus le nombre de voies est petit, plus cette variation est importante. Le cas inverse est observé au niveau de la poutre intérieure.

6.1.1.3 Variation de la portée

Le tableau 6.3 et le tableau 6.4 montrent la variation des paramètres statistiques suivant la portée du pont pour le cas où aucun contreventement n'est introduit dans les modèles et le cas où il y a des contreventements modélisés pour un nombre de voie égal à 1 et un nombre de voies égal à 2 et plus.

**Tableau 6.3 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – 1 voie**

L (m)	Sans contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.638	0.169	0.266	2.134	0.639	0.175	0.274	2.065
5	0.641	0.100	0.156	3.588	0.643	0.098	0.153	3.628
10	0.611	0.049	0.081	7.886	0.609	0.048	0.079	8.145
15	0.587	0.056	0.095	7.400	0.585	0.059	0.100	7.083
20	0.573	0.077	0.134	5.585	0.571	0.080	0.140	5.360
30	0.502	0.096	0.191	5.196	0.499	0.100	0.201	5.012
L (m)	Avec contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.621	0.135	0.216	2.813	0.623	0.136	0.218	2.774
5	0.636	0.072	0.114	5.035	0.638	0.071	0.111	5.102
10	0.597	0.063	0.106	6.381	0.596	0.064	0.108	6.261
15	0.572	0.098	0.171	4.392	0.571	0.098	0.172	4.378
20	0.558	0.120	0.215	3.699	0.557	0.120	0.214	3.704
30	0.480	0.136	0.284	3.809	0.480	0.136	0.284	3.813

**Tableau 6.4 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 – 2 voies et plus**

L (m)	Sans contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.689	0.163	0.237	1.908	0.684	0.164	0.239	1.927
5	0.723	0.116	0.161	2.385	0.725	0.115	0.158	2.393
10	0.700	0.087	0.124	3.463	0.698	0.085	0.122	3.548
15	0.689	0.076	0.110	4.112	0.686	0.073	0.107	4.290
20	0.669	0.064	0.096	5.138	0.664	0.062	0.093	5.408
30	0.628	0.050	0.080	7.447	0.622	0.049	0.078	7.767
L (m)	Avec contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.679	0.137	0.201	2.352	0.680	0.137	0.201	2.342
5	0.718	0.102	0.143	2.752	0.721	0.102	0.142	2.722
10	0.679	0.070	0.103	4.587	0.678	0.069	0.102	4.647
15	0.654	0.056	0.085	6.219	0.652	0.055	0.085	6.301
20	0.622	0.056	0.090	6.785	0.621	0.056	0.090	6.783
30	0.588	0.068	0.116	6.012	0.588	0.069	0.117	5.987

Ces tableaux montrent que le moment fléchissant est moins important dans le cas où il y a présence des contreventements puisque le biais résultats diminue pour toutes les valeurs des longueurs des ponts. Ceci s'explique par le fait que les cas critiques pour la poutre intérieure qui existaient pour le cas "sans contreventements" et qui présentaient des grands ratios ont été éliminés en introduisant les contreventements.

6.1.1.4 Variation de l'espacement des poutres

L'influence de l'espacement des poutres montré au tableau 6.5 conduit aux mêmes observations que pour les autres paramètres.

**Tableau 6.5 Effet de l'espacement entre les poutres sur les
 paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1**

Sans contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.657	0.124	0.188	2.772
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.664	0.098	0.148	3.422
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.677	0.086	0.127	3.745
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.656	0.079	0.121	4.335
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.606	0.094	0.154	4.206
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.658	0.125	0.191	2.728
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.663	0.097	0.147	3.466
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.674	0.085	0.126	3.834
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.652	0.079	0.121	4.423
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.603	0.092	0.152	4.329
Avec contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.651	0.102	0.157	3.406
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.652	0.093	0.142	3.746
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.646	0.077	0.120	4.573
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.609	0.077	0.127	5.052
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.554	0.078	0.141	5.702
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.652	0.103	0.158	3.385
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.652	0.093	0.143	3.737
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.645	0.078	0.120	4.568
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.608	0.077	0.127	5.056
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.553	0.078	0.141	5.709

6.1.1.5 Étude des valeurs maximales

Une étude des valeurs maximales entre les deux cas a été faite pour voir l'influence des contreventements sur les paramètres statistiques des ratios des moments maximaux obtenus par les modèles de grillage. Les résultats sont présentés au tableau 6.6.

