

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ET ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Rapport final du projet de recherche R777.1

Jean Baptiste BURGELIN, étudiant

Mario FAFARD, Ph.D., ing.

Michel GUILLOT, Ph.D., ing.

Université Laval

Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL

Réalisé pour le compte du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de
l'Électrification des transports

décembre 2017

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports et a été financée par la Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation à partir des fonds octroyés au Ministère dans le cadre de la Stratégie Québécoise de Développement de l'Aluminium (SQDA).

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, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec.

Remerciements

Les auteurs du présent rapport voudraient remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet de recherche. Nos sincères remerciements vont en particulier à Dominic Fortin, ingénieur à la Direction des Structures du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET), pour sa franche collaboration, son implication permanente, ses pertinentes remarques et sa disponibilité qui ont grandement permis à ce que ce projet arrive à terme avec succès. C'est l'occasion ici de remercier également le MTMDET et le SQDA (Stratégie québécoise de développement de l'aluminium) pour avoir financé ce projet de recherche. Notre profonde gratitude à l'égard du centre de recherche en aluminium - REGAL et l'Université Laval le cadre idéal et l'équipement fourni qui ont favorisé la réalisation du projet de recherche.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Dans le but de concurrencer l'utilisation des dalles de béton et du bois dans les tabliers de pont, on étudie dans ce mémoire la possibilité de dimensionner un tablier de pont tout en aluminium et économiquement intéressant. Le cahier des charges spécifie que le nouveau concept soit de 15 mètres de portée, fabricable en usine et assemblable en chantier. Ce mémoire s'inscrit plus globalement dans la stratégie québécoise de développement de l'aluminium (2015-2025) et est en partenariat avec le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports québécois (MTMDET).

Après avoir écarté la possibilité d'un platelage en aluminium totalement faisable au Québec de 15 mètres de long sans système d'attache entre les panneaux, on a proposé une conception innovante en ayant recours simplement à des extrusions dont le diamètre circonscrit est inférieur à 460 mm.

En voulant valider la conception au regard de la norme CAN/CSA S6-2014 et par la méthode des éléments finis, on s'est aperçu que le chapitre 17 concernant les ouvrages d'aluminium de ladite norme était très sécuritaire et parfois incomplet. On a proposé alors de nouvelles méthodes pour avoir accès aux fractions de charge de camion ou à la largeur effective pour un platelage en aluminium.

Une fois ces considérations techniques étudiées, une analyse économique a été menée, s'intéressant particulièrement aux coûts de production d'un platelage en aluminium et en le comparant au coût de production d'une dalle de béton ou d'un platelage en bois.

Enfin, fort des analyses faites au cours de ce mémoire, on a proposé une conception finale répondant aux critères de la norme et qui pourrait être économiquement viable.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1	INTRODUCTION	13
1.1.	MISE EN CONTEXTE.....	13
1.2.	PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	14
1.3.	CAHIER DES CHARGES	16
1.4.	PARAMÈTRES DE DÉPART POUR LE DÉVELOPPEMENT DU NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM.....	17
CHAPITRE 2	REVUE DE LA LITTÉRATURE	18
2.1.	LE MATÉRIAU ALUMINIUM	18
2.1.1.	<i>Propriétés de l'aluminium.....</i>	18
2.1.2.	<i>Les avantages de l'aluminium dans la construction</i>	19
2.1.3.	<i>Les inconvénients de l'aluminium dans la construction</i>	20
2.2.	L'UTILISATION DE L'ALUMINIUM DANS LE DOMAINE DES PONTS	20
2.3.	ÉTUDE DE LA CONCEPTION ET DES ÉTAPES DE FABRICATION DE LA REMORQUE « CAPACITY ».....	23
2.3.1.	<i>Approche sur la conception d'une remorque plancher coque</i>	23
2.3.2.	<i>Visite de l'usine Alutrec de Saint-Agathe-de-Lotbinière.....</i>	26
2.4.	UTILISATION DE L'ALUMINIUM EN CONSTRUCTION	26
2.4.1.	<i>Les extrusions.....</i>	26
2.4.2.	<i>Les types d'assemblage</i>	31
2.4.3.	<i>Les alliages.....</i>	33
2.4.4.	<i>Les appareils d'appui</i>	34
2.4.5.	<i>Les possibilités en transport.....</i>	35
CHAPITRE 3	DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS	36
3.1.	GÉNÉRALITÉS	36
3.2.	LES ÉTAPES ET PARTICULARITÉS DE LA MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS	36
3.2.1.	<i>Modélisation géométrique.....</i>	36
3.2.2.	<i>Le maillage.....</i>	37
3.2.3.	<i>Loi de comportement et propriétés mécaniques des matériaux</i>	37
3.2.4.	<i>Détermination des conditions aux limites.....</i>	38
3.2.5.	<i>Détermination du chargement.....</i>	39
3.2.6.	<i>Résolution et post-traitement.....</i>	40
3.3.	CONCLUSION	40
CHAPITRE 4	ANALYSE DES POSSIBILITÉS DE CONCEPT DE PONT TOUT ALUMINIUM.....	41
4.1.	COMPARAISON PLATELAGES TRANSVERSAUX ET LONGITUDINAUX	41
4.1.1.	<i>Rigidité flexionnelle des extrusions du platelage.....</i>	41
4.1.2.	<i>Platelage transversal</i>	41
4.1.3.	<i>Platelage longitudinal.....</i>	42
4.2.	POSSIBILITÉ DE TABLIER DE PONT A CAISSON TOUT ALUMINIUM	44
4.2.1.	<i>Conception d'un pont de type caisson</i>	44
4.2.2.	<i>Analyse du tablier de pont à caisson tout aluminium.....</i>	47
4.2.3.	<i>Faisabilité.....</i>	49
4.2.4.	<i>Conclusion.....</i>	49

4.3.	CONCEPT DE TABLIER TOUT ALUMINIUM POUVANT ÊTRE ENTIÈREMENT FABRIQUE AU QUÉBEC	49
4.3.1.	<i>Introduction</i>	49
4.3.2.	<i>Concept de platelage avec des extrusions de diamètre circonscrit 230 mm (9 pouces).....</i>	50
4.3.3.	<i>Analyse du concept de tablier de pont avec des extrusions de 230 mm de diamètre circonscrit (9 pouces).....</i>	52
4.3.4.	<i>Conclusion</i>	54
CHAPITRE 5	PROPOSITION D'UNE NOUVELLE CONCEPTION DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM..	55
5.1.	INTRODUCTION	55
5.2.	LE PLATELAGE.....	55
5.3.	LA LIAISON PLATELAGE POUTRE	60
5.4.	LA PARTIE POUTRE	63
5.4.1.	<i>Comparaison préliminaire poutre en acier et poutre en aluminium.....</i>	63
5.4.2.	<i>Conception des poutres d'aluminium</i>	64
5.5.	ASSEMBLAGE DES PANNEAUX DE PLATELAGE AU CHANTIER	69
CHAPITRE 6	ANALYSE DES RÉSULTATS ÉLÉMENTS FINIS VIS-À-VIS DU CALCUL DE LA NORME CAN/CSA S6-2014.....	71
6.1.	FRACTIONS DE CHARGE DE CAMION RECOMMANDÉES POUR LES TABLIERS À PLATELAGE EN ALUMINIUM.....	71
6.1.1.	<i>Fractions de charge de camion selon la norme CAN/CSA S6-2014.....</i>	71
6.1.2.	<i>Proposition d'une fraction de charge de camion au moyen des éléments finis.....</i>	76
6.2.	LARGEUR EFFECTIVE POUR LES PLATELAGES TREILLIS	83
6.2.1.	<i>Définition du concept d'aire effective pour les platelages treillis.....</i>	83
6.2.2.	<i>Description de la méthode pour l'évaluation de l'aire effective</i>	85
6.2.3.	<i>Résultats</i>	86
6.2.4.	<i>Conclusion</i>	91
6.3.	FATIGUE DANS LES TABLIERS DE PONT TOUT ALUMINIUM	91
6.3.1.	<i>Généralités.....</i>	91
6.3.2.	<i>Analyse de la conception en fatigue pour le platelage AlumaBridge GEN I.....</i>	93
6.3.3.	<i>Analyse en fatigue du nouveau platelage encastré.....</i>	94
6.3.4.	<i>Conclusion</i>	97
CHAPITRE 7	ANALYSE ÉCONOMIQUE.....	98
7.1.	ANALYSE DES COÛTS POUR LES PLATELAGES D'ALUMINIUM.....	98
7.1.1.	<i>Généralités.....</i>	98
7.1.2.	<i>Analyse des coûts par Roy (1999).....</i>	98
7.1.3.	<i>Analyse des coûts pour la production des platelages en aluminium par Viami International Inc. et The Technology Strategies Group.....</i>	101
7.2.	COMPARAISON DU COÛT THÉORIQUE DES PLATELAGES	103
7.2.1.	<i>Comparaison entre platelage en aluminium et dalle de béton armé</i>	103
7.2.2.	<i>Comparaison entre platelage en aluminium et platelage de bois.....</i>	104
7.2.3.	<i>Conclusion préliminaire sur les coûts théoriques des différentes solutions de platelage de pont</i>	104
7.3.	ESTIMATION PRÉLIMINAIRE DU COÛT DU NOUVEAU CONCEPT DE PONT TOUT ALUMINIUM.....	104
7.3.1.	<i>Estimation du coût des extrusions.....</i>	104

7.3.2.	<i>Estimation du coût du soudage</i>	106
7.3.3.	<i>Conclusion</i>	109
CHAPITRE 8	CONCEPT FINAL	110
8.1.	DESCRIPTION DE LA CONCEPTION FINALE	110
8.2.	DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE.....	113
8.2.1.	<i>Description du modèle</i>	113
8.2.2.	<i>Résultats</i>	114
8.2.3.	<i>Conclusion</i>	117
8.3.	CALCUL DES FRACTIONS DE CHARGE DE CAMION	117
8.3.1.	<i>Cas 1</i>	117
8.3.2.	<i>Cas 2</i>	118
8.3.3.	<i>Cas 3</i>	119
8.3.4.	<i>Conclusion</i>	119
8.4.	CALCUL DE LA LARGEUR EFFECTIVE	120
8.5.	ELUL1 EN FLEXION.....	120
8.5.1.	<i>Moment sollicitant</i> :.....	120
8.5.2.	<i>Moment résistant</i> :.....	121
8.6.	ÉLUT 1 EN FLEXION	122
8.6.1.	<i>Moment sollicitant</i> :.....	122
8.6.2.	<i>Critère flèche-première fréquence de vibration</i>	122
CHAPITRE 9	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	124
RÉFÉRENCES		126
ANNEXE 1	RAPPORT DE LA VISITE DE L'USINE ALUTREC	130
ANNEXE 2	DÉMONSTRATION DU CALCUL DES FRACTIONS DE CHARGE DE CAMION EN FLEXION PAR RATIO DE CHARGES	136
EXEMPLE 1		136
EXEMPLE 2		139
EXEMPLE 3		141
EXEMPLE 4		142
EXEMPLE 5		143
CONCLUSION		144
ANNEXE 3	ANALYSE DES COÛTS POUR LA PRODUCTION DES PLATELAGES EN ALUMINIUM PAR VIAMI INTERNATIONAL INC. ET THE TECHNOLOGY STRATEGIES GROUP EN 2013	145
ANNEXE 4	FATIGUE POUR LE PLATELAGE ALUMABRIDGE GEN I	147
ANNEXE 5	DÉTAIL DU COÛT DU BÉTON POUR LES TABLIERS À DALLE SUR POUTRE	148
ANNEXE 6	BROCHURE TECHNIQUE DES BOULONS « AVEUGLES » HOLLO-BOLT DE LA COMPAGNIE LINDAPTER	149

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES UTILISÉES POUR LA CONCEPTION (FAUCHER, 1995).....	18
TABLEAU 2.2 RÉSULTATS DE L'ANALYSE COMPARATIVE DES STRUCTURES AVEC LA CHARGE CONCENTRÉE (MÉTHOT, 2008)	24
TABLEAU 2.3 RÉSULTATS DE L'ANALYSE COMPARATIVE AVEC LA CHARGE RÉPARTIE (MÉTHOT, 2008)	24
TABLEAU 2.4 RÉSISTANCES MÉCANIQUES DE PRODUITS CORROYÉS COURANTS (CAN/CSA S6-2014, 2014).....	34
TABLEAU 4.1 AIRE MAXIMALE DE L'EXTRUSION POUR UNE MASSE DE 100 KG	50
TABLEAU 5.1 CARACTÉRISTIQUES DE PRESSES À EXTRUDER EXISTANTES OU AYANT EXISTÉES DANS LE NORD-EST DE L'AMÉRIQUE DU NORD (GUILLOT, 2013).....	57
TABLEAU 5.2 COMPARAISON DES PRESSES QUÉBÉCOISES EXISTANTES ET DE LA PRESSE DE GRANDE CAPACITÉ CHOISIE COMME POTENTIELLEMENT IMPLANTABLE AU QUÉBEC (GUILLOT, 2013).....	58
TABLEAU 6.1 D_T POUR LES PLATELAGES EN ALUMINIUM SUR DES POUTRES D'ACIER (CAN/CSA S6-2014 TABLEAU 5.10)	73
TABLEAU 6.2 COEFFICIENTS D_T , λ , γ_c ET γ_e POUR LES PONTS À DALLE SUR POUTRES DANS LE CAS DES CLASSES DE ROUTE A ET B (CAN/CSA S6-2014 TABLEAU 5.3)	74
TABLEAU 6.3 D_T POUR LES PLATELAGES EN MADRIERS DE BOIS (CAN/CSA S6-2014 TABLEAU 5.8)	75
TABLEAU 6.4 FRACTIONS DE CHARGE DE CAMION EN FLEXION POUR UN PLACEMENT SYMÉTRIQUE ET JUXTAPOSÉ À LA LIGNE DE CENTRE DES CAMIONS CL-625.....	79
TABLEAU 6.5 FRACTIONS DE CHARGE DE CAMION NON PONDÉRÉS EN FLEXION PAR POUTRE EN FONCTION DU PLACEMENT LATÉRAL DES CAMIONS CL-625.....	80
TABLEAU 6.6 RÉSULTATS AVEC CONCENTRATION DE CONTRAINTE DU RATIO A_{EFF}/A_{TOTALE}	89
TABLEAU 6.7 RÉSULTATS SANS CONCENTRATION DE CONTRAINTE DU RATIO A_{EFF}/A_{TOTALE}	90
TABLEAU 7.1 COÛTS DE CONCEPTION ET DE PRODUCTION D'UN PLATELAGE DE PONT EN ALUMINIUM (VIAMI INTERNATIONAL INC ET THE TECHNOLOGY STRATEGIES GROUP, 2013)	102
TABLEAU 7.2 COÛT DE PRODUCTION D'UN PLATELAGE DE PONT EN ALUMINIUM.....	102
TABLEAU 7.3 ESTIMATION BUDGÉTAIRE POUR DES EXTRUSIONS EN 6063-T6 (ENTREPRISE 1)	105
TABLEAU 7.4 ESTIMATION BUDGÉTAIRE POUR DES EXTRUSIONS EN 6063-T6 (ENTREPRISE 2)	105
TABLEAU 7.5 LONGUEUR DE SOUDURE ÉQUIVALENTE	107
TABLEAU 7.6 COÛTS INITIAUX DES TESTS ET AJUSTEMENTS PRÉLIMINAIRES.....	108
TABLEAU 7.7 COÛT DU SOUDAGE PAR PLATELAGE	108
TABLEAU 8.1 PROPRIÉTÉS DE LA TRAVÉE	111
TABLEAU 8.2 CAS 1. FRACTION DE CHARGE DE CAMION	118
TABLEAU 8.3 CAS 2. FRACTION DE CHARGE DE CAMION	118
TABLEAU 8.4 CAS 3. FRACTION DE CHARGE DE CAMION	119
TABLEAU A2.1 COMPARAISON DES RATIOS DES MOMENTS ET DES RATIOS DES RÉACTIONS D'APPUIS POUR L'EXEMPLE 1	139
TABLEAU A2.2 COMPARAISON DES RATIOS DES MOMENTS ET DES RATIOS DES RÉACTIONS D'APPUIS POUR L'EXEMPLE 2	140
TABLEAU A2.3 COMPARAISON DES RATIOS DES MOMENTS ET DES RATIOS DES RÉACTIONS D'APPUIS POUR L'EXEMPLE 3	141
TABLEAU A2.4 COMPARAISON DES RATIOS DES MOMENTS ET DES RATIOS DES RÉACTIONS D'APPUIS POUR L'EXEMPLE 4	142
TABLEAU A2.5 COMPARAISON DES RATIOS DES MOMENTS ET DES RATIOS DES RÉACTIONS D'APPUIS POUR L'EXEMPLE 5	143

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 MISE EN PLACE D'UN PLATELAGE EN ALUMINIUM (SAPA GROUP)	19
FIGURE 2.2 COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER ORTHOTROPE EN ALUMINIUM (ARRIEN, 1995)	22
FIGURE 2.3 COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER DE SVENSSON (ARRIEN, 1995)	22
FIGURE 2.4 PROFIL DE L'EXTRUSION TRANSVERSALE (MÉTHOT, 2008)	23
FIGURE 2.5 COMPARAISON DES CONTRAINTES EXPÉRIMENTALES ET ÉLÉMENTS FINIS (PARENTEAU, 2010)	25
FIGURE 2.6 REMORQUE CAPACITY DE LA COMPAGNIE ALUTREC	26
FIGURE 2.7 PRESSE DE 3000 TONNES DE PEXAL TECALUM (PEXAL TECALUM, 2014)	27
FIGURE 2.8 LA TECHNOLOGIE D'EXTRUSION (AZO MATERIALS, 2017)	28
FIGURE 2.9 EXTRUSION ALUMABRIDGE 8PO ANCIENNEMENT ALUMADECK (ALUMABRIDGE, 2017)	29
FIGURE 2.10 EXTRUSION ALUMABRIDGE 5PO GEN I (ALUMABRIDGE, 2017)	30
FIGURE 2.11 EXTRUSION JAPONAISE (NIPPON LIGHT METAL COMPAGNY, 2011)	30
FIGURE 2.12 EXTRUDABILITÉ DES ALLIAGES D'ALUMINIUM (SUBSTECH, 2012)	31
FIGURE 2.13 RIVETAGE DE L'ÂME D'UNE POUTRE EN I POUR LA REMORQUE CONVENTIONNELLE ALUTREC	32
FIGURE 2.14 APPAREIL D'APPUI DU PONT SAINT-AMBROISE (CENTRE DE RECHERCHE SUR L'ALUMINIUM -REGAL)	35
FIGURE 3.1 MAILLAGE DU PLATELAGE AVEC DES ÉLÉMENTS HEX20	37
FIGURE 3.2 CONTRAINTE DE VON MISES ; CONCENTRATION DE CONTRAINTES AUX APPUIS	39
FIGURE 3.3 CHARGEMENT EN FLEXION ; MODÉLISATION DES ESSIEUX AVANT DU CAMION CL-625	40
FIGURE 4.1 EXEMPLE D'EXTRUSION DE LIAISON AU-DESSUS DES POUTRES	44
FIGURE 4.2 EXTRUSION DE PLATELAGE INITIALEMENT ENVISAGÉE	45
FIGURE 4.3 TABLIER TOUT ALUMINIUM À CAISSON	46
FIGURE 4.4 CONCEPT DE TABLIER DE PONT CAISSON TOUT ALUMINIUM	46
FIGURE 4.5 CONTRAINTE DE VON MISES DANS LE TABLIER TOUT ALUMINIUM À CAISSON À L'ÉTAT LIMITE ULTIME	48
FIGURE 4.6 PROPOSITION D'EXTRUSION POUR UN PLATELAGE QUÉBÉCOIS (DIAMÈTRE CIRCONSCRIT : 227 MM)	51
FIGURE 4.7 SECTION DE TABLIER AVEC DES COMPOSANTS POUVANT ÊTRE ENTièrement FABRIQUÉS AU QUÉBEC (PRESSE DE 3000 TONNES)	52
FIGURE 4.8 VUE DU DESSUS D'UN PANNEAU (CORRESPOND À UNE VOIE) CHARGÉ PAR UN CAMION CL-625 PLACÉ LONGITUDINALEMENT POUR MAXIMISER LE MOMENT DE FLEXION (LES ZONES ROUGES CORRESPONDENT AUX EMPREINTES DES ROUES OÙ LES CHARGES SONT APPLIQUÉES)	53
FIGURE 4.9 COUPE TRANSVERSALE D'UN PANNEAU (CORRESPOND À UNE VOIE) CHARGÉ PAR UN CAMION CL-625 PLACÉ TRANSVERSALEMENT AU CENTRE DE LA VOIE	53
FIGURE 4.10 CONTRAINTE DE VON MISES DANS LE PLATELAGE VIS-À-VIS D'UN ESSIEU À L'ÉLUL1 (EN ROUGE LES ZONES OÙ LES VALEURS DE LA CONTRAINTE DE VON MISES EST SUPÉRIEURE À 86,25 MPA)	53
FIGURE 5.1 PROPOSITION D'EXTRUSION TYPIQUE POUR UN PLATELAGE QUÉBÉCOIS	60
FIGURE 5.2 PROPOSITION D'EXTRUSION DE LIAISON POUR UN TABLIER TOUT ALUMINIUM	62
FIGURE 5.3 PROPOSITION DE PLATELAGE POUR TABLIER TOUT ALUMINIUM	62
FIGURE 5.4 PROPOSITION DE CONCEPT DE POUTRE TOUT ALUMINIUM	65
FIGURE 5.5 CLAVETAGE ET BOULONNAGE	66
FIGURE 5.6 SCHÉMA (VUE DU DESSUS) DE DEUX EXTRUSIONS PLACÉES PARALLÈLEMENT ET USINÉES EN MÊME TEMPS	67
FIGURE 5.7 SCHÉMA (VUE DE PROFIL) DE DEUX EXTRUSIONS SUPERPOSÉES ET PRÉCÉDEMMENT USINÉES	67
FIGURE 5.8 SCHÉMA (VUE DE PROFIL) DE DEUX EXTRUSIONS SUPERPOSÉES ET PRÉCÉDEMMENT USINÉES AVEC INTRODUCTION DES CLAVETTES ET REPRÉSENTATION DES JEUX ENTRE CLAVETTES ET EXTRUSIONS	68
FIGURE 5.9 SOLUTION AVEC EXTRUSIONS À DENT	68
FIGURE 5.10 TRANSMISSION DES EFFORTS DANS UNE POULIE COURROIE TRAPÉZOÏDALE	69
FIGURE 5.11 ASSEMBLAGE DES PANNEAUX DE PLATELAGE DU PONT SAINT-AMBROISE (BEAULIEU & INTERNOSCIA, 2015) ...	69