**Tableau 6.6 Paramètres statistiques du moment fléchissant
 maximal à l'ÉLU/ÉLS-1**

Présence des contreventements	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Non	Longitudinal	max	0.724	0.078	0.107	3.542
	Transversal	max	0.722	0.079	0.109	3.523
Oui	Longitudinal	max	0.696	0.072	0.103	4.234
	Transversal	max	0.697	0.072	0.104	4.190

Les valeurs montrent que les résultats sont plus sécuritaires pour les cas où des contreventements sont présents. Ceci s'explique aussi par le fait que des cas critiques donnant un plus grand moment fléchissant dans la poutre intérieure ont été éliminés avec l'introduction des contreventements puisque dans certains cas puisque c'est la poutre extérieure qui gouverne au lieu de la poutre intérieure comme le montre le tableau 6.7. Cependant, l'écart du biais reste faible et est de 3.9% pour le platelage longitudinal alors que pour le platelage transversal l'écart est de 3.5%.

**Tableau 6.7 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Moment fléchissant**

Configuration du platelage	Présence des contreventements	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Non	Extérieure	90	398	23%
		Intérieure	308		77%
Transversal	Non	Extérieure	95	398	24%
		Intérieure	303		76%
Longitudinal	Oui	Extérieure	201	398	51%
		Intérieure	197		49%
Transversal	Oui	Extérieure	203	398	51%
		Intérieure	195		49%

6.1.2 Effort tranchant – ÉLU/ÉLS1

Des mêmes observations peuvent être faites pour le cas de l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 mais l'effort tranchant est moins sensible à la présence des contreventements que pour le moment fléchissant comme le montre les tableaux suivants.

**Tableau 6.8 Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à
 l'ÉLU/ÉLS-1**

Présence des contreventements	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Non	Longitudinal	Extérieure	0.966	0.333	0.345	0.104
		Intérieure	0.669	0.099	0.148	3.351
	Transversal	Extérieure	0.967	0.335	0.347	0.099
		Intérieure	0.664	0.102	0.154	3.284
Oui	Longitudinal	Extérieure	0.984	0.345	0.351	0.046
		Intérieure	0.658	0.100	0.152	3.413
	Transversal	Extérieure	0.983	0.346	0.352	0.050
		Intérieure	0.655	0.103	0.157	3.352

**Tableau 6.9 Paramètres statistiques de l'effort tranchant
 maximal à l'ÉLU/ÉLS-1 - variation du nombre de voies**

		Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Sans contreventements	1 voie	Longitudinal	max	0.657	0.117	0.178	2.937
		Transversal	max	0.657	0.122	0.186	2.816
	2 voies	Longitudinal	max	0.750	0.060	0.080	4.153
		Transversal	max	0.746	0.059	0.079	4.291
	3 voies	Longitudinal	max	0.745	0.036	0.048	7.089
		Transversal	max	0.741	0.037	0.049	7.052
Avec contreventements	1 voie	Longitudinal	max	0.659	0.123	0.187	2.761
		Transversal	max	0.659	0.128	0.194	2.663
	2 voies	Longitudinal	max	0.737	0.070	0.095	3.738
		Transversal	max	0.734	0.069	0.094	3.863
	3 voies	Longitudinal	max	0.719	0.048	0.066	5.898
		Transversal	max	0.718	0.047	0.066	6.006

**Tableau 6.10 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1 – 1 voie**

L (m)	Sans contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.846	0.165	0.194	0.936	0.847	0.176	0.207	0.872
5	0.683	0.109	0.159	2.917	0.685	0.117	0.170	2.697
10	0.647	0.051	0.079	6.903	0.644	0.055	0.085	6.477
15	0.581	0.031	0.054	13.44	0.580	0.033	0.057	12.69
20	0.585	0.049	0.084	8.438	0.583	0.052	0.089	7.998
30	0.554	0.062	0.111	7.239	0.553	0.062	0.112	7.195
L (m)	Avec contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.860	0.167	0.195	0.835	0.861	0.178	0.207	0.779
5	0.691	0.115	0.167	2.679	0.693	0.122	0.177	2.506
10	0.642	0.057	0.088	6.303	0.641	0.060	0.093	6.011
15	0.581	0.038	0.066	11.012	0.580	0.039	0.067	10.801
20	0.584	0.053	0.090	7.901	0.583	0.054	0.092	7.743
30	0.558	0.060	0.107	7.384	0.557	0.060	0.108	7.350

**Tableau 6.11 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 de l'effort tranchant maximal à l'ÉLU/ÉLS-1 – 2 voies et plus**

L (m)	Sans contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.853	0.076	0.089	1.948	0.843	0.063	0.074	2.506
5	0.748	0.063	0.085	3.975	0.746	0.064	0.086	3.974
10	0.782	0.050	0.064	4.342	0.780	0.049	0.062	4.535
15	0.740	0.034	0.046	7.638	0.736	0.033	0.045	8.059
20	0.716	0.023	0.032	12.51	0.711	0.021	0.030	13.51
30	0.715	0.023	0.032	12.27	0.709	0.024	0.034	12.21
L (m)	Avec contreventements intermédiaires							
	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.866	0.072	0.083	1.867	0.857	0.063	0.073	2.272
5	0.763	0.066	0.086	3.601	0.759	0.066	0.087	3.633
10	0.776	0.049	0.063	4.578	0.773	0.048	0.062	4.769
15	0.713	0.036	0.051	7.895	0.710	0.035	0.050	8.213
20	0.677	0.027	0.040	12.063	0.675	0.026	0.038	12.550
30	0.680	0.035	0.051	9.162	0.679	0.035	0.052	9.187

**Tableau 6.12 Effet de l'espacement entre les poutres sur les
 paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à
 l'ÉLU/ÉLS-1**

Sans contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.776	0.128	0.165	1.750
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.694	0.096	0.138	3.191
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.715	0.069	0.096	4.139
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.702	0.055	0.078	5.439
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.656	0.080	0.122	4.310
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.776	0.135	0.174	1.665
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.691	0.096	0.138	3.226
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.712	0.068	0.096	4.228
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.699	0.055	0.079	5.430
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.653	0.080	0.123	4.317
Avec contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.785	0.133	0.170	1.616
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.692	0.096	0.138	3.224
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.698	0.064	0.092	4.698
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.675	0.056	0.084	5.763
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.627	0.082	0.130	4.575
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.784	0.140	0.179	1.542
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.689	0.095	0.138	3.268
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.696	0.064	0.091	4.781
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.675	0.057	0.084	5.750
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.627	0.082	0.130	4.569

**Tableau 6.13 Paramètres statistiques de l'effort tranchant
 maximal à l'ÉLU/ÉLS-1**

Présence des contreventements	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Non	Longitudinal	max	0.714	0.093	0.131	3.073
	Transversal	max	0.711	0.095	0.133	3.047
Oui	Longitudinal	max	0.703	0.096	0.137	3.078
	Transversal	max	0.702	0.098	0.139	3.054

L'écart du biais entre les deux cas est égal à 1.5% pour le platelage longitudinal et à 1.3% pour le platelage transversal. L'effort tranchant est peu sensible à la présence des contreventements comme le montre le tableau 6.14 qui indique que le nombre de cas gouvernant pour la poutre extérieure et la poutre intérieure n'est pas trop affecté.

**Tableau 6.14 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Effort tranchant
 maximal**

Configuration du platelage	Présence des contreventements	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Non	Extérieure	36	398	9%
		Intérieure	362		91%
Transversal	Non	Extérieure	41	398	10%
		Intérieure	357		90%
Longitudinal	Oui	Extérieure	48	398	12%
		Intérieure	350		88%
Transversal	Oui	Extérieure	50	398	13%
		Intérieure	348		87%

6.1.3 Moment fléchissant – ÉLF/ÉLS2

Les mêmes conclusions peuvent être faites pour le moment fléchissant à l'ÉLF et l'ÉLS-2 que pour l'ÉLU et l'ÉLS-1. Les résultats des paramètres statistiques sont présentés dans les tableaux suivants.

**Tableau 6.15 Paramètres statistiques pour le moment
 fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2**

Présence des contreventements	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Non	Longitudinal	Extérieure	0.376	0.199	0.530	3.128
		Intérieure	0.514	0.121	0.235	4.018
	Transversal	Extérieure	0.383	0.199	0.519	3.108
		Intérieure	0.509	0.120	0.236	4.085
Oui	Longitudinal	Extérieure	0.443	0.194	0.439	2.867
		Intérieure	0.463	0.115	0.248	4.681
	Transversal	Extérieure	0.445	0.193	0.435	2.872
		Intérieure	0.462	0.115	0.248	4.686

**Tableau 6.16 Paramètres statistiques du moment fléchissant à
 l'ÉLF/ÉLS-2 - variation du nombre de voies**

		Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Sans contreventements intermédiaires	1 voie	Longitudinal	Extérieure	0.176	0.135	0.769	6.085
			Intérieure	0.547	0.133	0.243	3.397
		Transversal	Extérieure	0.183	0.136	0.744	6.009
			Intérieure	0.543	0.133	0.246	3.430
	2 voies	Longitudinal	Extérieure	0.474	0.134	0.282	3.930
			Intérieure	0.504	0.130	0.259	3.803
		Transversal	Extérieure	0.482	0.132	0.274	3.926
			Intérieure	0.500	0.129	0.258	3.876
	3 voies	Longitudinal	Extérieure	0.526	0.087	0.165	5.463
			Intérieure	0.493	0.085	0.172	5.983
		Transversal	Extérieure	0.531	0.085	0.160	5.528
			Intérieure	0.487	0.083	0.171	6.169
Avec contreventements intermédiaires	1 voie	Longitudinal	Extérieure	0.244	0.146	0.601	5.169
			Intérieure	0.511	0.123	0.241	3.973
		Transversal	Extérieure	0.246	0.146	0.593	5.177
			Intérieure	0.510	0.123	0.241	3.986
	2 voies	Longitudinal	Extérieure	0.554	0.116	0.209	3.854
			Intérieure	0.464	0.117	0.252	4.601
		Transversal	Extérieure	0.556	0.114	0.206	3.879
			Intérieure	0.463	0.117	0.252	4.600
	3 voies	Longitudinal	Extérieure	0.573	0.063	0.110	6.761
			Intérieure	0.415	0.079	0.189	7.443
		Transversal	Extérieure	0.574	0.062	0.109	6.833
			Intérieure	0.414	0.079	0.190	7.424