FIGURE 5.12 PROPOSITION D'ASSEMBLAGE DES PANNEAUX DE TABLIER TOUT ALUMINIUM AU CHANTIER	70
FIGURE 6.1 VUE DU DESSUS D'UNE VOIE DE PONT CHARGÉE TRANSVERSALEMENT POUR QUE LE GABARIT DU CAMION CL-625 SOIT JUXTAPOSÉ À LA LIGNE DE CENTRE AVEC UNE SYMÉTRIE AU NIVEAU DE LA LIGNE DE CENTRE	78
FIGURE 6.2 EXEMPLE 2 : PLACEMENT TRANSVERSAL DES CAMIONS CL-625	80
FIGURE 6.3 EXEMPLE 3 : PLACEMENT TRANSVERSAL DES CAMIONS CL-625	80
FIGURE 6.4 FRACTIONS DE CHARGE DE CAMION NON PONDÉRÉS EN FLEXION PAR POUTRE EN FONCTION DU PLACEMENT LATÉRAL DES CAMIONS CL-625	81
FIGURE 6.5 ILLUSTRATION DE LA LARGEUR EFFECTIVE (CHIEWANICHAKORN, 2004) (CHEN, 2007)	84
FIGURE 6.6 DÉFINITION DE LA LARGEUR TRIBUTAIRE B	85
FIGURE 6.7 MAILLAGE RÉGULIER DU NOUVEAU PLATELAGE EN ALUMINIUM DE 200 MM DE HAUTEUR	86
FIGURE 6.8 APPLICATION DES CHARGES ET SECTION CONSIDÉRÉE POUR L'AIRE EFFECTIVE. VUE DU DESSUS	87
FIGURE 6.9 VUE DU DESSOUS DU TABLIER : PRÉSENCE DE TRACTION DANS LE PLATELAGE SOUS LES CHARGES DE ROUES.....	87
FIGURE 6.10 CONTRAINTE -YY SUR ÉLÉMENTS DANS LE PLATELAGE À LA SECTION OÙ LE MOMENT FLÉCHISSANT EST MAXIMAL	88
FIGURE 6.11 CONTRAINTE -YY DANS L'AILE INFÉRIEURE DU PLATELAGE AU DROIT DE LA POUTRE	89
FIGURE 6.12 COURBES SN DES COMMENTAIRES DE LA NORME CAN/CSA S6-2014 C17.28 POUR LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE DÉTAILS POUR LES OUVRAGES EN ALUMINIUM.....	92
FIGURE 6.13 CONTRAINTE DE VON MISES DANS L'EXTRUSION ALUMABRIDGE GEN I SOUS CHARGE DE FATIGUE (BEAULIEU & INTERNOSCIA, 2015)	93
FIGURE 6.14 CONTRAINTE DE VON MISES POUR LE DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE DU NOUVEAU PLATELAGE	95
FIGURE 6.15 CONTRAINTE DE VON MISES POUR LE DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE DU NOUVEAU PLATELAGE, DÉTAIL A	96
FIGURE 6.16 CONTRAINTE DE VON MISES POUR LE DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE DU NOUVEAU PLATELAGE, DÉTAIL C	96
FIGURE 6.17 CONTRAINTE σ_{XX} POUR LE DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE DU NOUVEAU PLATELAGE, DÉTAIL A	97
FIGURE 7.1 COÛT D'UN TABLIER AVEC POUTRES À ÂMES PLEINES DE 15 MÈTRES EN FONCTION DU TYPE DE PLATELAGE (ROY, 1999)	98
FIGURE 7.2 COÛT D'UN PONT DE TYPE PRATT DE 15 MÈTRES EN FONCTION DU RAPPORT D'ÉLANCEMENT DES POUTRES (ROY, 1999)	99
FIGURE 7.3 COÛT D'UN PONT DE TYPE PRATT DE 15 MÈTRES EN FONCTION DE L'ESPACEMENT DES POUTRES (ROY, 1999) ..	100
FIGURE 7.4 MACHINE À SOUDER AUTOMATISER (HUAYUAN WELDER, 2016).....	106
FIGURE 7.5 SOUDURE DE 20 MM DE PROFONDEUR AVEC 5 ÉTAGES DE PASSES ET 15 PASSES	106
FIGURE 7.6 DÉTAILS DE SOUDURE POUR LE PLATELAGE.....	107
FIGURE 8.1 COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER DE PONT AVEC PENTE DE 2% POUR LE DRAINAGE DES EAUX	110
FIGURE 8.2 COUPE TRANSVERSALE DE LA TRAVÉE POUR LE DIMENSIONNEMENT SUIVANT LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE.....	111
FIGURE 8.3 EXTRUSION DE PLATELAGE.....	112
FIGURE 8.4 EXTRUSION DE LIAISON.....	112
FIGURE 8.5 PORTION DE TABLIER SOUMIS AU PASSAGE D'UN GROUPE D'ESSIEU EN TANDEM DU CAMION CL-625 PONDÉRÉ PAR UN CMD DE 1,4	113
FIGURE 8.6 VUE DU DESSUS DU TABLIER. VÉRIFICATION DU MÉTAL DE BASE. COUPE 1 SOUS ESSIEU	114
FIGURE 8.7 COUPE 1. MÉTAL DE BASE. EXTRUSION DE LIAISON POUTRE/PLATELAGE AVEC MAILLAGE APPARENT.....	115
FIGURE 8.8 COUPE 1. ZAT. CONTRAINTE DE VON MISES. EXTRUSION DE LIAISON POUTRE/PLATELAGE	116
FIGURE 8.9 COUPE 1. ZAT. CONTRAINTE DE XX. EXTRUSION DE LIAISON POUTRE/PLATELAGE	116
FIGURE 8.10 COUPE 1. ZAT. CONTRAINTE DE XX. PLATELAGE ENTRE POUTRES	117
FIGURE 8.11 CAS 1. FRACTION DE CHARGE DE CAMION	117
FIGURE 8.12 CAS 2. FRACTION DE CHARGE DE CAMION	118
FIGURE 8.13 CAS 3. FRACTION DE CHARGE DE CAMION	119
FIGURE A1.1 : ÂME RIVETÉE DES POUTRES EN I	131
FIGURE A1.2 : SEMI-REMORQUE À 2 ESSIEUX : TYPE POUTRE EN I ET PLANCHER EXTRUDÉ	132

FIGURE A1.3 : REMORQUE CAPACITY D'ALUTREC.....	132
FIGURE A1.4 : EXTRUSIONS D'ALUMINIUM DE LA REMORQUE CAPACITY SOUDAGE MIG	133
FIGURE A1.5 : VUE DU CAISSON DE LA REMORQUE CAPACITY	133
FIGURE A1.6 : VUE DU « GOOSENECK » DE LA REMORQUE CAPACITY.....	134
FIGURE A1.7 : VUE DU SOUDAGE ENTRE DES EXTRUSIONS TRANSVERSALES ET LONGITUDINALES DE HAUTEURS DIFFÉRENTES	134
FIGURE A2.1 VUE DE CÔTÉ DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE 2000 MM DE PORTÉE AVEC APPLICATION DE LA CHARGE AU DROIT DE LA POUTRE 3	137
FIGURE A2.2 PLAN DE LA SECTION DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE L'EXEMPLE 1.....	137
FIGURE A2.3 VUE DU DESSUS DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE 2000 MM DE PORTÉE AVEC APPLICATION DE LA CHARGE AU DROIT DE LA POUTRE 3	138
FIGURE A2.4 VUE DE CÔTÉ DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE L'EXEMPLE 1 AVEC APPLICATION DE LA CHARGE EXCENTRÉE	139
FIGURE A2.5 VUE DU DESSUS DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE L'EXEMPLE 1 AVEC APPLICATION DE LA CHARGE EXCENTRÉE	140
FIGURE A2.6 VUE DU DESSUS DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE 5000 MM DE PORTÉE AVEC 12 CHARGES DE 2000 N	141
FIGURE A2.7 VUE DU DESSUS DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE 5000 MM DE PORTÉE AVEC 4 CHARGES DE 500 N ET 8 CHARGES DE 3000 N.....	142
FIGURE A2.8 VUE DU DESSUS DU TABLIER TOUT ALUMINIUM DE 5000 MM DE PORTÉE AVEC 3 CHARGES DE 5000 N	143

LISTE DES ABREVIATIONS

Les articles cités dans cette liste font référence à la norme CAN/CSA S6-2014

A_{eff}	Aire effective du platelage
b	Largeur de platelage ou de dalle tributaire à la poutre
b_{eff}	Largeur effective
C_{slab}	Force de compression dans une dalle ou dans un platelage
CMD	Coefficient de majoration dynamique
D_T	Largeur de répartition des charges des camions, m
DJMA	Débit journalier moyen annuel, volume total de circulation pendant une année, divisé par le nombre de jours dans l'année.
E	Module d'Young (ou Module d'élasticité), MPa
ÉLUT	État limite d'utilisation
ÉLUL	État limite ultime
ÉLF	État limite de fatigue
FSW	Soudage friction-malaxage (<i>Friction Stir Welding</i>)
F_T	Fraction de charge de camion (anciennement facteur d'essieu)
F_u	Résistance ultime minimale spécifiée en traction, MPa
F_{wu}	Résistance ultime dans la zone affectée par la chaleur (ZAT), MPa
F_{wy}	Limite élastique dans la zone affectée par la chaleur (ZAT), MPa
F_y	Limite élastique minimale spécifiée en traction, MPa
L_e	Longueur de travée équivalente spécifiée pour être utilisée dans la méthode de l'analogie de la poutre de l'article 5.6, m
MÉSI	Ministère de l'économie, de la science et de l'innovation
MTMDET	Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports
n	Nombre de voies de calcul d'un pont conformément à l'article 3.8.2 pour la conception des ponts et à l'article 14.9.4.1 pour l'évaluation des ponts
N	Nombre de poutres longitudinales sur la largeur B du tablier du pont
R_L	Facteur de modification de charge tenant compte des situations de chargement multiple de voies sur un pont, selon l'article 3.8.4.2 pour la conception ou l'article 14.9.4 pour l'évaluation
S	Espacement entre axes des poutres longitudinales d'un pont à dalle sur poutres, m
SQDA	Stratégie québécoise de développement de l'aluminium
W_e	Largeur d'une voie de calcul, conformément à l'article 3.8.2 pour la conception et à l'article 14.9.4 en évaluation, m
γ_c	Coefficient de modification de charge de camion pour les ponts à dalle sur poutres
λ	Paramètre de largeur de voie
μ	Coefficient de modification de largeur de voie
σ_i	Contrainte d'indice i
Φ_u	Coefficient de résistance lié à la résistance ultime
Φ_y	Coefficient de résistance lié à la limite élastique

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte

Ce projet s'inscrit dans la stratégie québécoise de développement de l'aluminium (SQDA) (Gouvernement du Québec, 2015) qui s'étend sur la période 2015-2025. Plus spécifiquement, il s'inscrit dans la mesure 9 de l'axe 1 : "Mettre en place un environnement favorable à la transformation de l'aluminium" de la SQDA. La mesure 9 consiste à favoriser l'utilisation de l'aluminium dans les infrastructures du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET). Une somme de 4,6 M\$ sera investie par le gouvernement du Québec dans la période 2015-2018 pour la mesure 9.