**Tableau 6.17 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – 1 voie**

Sans contreventements intermédiaires								
L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.404	0.284	0.703	2.100	0.402	0.283	0.705	2.113
5	0.432	0.268	0.619	2.121	0.433	0.265	0.612	2.137
10	0.419	0.202	0.481	2.882	0.418	0.194	0.465	2.993
15	0.406	0.153	0.376	3.889	0.405	0.145	0.357	4.117
20	0.402	0.114	0.283	5.529	0.400	0.107	0.267	5.601
30	0.357	0.063	0.176	10.25	0.355	0.057	0.161	11.29
Avec contreventements intermédiaires								
L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.409	0.267	0.653	2.209	0.410	0.267	0.652	2.210
5	0.436	0.240	0.551	2.345	0.438	0.238	0.545	2.359
10	0.418	0.134	0.321	4.333	0.418	0.132	0.315	4.417
15	0.402	0.078	0.195	7.646	0.401	0.077	0.193	7.745
20	0.396	0.060	0.151	10.089	0.396	0.060	0.151	10.115
30	0.344	0.023	0.068	27.986	0.344	0.023	0.068	28.139

**Tableau 6.18 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2 – 2 voies et plus**

Sans contreventements intermédiaires								
L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.561	0.120	0.213	3.665	0.557	0.121	0.217	3.669
5	0.531	0.169	0.318	2.775	0.532	0.166	0.312	2.815
10	0.501	0.113	0.226	4.409	0.499	0.110	0.220	4.569
15	0.492	0.092	0.187	5.528	0.489	0.091	0.186	5.623
20	0.481	0.088	0.184	5.874	0.478	0.089	0.187	5.850
30	0.476	0.080	0.167	6.579	0.473	0.081	0.172	6.469
Avec contreventements intermédiaires								
L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.558	0.105	0.189	4.192	0.558	0.105	0.189	4.195
5	0.525	0.134	0.255	3.544	0.525	0.133	0.252	3.554
10	0.482	0.094	0.196	5.506	0.481	0.095	0.196	5.489
15	0.470	0.107	0.227	4.959	0.469	0.107	0.229	4.939
20	0.451	0.121	0.268	4.543	0.451	0.121	0.269	4.539
30	0.429	0.125	0.291	4.580	0.429	0.125	0.291	4.583

**Tableau 6.19 Effet de l'espacement entre les poutres sur les
 paramètres statistiques du moment fléchissant à l'ÉLF/ÉLS-2**

Sans contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.461	0.237	0.514	2.272
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.471	0.169	0.359	3.127
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.479	0.127	0.264	4.121
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.473	0.103	0.217	5.141
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.438	0.095	0.216	5.945
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.461	0.235	0.509	2.299
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.470	0.166	0.352	3.195
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.477	0.124	0.259	4.229
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.470	0.101	0.215	5.248
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.435	0.092	0.210	6.165
Avec contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.464	0.212	0.457	2.523
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.466	0.140	0.301	3.807
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.457	0.114	0.249	4.775
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.437	0.110	0.253	5.092
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.397	0.085	0.214	7.086
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.465	0.211	0.454	2.538
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.466	0.140	0.300	3.817
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.457	0.114	0.249	4.770
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.437	0.111	0.253	5.086
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.397	0.085	0.214	7.088

**Tableau 6.20 Paramètres statistiques du moment fléchissant
 maximal à l'ÉLF/ÉLS-2**

Présence des contreventements	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Non	Longitudinal	max	0.638	0.090	0.141	4.014
	Transversal	max	0.633	0.091	0.144	4.031
Oui	Longitudinal	max	0.593	0.095	0.160	4.293
	Transversal	max	0.593	0.095	0.161	4.272

Les valeurs montrent que les résultats sont plus sécuritaires pour les cas où des contreventements sont présents. L'écart du biais est de l'ordre de 7.1% pour le platelage longitudinal alors que pour le platelage transversal, l'écart est de

l'ordre de 6.3%. Cet écart s'explique par le nombre de cas gouvernant qui a significativement varié pour les poutres extérieures et poutres intérieures entre les deux cas comme le montre le tableau 6.21.