En 2013, il y a au Canada environ 56 000 ponts, érigés principalement entre les années 1950 et 1970 (Miami International Inc et The Technology Strategies Group, 2013). Dans les deux prochaines décennies, un grand nombre d'entre eux atteindront la limite de leur durée de vie utile et devront être remplacés ou réhabilités. Cette réalité amène le gouvernement québécois à chercher des solutions durables et compétitives pour le remplacement de ces ponts et à investir dans la recherche.

Les analyses préliminaires (Miami International Inc et The Technology Strategies Group, 2013) ont montré que les tabliers de ponts en aluminium seraient *a priori* compétitifs pour les ponts à portée simple allant de 10 à 35 mètres. Ils sont alors en concurrence avec les ponts acier-bois et les ponts à poutres en acier et dalle en béton armé, d'après les recommandations du manuel de conception des structures de 2016 (MTMDET, 2016).

Pour concurrencer les structures utilisant principalement l'acier, le béton et le bois, l'aluminium semble être un matériau envisageable. En effet, sa production est importante au Québec avec 90% de la production canadienne (SQDA, 2015) et ses caractéristiques intrinsèques sont compatibles avec le climat nordique. En particulier, et contrairement à l'acier et au béton, les caractéristiques de l'aluminium ne sont pas altérées lorsque les températures sont froides et l'aluminium résiste à la corrosion atmosphérique et donc aux sels de déglacage. Tous ces avantages et caractéristiques seront décrits à la section 2.1.

L'utilisation de l'aluminium dans le domaine des ponts peut se faire de plusieurs manières. En réhabilitation d'une part, en remplaçant un platelage existant par un platelage d'aluminium léger, ce qui permettrait d'augmenter la capacité portante du tablier en réduisant son poids propre. Une autre possibilité est d'utiliser l'aluminium dans un tablier de pont neuf. Dans ce rapport, l'aluminium est utilisé à la fois pour le platelage, mais aussi pour le système porteur.

Le fait d'utiliser un seul matériau permet de développer une action composite, c'est-à-dire de garantir l'unité structurale entre le platelage et le système porteur, sans faire face

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

à la différence de dilatation thermique entre différents matériaux, et permet d'éviter une éventuelle corrosion galvanique. Développer l'action composite, dans ce projet, consiste à éviter le glissement entre le platelage et le système porteur, afin que les deux éléments résistent conjointement à l'action des charges appliquées. Cela s'obtient à l'aide d'une connexion en cisaillement suffisante. En développant cette action mixte, le platelage agit structuralement et participe à la rigidité et à la résistance en flexion du tablier.

Une des forces de l'aluminium, par rapport aux matériaux de construction usuels, est d'être léger, ce qui fait en sorte que les structures conçues avec ce matériau sont facilement transportables et assemblables en chantier. De plus, contrairement aux dalles de béton coulées en chantier, pour lesquelles le coffrage, la mise en place et la cure du béton nécessitent généralement plusieurs semaines au total, la conception proposée dans ce projet doit permettre la fabrication en usine et l'assemblage rapide en chantier. Cela permettrait de diminuer grandement les coûts et les inconvénients associés aux entraves à la circulation, pour la société et les usagers du pont.

1.2. Problématique et objectifs

La conception d'un tablier de pont totalement en aluminium est *a priori* tout à fait faisable sur le plan technique. On a qu'à penser au pont d'Arvida pour s'en convaincre. La problématique réside dans la démonstration des avantages économiques dont le MTMDT et la société en général pourraient profiter si l'on développait et construisait un tel type de tablier de pont. Pour cela, il faut considérer l'ensemble des coûts sur la durée de vie utile du pont, et non seulement le coût initial : même si un tablier de pont en aluminium est plus cher au départ, il peut s'avérer rentable sur la durée de vie utile de l'ouvrage, si on considère, entre autres, les coûts d'entretien plus faibles pour ce type de tablier ainsi que pour les unités de fondation qui seraient mieux protégées par celui-ci que par des tabliers de pont construits avec des matériaux traditionnels. Les coûts secondaires associés aux entraves à la circulation lors de la construction du pont et lors d'éventuelles interventions d'entretien pourraient également être significativement réduits, en particulier pour les interventions d'entretien qui devraient être moins nombreuses.

Dans un premier temps, un tablier de pont à caisson tout aluminium a été étudié. L'inspiration pour développer ce nouveau concept de tablier provient de la remorque « Capacity » d'Alutrec (Alutrec, 2016). En effet, cette dernière est très concurrentielle dans le domaine des remorques et a été développée en lien avec différentes universités, dont l'Université Laval, et des professeurs faisant partie du Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL. Il existe des similitudes entre les remorques et les ponts : en particulier les problématiques de flèche pour une portée d'environ 12 à 15 mètres. Toutefois, les conclusions de l'étude préliminaire exposées dans la section 4.2 ont amené à revoir le concept.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Dans un second temps, les possibilités d'extrusion au Québec ont été analysées avec pour objectif de créer un concept de tablier de pont totalement faisable dans la province. Toutefois, les résultats pour un tel concept, exposés à la section 4.3, ont montré l'incapacité de produire un pont développant l'action composite avec un platelage longitudinal et une portée de 15 mètres avec des extrusions uniquement produites au Québec en 2017.

Ensuite, un nouveau concept de tablier de pont tout aluminium a été développé à l'aide d'extrusions dont les éléments porteurs ne sont pas des caissons. Cette nouvelle conception est décrite dans le Chapitre 5. On a alors fait l'hypothèse qu'une presse à extruder de capacité suffisante serait éventuellement implantée au Québec, en s'inspirant des presses à extruder existantes dans le nord-est de l'Amérique du Nord.

Dans un quatrième temps, on a cherché, à l'aide des modèles éléments finis développés au Chapitre 3, à trouver les caractéristiques de la nouvelle conception de tablier de pont tout aluminium, pour appliquer la norme CAN/CSA S6-2014. Ces recherches ont amené à remettre parfois en cause les valeurs proposées par les chapitres 5 et 17 de la norme CAN/CSA S6-2014 sur l'aluminium qui sont à l'heure actuelle très sécuritaires. En effet, l'apparition du chapitre sur l'aluminium date de 2011 et toutes les valeurs qu'il propose n'ont pas fait l'objet d'études spécifiques. La volonté d'utiliser l'aluminium dans le domaine des ponts est récente et novatrice. On analyse, dans le Chapitre 6, la fraction de charge de camion du nouveau concept trouvée par la méthode des éléments finis par rapport à celle donnée dans la norme. Le concept de largeur effective pour un treillis d'aluminium, qui n'est pas défini dans la norme, et la fatigue dans le platelage sont également analysés dans le Chapitre 6.

Enfin, dans le Chapitre 7, on établit une analyse économique du nouveau concept en se focalisant sur les coûts de fabrication. L'approche utilisée permet de comparer le coût de fabrication du nouveau concept par rapport à ceux connus pour un tablier avec poutres d'acier et dalle de béton, et aussi pour un tablier avec poutres en acier et platelage en bois.

Ce rapport vise à répondre à l'objectif général suivant :

- Établir un concept de tablier de pont tout aluminium, fabriqué en usine, transportable et assemblable sur le terrain.

Cet objectif général est subdivisé en objectifs spécifiques :

- Déterminer une géométrie type tablier de pont tenant compte des contraintes associées à un assemblage sur le terrain ;
- Déterminer les meilleurs éléments composant sa structure ;
- Déterminer les meilleurs procédés de fabrication de ces éléments ;
- Déterminer les meilleurs procédés d'assemblage de ces éléments ;
- Estimer le coût de possession de l'ouvrage.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Au cours de ce rapport, différentes solutions pour répondre à ces objectifs seront proposées. L'objectif concernant le coût de possession n'a pas été totalement rempli, puisqu'on a pris en compte uniquement les coûts de fabrication du platelage. L'estimation du coût global de possession fait l'objet d'un projet de recherche indépendant (R787.1 *Analyse du coût total de possession sur le cycle de vie d'un pont routier à platelage en aluminium*).

1.3. Cahier des charges

Les paramètres qui ont guidé les travaux de ce projet de recherche sont les suivants :

Portée simple de 15 mètres. Cette longueur est assez représentative des tabliers de pont à courte portée. C'est aussi une longueur pouvant être aisément transportée par camion. Enfin, au vu du volume des billettes (définition à la section 3.2) d'aluminium, cette longueur est proche du maximum pouvant être atteint pour des sections caractéristiques de platelage d'aluminium. Par exemple, pour le platelage de 5 pouces d'AlumaBridge la longueur maximale extrudable est d'environ 45 pieds (13,7 mètres). On cherche à faciliter la conception pour une augmentation de cette longueur à 35 mètres qui ne sera toutefois pas étudiée dans ce projet de recherche.

Fabricable en usine. En usine, le soudage peut être automatisé et devrait être de meilleure qualité que sur le chantier. En effet, des essais de contrôle qualité peuvent être développés et effectués.

Assemblable en chantier. Cela réduit considérablement les inconvénients pour les usagers car un tel type de tablier réduirait le temps de fermeture de la route lors de la construction du pont et diminuerait en conséquence les coûts associés à la main d'œuvre et aux équipements en chantier.

Productible au Québec. Cela représente une contrainte importante en matière de capacité d'extrusion, mais développe l'utilisation de l'aluminium comme matériau structural dans la province (SQDA, 2015). À moyen terme cela permettrait de diminuer les coûts de production du tablier et de construction d'un pont avec ce type de tablier.

Modulaire. Le tablier sera séparé en panneaux indépendants, chaque panneau correspondant à une voie. Les panneaux seront transportés séparément en chantier et assemblés sur place. On débute d'abord le développement du concept en considérant deux voies de circulation sur le pont, mais on pourrait éventuellement ajouter un ou plusieurs modules de tablier si la route que supporte un pont donné compte plus de deux voies de circulation.