**Tableau 6.21 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2 – Moment fléchissant**

Configuration du platelage	Présence des contreventements	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Non	Extérieure	72	398	18%
		Intérieure	326		82%
Transversal	Non	Extérieure	77	398	19%
		Intérieure	321		81%
Longitudinal	Oui	Extérieure	160	398	40%
		Intérieure	238		60%
Transversal	Oui	Extérieure	160	398	40%
		Intérieure	238		60%

6.1.4 Effort tranchant – ÉLF/ÉLS2

Les mêmes conclusions peuvent être faites pour l'effort tranchant à l'ÉLF et l'ÉLS-2 que pour l'ÉLU et l'ÉLS-1. Les résultats des paramètres statistiques sont présentés dans les tableaux suivants.

**Tableau 6.22 Paramètres statistiques pour l'effort tranchant à
 l'ÉLF/ÉLS-2**

Présence des contreventements	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Non	Longitudinal	Extérieure	1.225	0.968	0.790	-0.233
		Intérieure	0.485	0.134	0.276	3.852
	Transversal	Extérieure	1.246	1.014	0.814	-0.243
		Intérieure	0.479	0.134	0.279	3.898
Oui	Longitudinal	Extérieure	1.334	1.189	0.891	-0.281
		Intérieure	0.476	0.133	0.280	3.933
	Transversal	Extérieure	1.341	1.205	0.898	-0.283
		Intérieure	0.471	0.133	0.283	3.962

Tableau 6.23 Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2 - variation du nombre de voies

		Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Sans contreventements	1 voie	Longitudinal	max	0.601	0.096	0.159	4.176
		Transversal	max	0.594	0.100	0.169	4.046
	2 voies	Longitudinal	max	0.579	0.056	0.096	7.533
		Transversal	max	0.575	0.057	0.099	7.476
	3 voies	Longitudinal	max	0.549	0.036	0.066	12.469
		Transversal	max	0.545	0.037	0.068	12.318
Avec contreventements	1 voie	Longitudinal	max	0.593	0.104	0.175	3.908
		Transversal	max	0.588	0.107	0.183	3.832
	2 voies	Longitudinal	max	0.575	0.058	0.102	7.275
		Transversal	max	0.572	0.059	0.103	7.242
	3 voies	Longitudinal	max	0.537	0.038	0.070	12.313
		Transversal	max	0.534	0.038	0.071	12.291

Tableau 6.24 Effet de la portée sur les paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2 – 1 voie

Sans contreventements intermédiaires								
L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.716	0.168	0.235	1.685	0.705	0.182	0.259	1.621
5	0.617	0.096	0.155	4.005	0.613	0.103	0.169	3.747
10	0.609	0.044	0.072	8.892	0.603	0.047	0.078	8.451
15	0.549	0.020	0.037	22.41	0.543	0.021	0.038	21.923
20	0.531	0.022	0.042	21.03	0.525	0.023	0.044	20.42
30	0.512	0.015	0.029	33.22	0.507	0.015	0.030	32.95
Avec contreventements intermédiaires								
L (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.728	0.172	0.237	1.580	0.716	0.185	0.259	1.531
5	0.620	0.103	0.167	3.676	0.615	0.110	0.180	3.488
10	0.592	0.049	0.083	8.342	0.588	0.052	0.088	7.990
15	0.532	0.029	0.054	16.433	0.529	0.029	0.054	16.441
20	0.522	0.035	0.067	13.753	0.519	0.034	0.066	14.002
30	0.515	0.021	0.040	23.300	0.512	0.020	0.039	24.452

**Tableau 6.25 Effet de la portée sur les paramètres statistiques
 de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2 – 2 voies et plus**

Sans contreventements intermédiaires								
<i>L</i> (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.625	0.076	0.122	4.926	0.609	0.076	0.125	5.148
5	0.608	0.056	0.092	7.022	0.605	0.059	0.098	6.660
10	0.598	0.037	0.061	10.95	0.595	0.037	0.062	11.03
15	0.551	0.027	0.049	16.70	0.547	0.028	0.050	16.47
20	0.530	0.031	0.059	14.95	0.526	0.033	0.062	14.48
30	0.512	0.039	0.076	12.50	0.508	0.041	0.080	12.12
Avec contreventements intermédiaires								
<i>L</i> (m)	Platelage longitudinal				Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
3	0.633	0.075	0.119	4.898	0.618	0.078	0.127	4.868
5	0.606	0.063	0.105	6.223	0.603	0.066	0.110	5.983
10	0.586	0.040	0.068	10.380	0.584	0.040	0.068	10.448
15	0.542	0.034	0.062	13.574	0.540	0.034	0.063	13.586
20	0.524	0.036	0.069	13.196	0.522	0.036	0.070	13.159
30	0.510	0.042	0.082	11.770	0.508	0.042	0.083	11.638

**Tableau 6.26 Effet de l'espacement entre les poutres sur les
 paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à
 l'ÉLF/ÉLS-2**

Sans contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.657	0.121	0.184	2.837
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.583	0.051	0.087	8.182
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.566	0.034	0.060	12.77
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.539	0.036	0.066	12.93
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.494	0.032	0.064	16.03
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.649	0.130	0.200	2.705
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.579	0.053	0.092	7.906
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.562	0.036	0.063	12.34
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.535	0.037	0.069	12.60
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.491	0.031	0.063	16.42
Avec contreventements intermédiaires				
Espacement des poutres	Platelage longitudinal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.661	0.127	0.191	2.675
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.577	0.055	0.095	7.707
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.556	0.035	0.063	12.736
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.526	0.035	0.067	13.419
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.474	0.026	0.054	20.614
Espacement des poutres	Platelage transversal			
	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
$0.6 \text{ m} \leq S \leq 1.0 \text{ m}$	0.653	0.135	0.207	2.569
$1.0 \text{ m} < S \leq 1.5 \text{ m}$	0.574	0.057	0.099	7.494
$1.5 \text{ m} < S \leq 2.0 \text{ m}$	0.554	0.036	0.065	12.450
$2.0 \text{ m} < S \leq 2.5 \text{ m}$	0.525	0.036	0.068	13.204
$2.5 \text{ m} < S \leq 3.0 \text{ m}$	0.474	0.026	0.055	20.167

**Tableau 6.27 Paramètres statistiques de l'effort tranchant
 maximal à l'ÉLF/ÉLS-2**

Présence des contreventements	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
Non	Longitudinal	max	0.579	0.073	0.126	5.772
	Transversal	max	0.574	0.075	0.131	5.652
Oui	Longitudinal	max	0.572	0.079	0.137	5.455
	Transversal	max	0.568	0.080	0.141	5.389

L'écart du biais entre les deux cas est égal à 1.2% pour le platelage longitudinal et à 1.1% pour le platelage transversal. L'effort tranchant est peu sensible à la

présence des contreventements comme le montre le tableau 6.28 qui indique que le nombre de cas gouvernant pour la poutre extérieure et la poutre intérieure n'est pas trop affecté.

**Tableau 6.28 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2– Effort tranchant
 maximal**

Configuration du platelage	Présence des contreventements	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	Non	Extérieure	30	398	8%
		Intérieure	368		92%
Transversal	Non	Extérieure	30	398	8%
		Intérieure	368		92%
Longitudinal	Oui	Extérieure	32	398	8%
		Intérieure	366		92%
Transversal	Oui	Extérieure	35	398	9%
		Intérieure	363		91%

6.1.5 Sommaire

Les résultats obtenus montrent que les efforts sont amplifiés dans les poutres extérieures et réduits dans les poutres intérieures avec la présence des contreventements. Cette nouvelle distribution des efforts rend les résultats plus sécuritaires lorsque comparés avec la méthode simplifiée. En effet, un équilibre a été établi entre les cas où la poutre extérieure gouverne et les cas où la poutre intérieure gouverne pour les ponts où des contreventements ont été introduits. Cet effet est notamment ressenti pour le moment fléchissant. L'effort tranchant étant moins sensible à la présence des contreventements dans les ponts.

6.2 Effet de la rigidité du platelage

Une étude de l'effet de la rigidité du platelage a été aussi réalisée en considérant un platelage fictif dont les valeurs des propriétés structurales valent le double de celles du platelage de référence en gardant toujours les contreventements considérés dans l'étude paramétrique de la section précédente. Dans cette partie, seule l'étude des valeurs maximales a été présentée pour le moment fléchissant et l'effort tranchant à l'ÉLU/ÉLS-1 et à l'ÉLF/ÉLS-2.

6.2.1 Moment fléchissant – ÉLU/ÉLS1

**Tableau 6.29 Paramètres statistiques du moment fléchissant
 maximal à l'ÉLU/ÉLS-1**

Rigidité du platelage	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
K_0	Longitudinal	max	0.696	0.072	0.103	4.234
	Transversal	max	0.697	0.072	0.104	4.190
$2K_0$	Longitudinal	max	0.676	0.065	0.096	5.019
	Transversal	max	0.677	0.065	0.096	4.951

Les valeurs montrent que les résultats sont plus sécuritaires pour les cas où le platelage est deux fois plus rigide. Cette observation est attendue puisqu'un platelage plus rigide distribue mieux les efforts entre les poutres. Cependant, l'écart du biais reste faible et est de 2.9% pour le platelage longitudinal et ainsi pour le platelage transversal, l'écart est de 2.9%. Le nombre de cas gouvernant pour la poutre extérieure et intérieure varie peu entre les deux cas comme le montre le tableau 6.30.