Action composite. L'action composite se fait usuellement entre deux matériaux distincts (dalle de béton relié à des poutres en acier par l'intermédiaire de goudrons). Ici, par analogie, on nomme action composite le fait que le platelage agit structurellement en flexion, c'est-à-dire qu'il participe à la capacité portante du pont autant aux états limites

ultimes (ÉLUL) qu'aux états limites d'utilisation (ÉLUT). Cela suppose qu'il n'y ait pas de glissement relatif entre le platelage et le système porteur.

1.4. Paramètres de départ pour le développement du nouveau concept de tablier de pont tout aluminium

Comme les platelages en aluminium constituent une nouvelle technologie qui n'a pas encore été éprouvée au Québec, le MTMDET a décidé de commencer par des projets pilotes sur des ponts de petite envergure, situés sur des routes locales à faible débit. Dans le cas d'un tablier de pont à dalle sur poutres, la largeur hors-tout a été fixée à 8900 mm, ce qui correspond à la largeur carrossable spécifiée par le ministère (8000 mm) pour une route de type F à deux voies de circulation (route collectrice ou locale, DJMA < 500), plus 2 chasse-roues en béton de 450 mm de largeur standard. Éventuellement, la largeur hors-tout du platelage en aluminium devra être ajustée si les chasse-roues qui seront conçus pour un tel platelage ont une largeur moindre.

Dans ce projet, on se basera le plus souvent possible sur la norme CAN/CSA S6-2014. Cette norme détaille toutes les exigences de dimensionnement que doivent satisfaire les ponts au Canada. Depuis la reprise de la version de 2006 faite en 2011, le chapitre 17 de la norme est consacré aux ouvrages en aluminium. La version en vigueur actuellement est celle de 2014 à laquelle nous devons nous soumettre. Ce chapitre a été écrit en s'inspirant du chapitre 10 - *Ouvrages en acier* qui est mieux connu des ingénieurs civils. Il a aussi pour référence la norme CAN/CSA-S157-05 - *Strength design in aluminium*, The Aluminium Association, *Specifications for aluminium structures* - Aluminium Design Manual, l'Eurocode 9 - *Design of Aluminium structures* et *Calcul des charpentes d'aluminium*, D. Beaulieu, PRAL, 2003, 810p.

Même si la norme est une référence indispensable, le chapitre 17 sur l'aluminium est assez récent et est encore amené à évoluer. Les possibilités offertes par la méthode des éléments finis dépassent parfois largement les cas prévus par la norme. Pour la conception du nouveau type de tablier de pont tout aluminium, la démarche sera donc de concevoir et de modéliser le pont avec un logiciel d'éléments finis, d'optimiser la conception et enfin de démontrer que la solution proposée est en accord avec la norme.

On prévoit, dans ce projet d'utiliser un revêtement de surface antidérapant mince comme surface de roulement, et non pas une couche d'enrobé bitumineux comme c'est le cas pour les tabliers de pont à dalle sur poutres. On ne discutera pas ici de la pertinence de ce choix qui découle du rapport de la visite en Floride (Beaulieu & Internoscia, 2015).

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans le but de rénover son parc routier, le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) cherche différentes possibilités dont l'une d'elles est l'utilisation de l'aluminium qui est un matériau d'avenir pour les platelages. Dans le cadre de ce projet, on étudie ici la possibilité d'une solution totalement en aluminium. Cette idée s'inspire de la réussite de la remorque Alutrec, elle-même conçue avec l'aluminium en tant que métal très majoritairement utilisé. On présente dans cette revue de littérature le matériau et son utilisation dans le domaine des ponts jusqu'à présent puis la remorque de la société Alutrec (Alutrec, 2016). Finalement, on expose brièvement certaines technologies indispensables à l'implantation de l'aluminium dans les tabliers de ponts routiers.

2.1. Le matériau aluminium

2.1.1. Propriétés de l'aluminium

L'aluminium, comme tout métal, possède d'abord un domaine élastique dont le module d'Young est trois fois inférieur à celui de l'acier ($E = 70 \text{ GPa}$) puis un domaine plastique qui varie suivant l'alliage utilisé. La densité de l'aluminium est aussi trois fois inférieure à celle de l'acier ce qui le rend beaucoup plus léger (Tableau 2.1).

L'aluminium est aussi réputé pour sa ductilité importante ce qui permet de diminuer le risque de ruptures fragiles, qui sont les plus dangereuses.

Tableau 2.1 Propriétés physiques et mécaniques utilisées pour la conception (Faucher, 1995)

	Aluminium	Acier
Module d'élasticité E , MPa	70 000	200 000
Module de Coulomb, G , MPa	26 000	78 000
Coefficient de poisson, ν	0,33	0,28
Densité, ρ , kg/m ³	2 700	7 800

2.1.2. Les avantages de l'aluminium dans la construction

Les caractéristiques intéressantes du matériau pour la construction sont les suivantes (Miami International Inc et The Technology Strategies Group, 2013) :

- Un faible poids en comparaison avec la résistance. En effet, la densité de l'aluminium (environ 2,7) est environ égale au tiers de celle de l'acier (environ 7,8) ce qui permet de concevoir des tabliers de ponts bien plus légers. Cette légèreté augmente la charge utile admissible par le pont en gardant les mêmes appuis et les mêmes systèmes porteurs. Cela est un avantage en particulier pour la réhabilitation et la mise aux normes des anciens ponts.
- Une bonne résistance à la corrosion et une durabilité importante. En effet, l'aluminium corrode très rapidement en surface ce qui crée une couche protectrice des éléments. Il n'est donc pas nécessaire de peindre les ouvrages d'aluminium, et cela diminue aussi les coûts d'entretien de ce type de structures. Cet atout constitue un des éléments majeurs par rapport au béton et à l'acier.
- Une rapidité de mise en place. Dans le cahier des charges de ce rapport, il faut que le pont soit fabriqué en usine puis assemblé rapidement en chantier. En effet, l'aluminium ne nécessite aucun coffrage, contrairement au béton, et peut être transporté par camion et par grue grâce à son faible poids (Figure 2.1). Cette technique a déjà été utilisée sur certains ponts américains et cela diminue grandement le temps de fermeture de la route.



Figure 2.1 Mise en place d'un platelage en aluminium (SAPA Group)

- Résistance à basse température. À basse température, la résilience de l'aluminium augmente, il n'est donc pas fragile, ce qui diminue les risques de rupture de ce type. Cela représente un atout dans le contexte climatique québécois.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

- Écologique. Si l'extraction de la bauxite et l'électrolyse de l'alumine nécessitent une énergie d'environ 14,5 GJ par tonne (The International Aluminium Institute, 2012), le recyclage de ce matériau est très facile et très utilisé, ce qui en fait un métal d'avenir.
- Facilité de conception. Les caractéristiques mécaniques de l'aluminium permettent l'extrudage, le formage par laminage ou l'emboutissage du matériau. Cela permet d'obtenir des formes complexes et optimisées, et un esthétisme plus important pour les ouvrages.
- Soudabilité. Cette partie est développée dans la section 0.

2.1.3. Les inconvénients de l'aluminium dans la construction

Malgré ces avantages, quelques inconvénients apparaissent pour l'utilisation de ce matériau :

- Coût d'achat. Cette dimension est développée dans le Chapitre 7.
- La nouveauté du concept. Bien que certains ponts soient déjà en aluminium, la plupart des projets choisissent la solution acier-bois ou celle acier-béton, bien mieux maîtrisées pour l'instant.
- Corrosion galvanique. Le potentiel de dissolution des aciers ordinaires est d'environ -610 mV et celui de l'aluminium est de -750 mV : une différence de plus de 100 mV entraîne une corrosion galvanique. Pour pallier ce problème, on ajoute une couche de zinc entre les deux métaux qui a un potentiel de -1130mV et qui est donc sacrifié pour que les métaux structuraux ne soient pas abîmés : on parle de galvanisation de l'acier. (Beaulieu, 2016)

2.2. L'utilisation de l'aluminium dans le domaine des ponts

La Federal Highway Administration (FHWA), c'est-à-dire l'autorité gouvernementale étatsunienne responsable du système routier recensait en 2013 environ 603 000 ponts routiers publics aux États-Unis et on en compte environ 56 000 au Canada. La plupart de ces ponts ont été construits entre les années 1950 et 1970 et vont arriver dans peu de temps au terme de leur durée de vie. En 2011, les bases de données du FHWA dénombraient 72749 ponts structurellement déficients aux Etats-Unis. C'est donc un important marché qui s'ouvre pour le génie civil (Miami International Inc et The Technology Strategies Group, 2013). De nombreuses solutions sont envisagées pour diminuer le coût et augmenter la durée de vie des installations. L'aluminium semble une alternative concurrentielle par rapport aux ponts traditionnels en acier et béton ou à madrier de bois, mais aussi par rapport aux nouvelles solutions comme les bétons de fibres ultra-haute performance ou les dalles de béton préfabriquées.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Il existe deux solutions principales pour la rénovation du parc routier : la réhabilitation des ponts, qui peut mettre en avant l'aluminium et qui est sujet à de nombreuses recherches actuellement ou le remplacement total du pont. C'est dans cette dernière optique que notre étude s'inscrit.

Il faut remonter en 1933 pour voir les premières traces d'aluminium dans un pont. Il s'agit du pont Smithfield à Pittsburgh : pont route/rail de 100 mètres de long où le tablier en bois a été changé pour un tablier d'aluminium sur une structure en acier (Roche Ingénieurs-conseil, 2008). Depuis cette première construction, une soixantaine de ponts utilisant l'aluminium ont été construits, majoritairement en Europe et aux États-Unis. Seuls les ponts d'Arvida érigé en 1950 au Saguenay et désormais le pont de Saint-Ambroise (2015) utilisent de l'aluminium au Canada.

Dans les années 1990, il y a eu un regain d'intérêt à l'idée d'utiliser l'aluminium dans le domaine des ponts, dû aux capacités intrinsèques du matériau, mais aussi aux nouvelles techniques de soudage et au coût décroissant de ce matériau par rapport à celui de l'acier. Pour étudier ces nouvelles possibilités d'utilisation de ce matériau très présent au Canada, un triptyque de mémoires a été réalisé à l'Université Laval :

- *utilisation des produits d'aluminium pour la réhabilitation des ponts dans le contexte canadien* (Faucher, 1995) ;
- *remplacement d'un tablier de pont par un tablier en aluminium* (Arrien, 1995) ;
- *évaluation du potentiel d'utilisation de l'aluminium dans les ouvrages d'art* (Roy, 1999).

Ces mémoires concluent que le critère limitant pour l'utilisation de l'aluminium dans le domaine des ponts est la fréquence de vibration. De plus, les analyses économiques faites à l'époque (voir section 7.1.2) ne se révèlent pas propices à l'utilisation des platelages en aluminium. Ces mémoires ont étudié un platelage étatsunien orthotrope (Figure 2.2, USA : Smithfield Bridge 1967) et le platelage de Svensson (Suède) utilisé sur 35 ponts à l'époque (Figure 2.3).

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

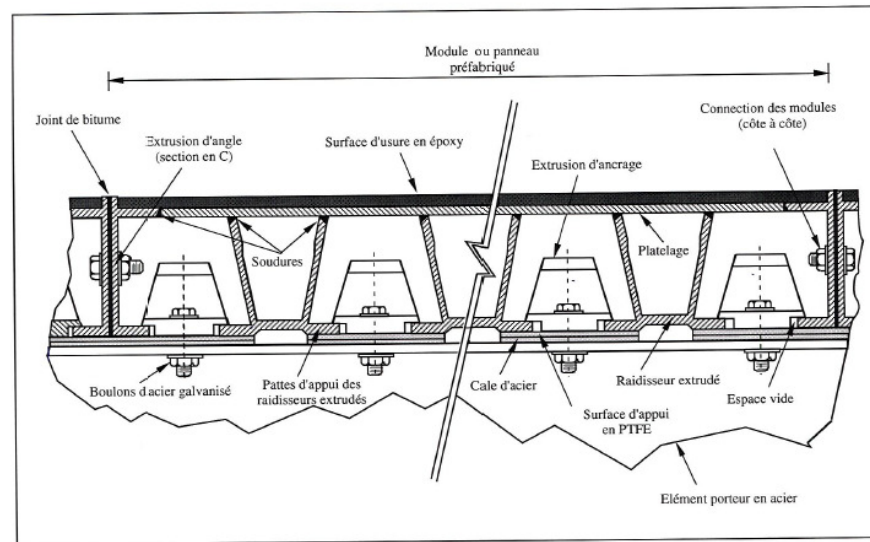


Figure 2.2 Coupe transversale du tablier orthotrope en aluminium (Arrien, 1995)

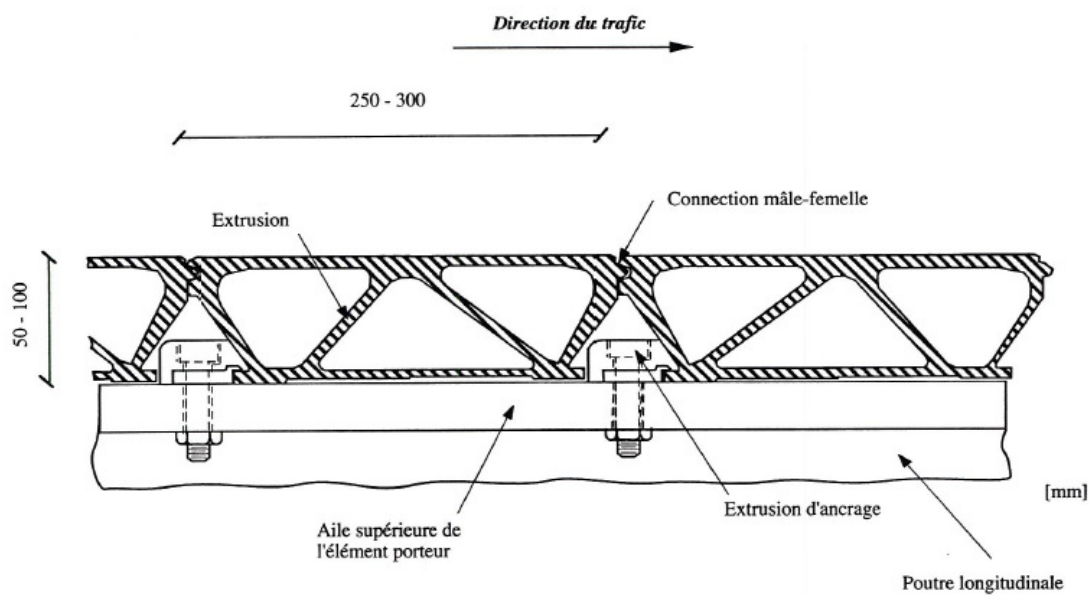


Figure 2.3 Coupe transversale du tablier de Svensson (Arrien, 1995)

2.3. Étude de la conception et des étapes de fabrication de la remorque « Capacity »

La conception du pont à caisson devait s'inspirer de celle de la remorque « Capacity » de la société Alutrec (Alutrec, 2016). En effet, cette remorque possède un plancher en extrusions et un caisson, le tout en aluminium. De nombreuses problématiques ont déjà été résolues pour la conception de la remorque. Les résultats concernant la remorque sont probants et il est possible de les retrouver pour les ponts. Il faut noter que les normes pour les remorques et celle pour les ponts n'ont toutefois pas les mêmes exigences.

2.3.1. Approche sur la conception d'une remorque plancher coque

Dans ce paragraphe, nous allons étudier les mémoires de maîtrise relatifs au premier prototype de la remorque, d'un point de vue structural dans un premier temps : *Développement structural d'une remorque ultralégère en aluminium* (Méthot, 2008) puis d'un point de vue statique et dynamique : *Développement d'un nouveau concept, d'une remorque ultralégère en aluminium : Étude statique et dynamique*, (Parenteau, 2010). Toutefois la conception de la remorque a largement évolué depuis et la visite de l'usine Alutrec sera aussi un point important de la description des remorques (voir l'annexe 1 Rapport de la visite de l'usine Alutrec).

Dans le premier prototypage étudié par Méthot (2008), la solution propose d'utiliser des extrusions longitudinales pour l'avant de la remorque et des extrusions transversales (Figure 2.4) pour le reste du plancher. Dans la version actuelle de la remorque cette idée a été en partie conservée en utilisant des extrusions plus importantes à l'avant pour la partie fixée au véhicule tractant.

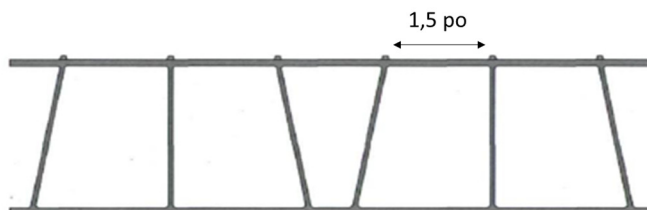


Figure 2.4 Profil de l'extrusion transversale (Méthot, 2008)

Cette extrusion est celle qui est utilisée pour le reste du plancher de la remorque (transversale) : sa largeur est de $6 \times 1,5$ pouces (228,6 mm, l'espace entre les membrures est constant au niveau de la semelle supérieure) et sa hauteur de 3,5 pouces (88,9 mm) pour le prototype 1 et de 2,5 pouces (63,5 mm) pour le prototype 2. Cette extrusion est légère et permet de ne pas avoir de déformation plastique locale sous une charge concentrée.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

L'idée principale de la remorque, ainsi que celle du tablier de pont, est de supprimer le glissement entre le plancher et la structure poutre ; c'est-à-dire de développer l'action composite pour que le plancher ou le platelage travaillent ensemble structuralement.

Dans ce cas, les poutres ont été remplacées par une coque qui permet d'être *a priori* plus résistant en torsion et qui permet d'obtenir des résistances équivalentes aux versions avec des poutres en I, avec moins de matière. Le premier mémoire de maîtrise a cherché à optimiser la forme de cette coque en travaillant en particulier sur les rayons en avant de la coque.

Une analyse par éléments finis a été faite sur la remorque conventionnelle d'Alutrec avec des poutres en I, des longerons, des traverses et un plancher extrudé ainsi que sur la nouvelle structure pour les comparer. Deux cas de chargement, illustrés ci-dessous ont été testés : une charge concentrée au milieu de la remorque de 50500 lbs (environ 250 kN) et la même charge répartie sur la remorque.



Tableau 2.2 Résultats de l'analyse comparative des structures avec la charge concentrée (Méthot, 2008)

	Contrainte max Von Mises (Ksi)	Déflexion (po)
Structure Alutrec	31,5	5,578
Nouvelle structure	19,4	3,633
Gain	38 %	34 %

Tableau 2.3 Résultats de l'analyse comparative avec la charge répartie (Méthot, 2008)

	Contrainte max Von Mises (Ksi)	Déflexion (po)
Structure Alutrec	19,1	4,165
Nouvelle structure	23,1	2,995
Gain	-20 %	28 %

Les gains entre la nouvelle structure et l'ancienne sont d'environ 35% pour la contrainte maximale de von Mises (Tableau 2.2) et la déflexion (Tableau 2.3) dans le cas de la

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

charge concentrée. Pour le cas de la charge répartie, l'augmentation de 20% de la contrainte maximale de von Mises (Tableau 2.3) a été admise par Alutrec. Une augmentation de la hauteur de l'extrusion permettrait de diminuer ce gain si on le souhaitait. Cette augmentation des résistances est couplée avec une diminution du poids propre de la remorque de 1745 livres (791 kg), soit de 28% du poids total. Cela représente un gain économique important pour la société.

Le second mémoire de maîtrise propose une modélisation 3D de la remorque et relate les essais sur terrain. Trois tests principaux ont été effectués : la pesée de la remorque, l'analyse des contraintes et des déformations sous différents cas de chargement statique et enfin des essais visant à quantifier les valeurs de rigidité, d'amortissement et les fréquences propres de la remorque avec ses suspensions à air, appelés « essais STEP ».

Les valeurs expérimentales des chargements statiques ont montré que les modèles éléments finis pouvaient être considérés comme valides et cohérent. Les différences trouvées entre le modèle éléments finis et la remorque expérimentale s'expliquent par des différences de conception entre les modèles (Figure 2.5).

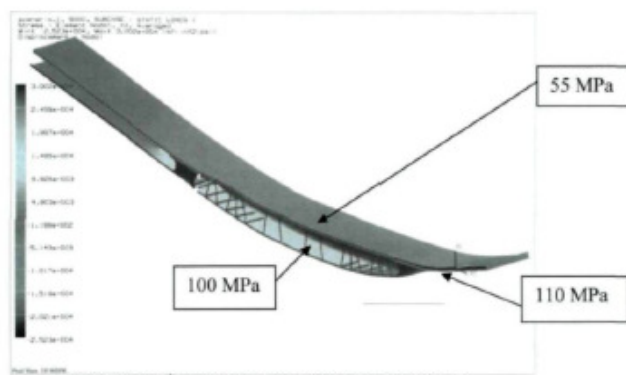


Figure 6.6 : Éléments finis, contraintes dans la remorque.

Tableau 6.3 : Comparaison des contraintes expérimentales vs. éléments finis.

Jauge #	Résultats jauges	Résultats éléments finis
	Mpa	
1	155/174	110
4	-89/-73	-55
6	56/46	100

Figure 2.5 Comparaison des contraintes expérimentales et éléments finis (Parenteau, 2010)

Les essais STEP donnent des fréquences de vibration à pleine charge, à charge moyenne et à vide : ces valeurs sont inférieures à 3 Hz. Cela prouve qu'en utilisant des amortisseurs aux appuis on peut facilement supprimer les problèmes de vibration des structures légères. Cette idée pourra être reprise pour les appareils d'appuis dans la section 2.4.4.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Ces mémoires ont servi de support au développement de la remorque « Capacity » de la société Alutrec. La visite de l'usine actuelle située à Saint-Agathe-de-Lotbinière, qui est utilisée pour la fabrication de remorques conventionnelles en aluminium a permis de mieux comprendre les étapes de fabrication de la remorque (voir l'annexe 1).