**Tableau 6.30 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Moment fléchissant**

Configuration du platelage	Rigidité du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	K_0	Extérieure	201	398	51%
		Intérieure	197		49%
Transversal	K_0	Extérieure	203	398	51%
		Intérieure	195		49%
Longitudinal	$2K_0$	Extérieure	219	398	55%
		Intérieure	179		45%
Transversal	$2K_0$	Extérieure	223	398	56%
		Intérieure	175		44%

6.2.2 Effort tranchant – ÉLU/ÉLS1

**Tableau 6.31 Paramètres statistiques de l'effort tranchant
 maximal à l'ÉLU/ÉLS-1**

Rigidité du platelage	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
K_0	Longitudinal	max	0.703	0.096	0.137	3.078
	Transversal	max	0.702	0.098	0.139	3.054
$2K_0$	Longitudinal	max	0.682	0.092	0.135	3.461
	Transversal	max	0.681	0.094	0.138	3.406

Les valeurs montrent que les résultats sont plus sécuritaires pour les cas où le platelage est deux fois plus rigide. L'écart du biais entre les deux cas est égal à 3% pour le platelage longitudinal et à 3% pour le platelage transversal. Le nombre de cas gouvernant pour la poutre extérieure et intérieure, entre les deux cas, varie moins que pour le moment fléchissant comme le montre le tableau 6.32.

**Tableau 6.32 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLU/ÉLS-1 – Effort tranchant
 maximal**

Configuration du platelage	Rigidité du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	K_0	Extérieure	48	398	12%
		Intérieure	350		88%
Transversal	K_0	Extérieure	50	398	13%
		Intérieure	348		87%
Longitudinal	$2K_0$	Extérieure	51	398	13%
		Intérieure	347		87%
Transversal	$2K_0$	Extérieure	56	398	14%
		Intérieure	342		86%

6.2.3 Moment fléchissant – ÉLF/ÉLS2

**Tableau 6.33 Paramètres statistiques du moment fléchissant
 maximal à l'ÉLF/ÉLS-2**

Rigidité du platelage	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
K_0	Longitudinal	max	0.593	0.095	0.160	4.293
	Transversal	max	0.593	0.095	0.161	4.272
$2K_0$	Longitudinal	max	0.574	0.087	0.152	4.876
	Transversal	max	0.574	0.088	0.154	4.828

Les valeurs montrent que les résultats sont plus sécuritaires pour les cas où le platelage est deux fois plus rigide. L'écart du biais entre les deux cas est égal à 3.2% pour le platelage longitudinal et à 3.2% pour le platelage transversal. Le nombre de cas gouvernant pour la poutre extérieure et intérieure, entre les deux cas, varie moins que pour le moment fléchissant à l'ÉLU/ÉLS-1 comme le montre le tableau 6.34.

**Tableau 6.34 Répartition de la position de la poutre
 gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2 – Moment fléchissant**

Configuration du platelage	Rigidité du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	K_0	Extérieure	160	398	40%
		Intérieure	238		60%
Transversal	K_0	Extérieure	160	398	40%
		Intérieure	238		60%
Longitudinal	$2K_0$	Extérieure	167	398	42%
		Intérieure	231		58%
Transversal	$2K_0$	Extérieure	171	398	43%
		Intérieure	227		57%

6.2.4 Effort tranchant – ÉLF/ÉLS2

Tableau 6.35 Paramètres statistiques de l'effort tranchant maximal à l'ÉLF/ÉLS-2

Rigidité du platelage	Configuration du platelage	Position des poutres	δ_{MU}	σ_{MU}	V_{MU}	k_A
K_0	Longitudinal	max	0.572	0.079	0.137	5.455
	Transversal	max	0.568	0.080	0.141	5.389
$2K_0$	Longitudinal	max	0.551	0.074	0.134	6.059
	Transversal	max	0.548	0.076	0.139	5.921

Les valeurs montrent que les résultats sont plus sécuritaires pour les cas où le platelage est deux fois plus rigide. L'écart du biais entre les deux cas est égal à 3.7% pour le platelage longitudinal et à 3.5% pour le platelage transversal. Le nombre de cas gouvernant pour la poutre extérieure et intérieure, entre les deux cas, varie moins que pour le moment fléchissant comme le montre le tableau 6.36.