2.3.2. Visite de l'usine Alutrec de Saint-Agathe-de-Lotbinière

Grâce au Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL et à l'amabilité de la compagnie Alutrec, une des usines de fabrication de remorques en aluminium (Figure 2.6) a été visitée. L'annexe 1 Rapport de la visite de l'usine Alutrec présente le rapport de visite de cette usine, faite le 5 mai 2016.



Figure 2.6 Remorque Capacity de la compagnie Alutrec

2.4. Utilisation de l'aluminium en construction

2.4.1. Les extrusions

2.4.1.1. Présentation des extrudeurs Québécois

La présente section discute de l'extrusion d'aluminium ; il est ainsi nécessaire de comprendre la technologie permettant d'extruder des profilés.

Il existe quatre principaux extrudeurs au Québec :

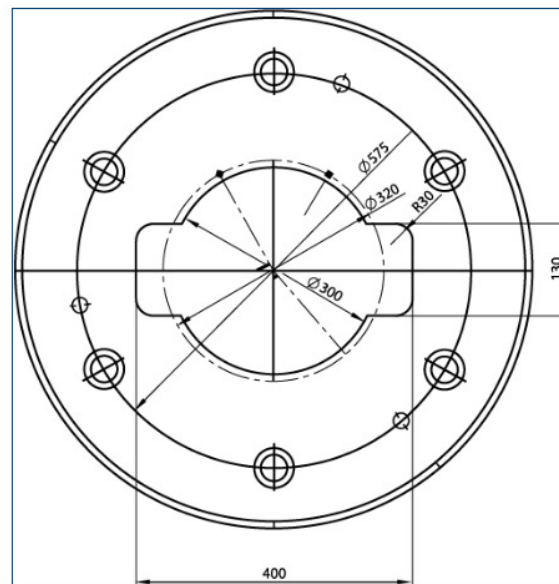
- Extrudex Aluminium situé à Lévis (Saint-Nicolas) sur la rive sud de Québec ;
- Metra aluminium Inc. situé à Laval une filiale de la compagnie italienne ;
- Pexal Tecalum situé à Alma ;
- SAPA Montréal situé à Montréal (Pointe-Claire).

La presse permettant d'extruder l'aluminium avec les plus larges dimensions est décrite ci-après. On essaiera que les extrusions proposées au Chapitre 4 restent dans ces

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

dimensions pour que celles-ci puissent être produites au Québec. Les valeurs contraignantes d'une presse sont les dimensions de l'ouverture de la filière, le poids linéique de la billette pour produire les extrusions, la longueur maximale de l'extrusion, le poids total de la billette et la pression maximale admissible par la presse. La Figure 2.7 présente le dispositif retenant la filière pour la presse de 3000 tonnes de la compagnie Pexal Tecalum.

INFORMATIONS TECHNIQUES



▣ Modèle de presse

▣ 3000 tonnes

DIMENSIONS MAXIMALES PROFILÉS PLATS

▣ Profils rectangulaires

▣ 380 x 120 mm

▣ Profils en U

▣ 230 x 230 mm

DIMENSIONS MAXIMALES PROFILÉS TUBULAIRES

▣ Profils rectangulaires

▣ 340 x 120 mm

▣ Profils carrés

▣ 200 x 200 mm

▣ Profils ronds

▣ 230 mm

▣ Poids minimum

▣ 180 g/m

▣ Poids maximum

▣ 15 kg/m

▣ Longueur de profilés

▣ 17 000 mm

Figure 2.7 Presse de 3000 tonnes de Pexal Tecalum (Pexal Tecalum, 2014)

La presse montrée à la Figure 2.7 possède un élargisseur (le terme *spreader*, en anglais, est le plus souvent utilisé) qui permet d'obtenir des extrusions plus larges et moins hautes. Toutefois, toutes les presses ne sont pas équipées d'un tel système. On

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

remarque que les dimensions maximales des profilés sont inférieures au diamètre donné sur la Figure 2.7 car l'ouverture de la filière est plus faible que celle du dispositif qui la retient.

Pour comprendre les limitations des différents types de presses, on expliquera ici, la technologie utilisée par les extrudeurs, telle qu'illustrée sur la Figure 2.8.

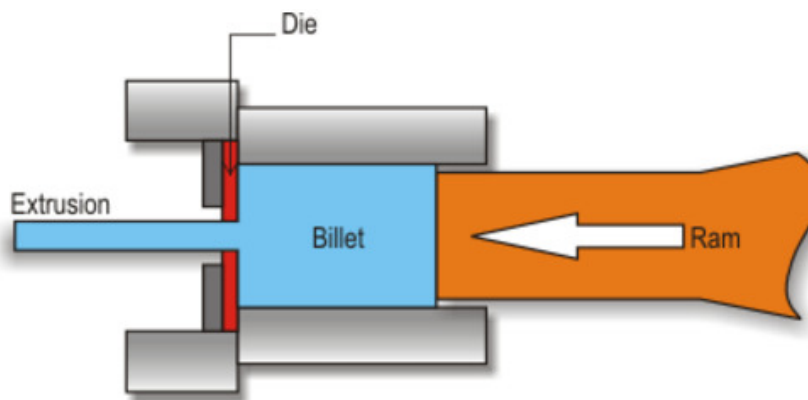


Figure 2.8 La technologie d'extrusion (Azo Materials, 2017)

Dans la chambre (gris), on insère une billette en aluminium (bleu ciel) que l'on comprime à l'aide d'un piston (orange). Le métal préalablement chauffé (450 à 500°C (CQRDA)) passe à travers la matrice, appelée aussi filière (rouge), et elle donne la forme désirée au produit semi-fini. La presse est définie par sa force de poussée maximale en tonnes : de 500 à 10000 tonnes (Guillot, 2013). Les presses québécoises ne dépassent pas les 3000 tonnes.

Au Québec, les billettes sont des cylindres d'aluminium dont la masse totale varie entre 100 et 130 kg (selon Pierre Achim¹) environ, selon la presse utilisée. Cette masse de matière constitue donc une des limites pour le produit semi-fini. Il est à noter qu'une partie (15 à 20 % selon Pierre Achim) de la matière présente dans la billette ne ressortira pas dans le produit fini et sera « perdue » dans la filière et cette matière sera recyclée.

La pression maximale dans la chambre varie en fonction du diamètre de la billette et de la force de poussée de la presse. Une pression importante est indispensable pour extruder des alliages difficilement extrudables (série 2000 et 7000 par exemple) ou pour atteindre des épaisseurs fines par rapport au ratio d'extrusion (Guillot, 2013). Dans le présent cas, l'alliage 6063 (choisi pour son faible coût) fait partie de la série 6XXX et possède une bonne combinaison de résistance mécanique ($F_u = 205 \text{ MPa}$, $F_{wu} = 115 \text{ MPa}$, $F_y = 170 \text{ MPa}$, $F_{wy} = 55 \text{ MPa}$) et d'extrudabilité (Rio Tinto, 2011). Dans ce

¹ Pierre Achim : anciennement, Directeur du développement économique et régional chez Rio Tinto.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

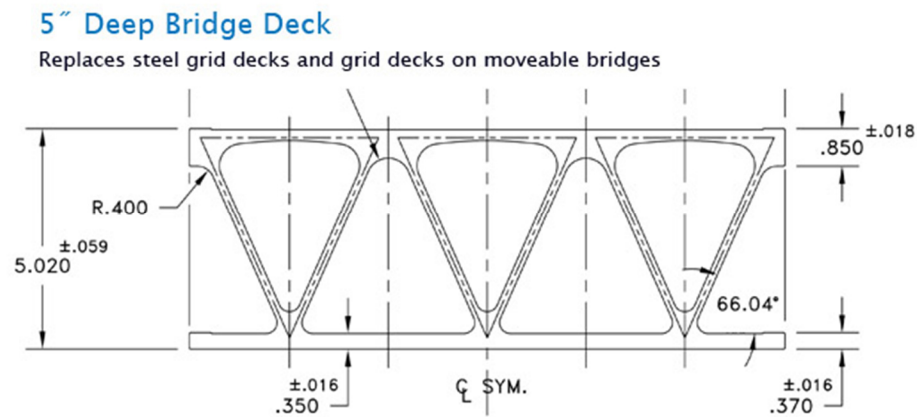


Figure 2.10 Extrusion AlumaBridge 5po GEN I (AlumaBridge, 2017)

Il faut noter que ces deux types d'extrusions ont été testés pour être utilisées transversalement au système porteur. Toutefois, il n'est pas à exclure que l'utilisation de telles extrusions puissent être faite longitudinalement. Par exemple, l'extrusion de la Figure 2.9, a été utilisée de manière longitudinale pour le pont de Saint-Ambroise (2015).

2.4.1.3. Présentation de l'extrusion japonaise

Il existe d'autres extrusions utilisées pour les ponts en aluminium et en particulier un modèle japonais développé par Nippon Light Metal Co (Figure 2.11) et dont les extrusions ont été soudées par friction malaxage pour le pont Kambara Chemical érigé en 2011 (Nippon Light Metal Compagny, 2011). La documentation accessible pour cette extrusion est quasiment inexistante.

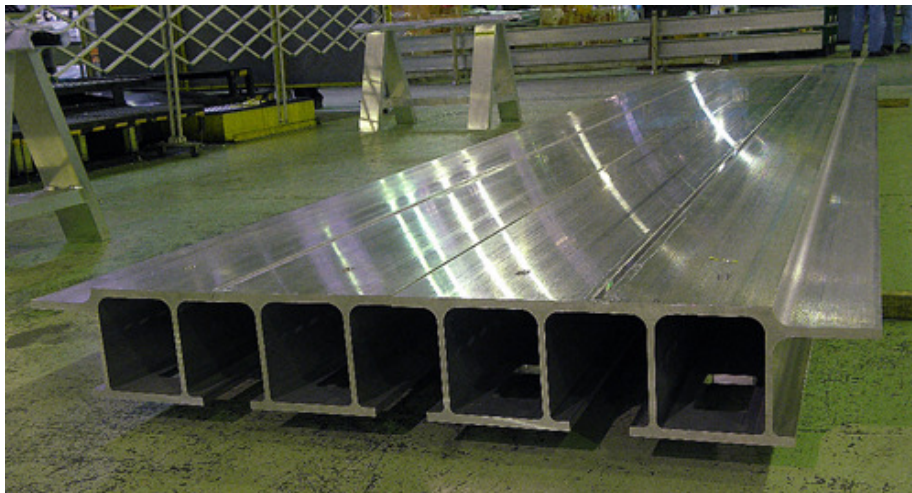


Figure 2.11 Extrusion japonaise (Nippon Light Metal Compagny, 2011)

2.4.1.4. Coûts des extrusions

Le coût des extrusions dépend de nombreux paramètres en particulier de la complexité de la matrice (c'est-à-dire du nombre de cavité de l'extrusion) et du matériau. En effet, les alliages de la série 6XXX sont plus facilement extrudables que ceux de la série 5XXX (Figure 2.12). Il faut aussi compter le coût de création de la matrice qui peut avoir un impact important si les extrusions sont produites en faible quantité.