Tableau 6.36 Répartition de la position de la poutre gouvernant la conception à l'ÉLF/ÉLS-2 – Effort tranchant maximal

Configuration du platelage	Rigidité du platelage	Position des poutres	Nombre de cas gouvernant	Nombre de cas au total	%
Longitudinal	K_0	Extérieure	32	398	8%
		Intérieure	366		92%
Transversal	K_0	Extérieure	35	398	9%
		Intérieure	363		91%
Longitudinal	$2K_0$	Extérieure	35	398	9%
		Intérieure	363		91%
Transversal	$2K_0$	Extérieure	39	398	10%
		Intérieure	359		90%

6.2.5 Sommaire

Les résultats montrent qu'avec une plus grande rigidité du platelage, une meilleure distribution des efforts est observée. Cette conclusion peut être tirée puisqu'en comparant les résultats des modèles d'analyse de grillage avec la méthode simplifiée, et pour un platelage deux fois plus rigide, les valeurs des biais indiquaient des résultats plus faibles. La méthode simplifiée est donc plus sécuritaire pour l'estimation des efforts pour le platelage rigide. Ce résultat est attendu puisqu'un platelage rigide distribue mieux les efforts entre les poutres d'un pont donné. La différence entre le nombre de poutres qui gouverne selon

la position pour les deux valeurs de rigidité considérées est observée pour les ponts à petites portées car la rigidité du platelage, qui est la même pour toutes les portées, a une influence sur la distribution des efforts entre la poutre extérieure et la poutre intérieure.

7 CONCLUSIONS

Les analyses numériques réalisées dans le cadre de ce projet de recherche ont permis de démontrer que la méthode simplifiée recommandée dans les dernières éditions du code CSA-S6 (2014 et 2019) est trop sécuritaire car fondée sur des hypothèses trop conservatrices. Les résultats des analyses ont permis de développer une méthode simplifiée pour déterminer la répartition des efforts entre les poutres en acier des tabliers avec platelage en aluminium. Les équations proposées permettent un calcul plus précis et mieux adapté aux types de platelages en aluminium préconisés pour les ponts au Québec. Cette méthode simplifiée pourra éventuellement être intégrée dans la prochaine édition du code CSA-S6 prévue pour 2025. Au préalable, la méthode pourrait être incluse dans les manuels de conception du Ministère.

Les études ont aussi permis d'illustrer que les platelages longitudinaux et transversaux présentaient une répartition des efforts semblables. De plus, l'utilisation de platelages mixtes, condition difficile à réaliser techniquement vu l'écart de gradients thermique entre l'aluminium et l'acier, n'amène pas d'avantages notables. Ainsi l'utilisation de platelages non mixtes longitudinaux, tel que préconisée par le Ministère, est tout à fait acceptable du point de vue répartition des efforts entre les poutres d'acier du tablier.

Enfin, les conclusions de cette étude s'appliquent uniquement aux ponts d'une seule portée comportant un maximum de trois voies de circulation. Elles s'appliquent pour les tabliers formés d'extrusions jointes entre elles de manière continue.

8 RÉFÉRENCES

CSA S6-2014. (2014). Code canadien sur le calcul des ponts routiers. Association Canadienne de normalisation. Toronto, Ontario, Canada.

CSA S6-2019. (2019). Code canadien sur le calcul des ponts routiers. Association Canadienne de normalisation. Toronto, Canada.

CSI (2018). SAP2000 Basic Analysis Reference Manual. Berkeley, California, USA: Computers and Structures inc.

Djedid, A, Desjardins V, Guillot M, Annan C-D & Fafard M, 2018. Développement d'une solution de platelage en aluminium pour pont routier à poutres d'acier avec action composite (R786.1). Université Laval, Québec, Canada.

El-Hage, B. 2019. « Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier » Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.

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. Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

Massicotte, B. (2018). Calcul des ponts – Concepts avancés. Éditions da Vinci, Laval, Canada.

Massicotte, B., El-Hage, B., Lagier, F., Fafard, M., Desjardins, V. 2019a. Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier. Rapport d'étape 1 : Sélection du concept. Rapport SR19-04. Groupe de recherche en génie des Structures, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.

Massicotte, B., El-Hage, B., Phan, A., Lagier, F., Fafard, M. 2019b. Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier. Rapport d'étape 2 : Approche méthodologique. Rapport SR19-05. Groupe de recherche en génie des Structures, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada..

Massicotte, B., El-Hage, B., Phan, A., Lagier, F., Fafard, M. 2020. Analyse de la répartition des charges routières pour les tabliers de type platelage en aluminium sur poutres en acier. Rapport d'étape 3 : Étude paramétrique. Rapport SR20-01. Groupe de recherche en génie des Structures, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.

Phan, A. 2018. « Développement de la méthode d'analyse simplifiée du code CSA-S6 pour les ponts de type dalle sur poutres » Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada.

Théoret, P. et Massicotte, B. (2012). Étude des ponts de type dalle sur poutres. Groupe de recherche en génies des structures. Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.