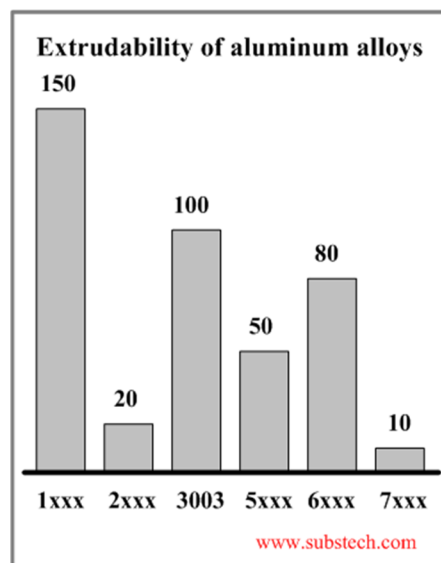


Figure 2.12 Extrudabilité des alliages d'aluminium (SubsTech, 2012)

Toutefois, en général pour les extrusions achetées chez les extrudeurs québécois le prix au kilogramme des extrusions en aluminium 6063 est d'environ 4,00 CAN\$ et de 4,50 CAN\$ pour les extrusions en 6061 (Guillot, 2013). Si les extrusions sont importées, ces prix peuvent être baissés à 3,50 CAN\$/kg avec livraison à Montréal (International L&W, 2012).

2.4.2. Les types d'assemblage

2.4.2.1. Le rivetage

Alutrec utilise tout d'abord des rivets en acier inoxydable pour la création des poutres en I de leur remorque conventionnelle (Figure 2.13). Ce système ne leur pose à ce jour aucun problème.



Figure 2.13 Rivetage de l'âme d'une poutre en I pour la remorque conventionnelle Alutrec

Si le rivet est une méthode d'assemblage pour certaines applications industrielles, ils ne semblent pas répondre aux exigences de la norme CAN/CSA S6-2014 qui n'accepte que des assemblages antiglisement.

2.4.2.2. Le soudage MIG

Sur la Figure 2.13, on voit aussi des cordons de soudures de type MIG. Ce type de soudure est très utilisé dans la fabrication des structures en aluminium. En effet, il est facilement automatisable. Il engendre toutefois une zone affectée thermiquement (ZAT) dont les propriétés mécaniques sont beaucoup plus faibles que celle du reste de la structure et nécessite une préparation des surfaces soudées (CAN/CSA S6-2014, 2014).

Ces soudures doivent donc être évitées dans les endroits critiques. Les soudures MIG sont sujettes à la fatigue si elles sont dans une zone travaillant en traction. Pour éviter ce type de rupture fragile, on tentera au maximum de diminuer les contraintes de traction dans les zones soudées pour être sous la limite d'endurance (voir section 6.3).

L'aluminium a quelques caractéristiques différentes de l'acier et en particulier pour le soudage. En effet, la surface de l'aluminium s'oxyde, et le point de fusion de cette couche d'oxydation est de 2072 °C. Avant de faire la soudure au MIG, il faut donc enlever la couche d'oxyde. Il est à noter aussi que l'aluminium ne change pas de couleur lorsqu'il approche le point de fusion, cela augmente les risques d'accident. Le soudage de l'aluminium est particulier et complexe, il nécessite un soudeur professionnel et habitué à ce type de matériau.

Pour ce qui a trait aux dispositions constructives relatives au soudage et en particulier pour les matériaux d'apport, on peut se référer aux normes W47.2 sur les prescriptions minimales pour la certification et W59.2 pour les règles de conception. Enfin, le chapitre 17 de la norme CAN/CSA S6-2014 possède une partie sur le dimensionnement des assemblages soudés. (Beaulieu, 2016)

2.4.2.3. Le soudage par friction malaxage (FSW)

Un nouveau type de soudage se développe actuellement, en particulier pour l'aluminium : il s'agit du soudage par friction malaxage (FSW). Ce procédé consiste, à l'aide d'une toupie, à mélanger les bords des objets à souder. La zone affectée thermiquement est plus étroite et obtient de meilleures caractéristiques que celle du procédé MIG (Singh et al., 2012). Ce procédé fait l'objet de nombreuses recherches et a été utilisé pour le pont Saint-Ambroise. Il requiert toutefois des efforts de tenue en place importants ce qui ne permet actuellement pas de souder par friction malaxage en chantier.

Les avantages de ce procédé sont nombreux (Beaulieu, 2016) :

- Faibles distorsions ;
- Excellentes propriétés mécaniques ;
- Absence de fumée, de porosité ou d'éclaboussure ;
- Faible retrait ;
- Aucun matériau d'apport requis ;
- Les couches d'oxyde peuvent être laissées en place ;

Quelques limites peuvent être aussi citées :

- La vitesse de soudage est moins rapide que pour le soudage MIG ;
- Les efforts de retenue des pièces peuvent être importants ;
- Une cavité se forme à l'extrémité de chaque cordon ;
- Ce procédé nécessite une grande précision quant au placement des extrusions à souder.

Ce procédé semble un type d'assemblage d'avenir. Toutefois, à l'heure actuelle, il n'existe pas de possibilités de soudage FSW industriel au Québec. Seule l'Université de Québec à Chicoutimi (UQAC) possède un banc de soudage par FSW servant à la recherche. On ne fera pas le choix du FSW dans ce projet. L'utilisation de cette technologie nécessitera un développement particulier et une apparition dans la norme de données concernant ce type de soudage.

2.4.3. Les alliages

De 1960 à 1967, les ponts recourant à l'aluminium utilisaient l'alliage 6061-T6. À partir de 1985, à la fois pour les ponts suédois et pour ceux d'Amérique du Nord c'est l'alliage 6063-T6 qui est utilisé (Roche Ingénieurs-conseil, 2008). Leurs caractéristiques mécaniques sont bonnes (Tableau 2.4) et ils sont à la fois extrudables, soudables par MIG et par friction malaxage. Pour cette étude, l'aluminium 6063-T6 qui est moins dispendieux que l'alliage 6061-T6 a été retenu (Guillot, 2013).

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Tableau 2.4 Résistances mécaniques de produits corroyés courants (CAN/CSA S6-2014, 2014)

Alliage et trempe	Produit	Épaisseur, mm		Résistance minimale, MPa			
		>	≤	F_u	F_y	F_{wu}	F_{wy}
5052-H32	Tôle, plaque	0,40	50,00	215	160	170	65
5083-H116	Tôle, plaque	1,60	40,00	305	215	270	115
5086-H116	Tôle, plaque	1,60	50,00	275	195	240	95
5086-H321	Tôle, plaque	1,60	8,00	275	195	240	95
6005A-T61	Extrusion	—	25,00	260	240	165 90	
6063-T5	Extrusion	—	12,50	150	110	115 55	
6063-T6	Extrusion	—	25,00	205	170	115 55	
6061-T6, -T6510, -T6511	Extrusion	toutes	—	260	240	165	80* 105†
6061-T6	Tôle	0,15	6,30	290	240	165	105
6061-T651	Tôle, plaque	6,30	100,00	290	240	165	80* 105†
6082-T6, -T6511	Extrusion	5,00	150,00	310	260	190	110

* Moyennant soudage avec fil plein 4043 dans les parties ayant plus de 9,5 mm d'épaisseur.

† Moyennant soudage avec fil plein 5356, ou fil plein 4043 dans les parties n'ayant pas plus de 9,5 mm d'épaisseur.

La désignation des alliages d'aluminium est codifiée. La désignation 6XXX représente la série dite 6000 dont les éléments d'additions (inférieur à 5%) sont le magnésium et le silicium. Le suffixe TX donne une indication sur le traitement thermique reçu par l'alliage. En l'occurrence, T6 signifie que l'alliage a subi une mise en solution, une trempe et un revenu. Ce traitement améliore les caractéristiques mécaniques de l'alliage en transformant le métal d'un point de vue microstructural.

Lorsque l'on effectue une soudure de ce type d'alliage, cela rajoute un nouveau traitement thermique qui dégrade les caractéristiques mécaniques, lesquelles sont décrites dans la norme CAN/CSA S6-2014 par F_{wu} et F_{wy} . (Beaulieu, 2016)

2.4.4. Les appareils d'appui

Les appareils d'appui sont fondamentaux pour obtenir un comportement du pont conforme aux calculs de dimensionnement. En effet, la suppression ou l'autorisation d'un degré de liberté peut engendrer des concentrations ou des augmentations de contraintes. Pour les calculs des ponts, on essaye au maximum d'avoir un système isostatique.

Il existe différents types d'appuis (Groupe Canam inc., 2016):

- Les appuis de types pot : ils comprennent un disque en élastomère au centre d'un assemblage de pièces d'acier. Ils possèdent une faible résistance à la friction et permettent différentes combinaisons de degrés de liberté en fonction des besoins ;

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

- Les appuis en élastomère frettés : ils sont composés de caoutchouc naturel ou de néoprène et peuvent être renforcés de métal. C'est ce type de dispositif qui a été utilisé pour le pont Saint-Ambroise (Figure 2.14) ;
- Les appuis sphériques ;
- Les appuis à glissement et guides PTFE.



Figure 2.14 Vue des assises du pont Saint-Ambroise (Centre de recherche sur l'aluminium -REGAL)

Les appuis n'ont pas comme seule utilité de transmettre les efforts au sol. Ils peuvent aussi servir d'amortisseurs, d'isolants acoustiques ou de dispositif parasismique (Annan, 2016). En particulier, les ponts en aluminium possédant souvent une première fréquence de vibration élevée dû à leur faible masse, un dispositif d'appuis amortisseurs semble être une solution à étudier.

2.4.5. Les possibilités en transport

Au Québec, le transport sur les routes est normalisé.

« Le permis général et le permis spécifique appartiennent à l'une ou plusieurs des classes suivantes :

1° Classe 1 : le permis autorisant les limites suivantes, chargement et équipement compris, incluant le véhicule ayant des dimensions hors normes, de par sa fabrication, mais sans chargement divisible :

- a) pour la largeur : 4,40 m ou 5 m s'il s'agit d'un permis spécifique ;
- b) pour la hauteur : 4,30 m ou 5 m s'il s'agit d'un permis spécifique ;
- c) pour la longueur : 21 m pour les grues, 17 m pour tout autre véhicule automobile, 27,50 m pour un ensemble de 2 véhicules routiers y compris un ensemble de véhicules routiers composé d'une grue et d'une remorque, 30 m pour un ensemble de 3 véhicules routiers composé d'un tracteur, d'un diabolot tracté et d'une semi-remorque ou 40 m pour tout ensemble de véhicules routiers visé par un permis spécifique ;

d) pour l'excédent avant ou arrière créé par l'équipement ou le chargement : 4 m à l'avant pour les grues et pour les véhicules affectés au déneigement, 2 m à l'avant pour tout autre véhicule routier, 6 m à l'arrière pour les arbres en longueur et 4 m à l'arrière pour tout autre chargement ou équipement. » (Éditeur officiel du Québec, 2016)

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS

3.1. Généralités

La méthode des éléments finis a pour objectif de prédire le comportement d'un système physique. Pour cela, on modélise le système au plus proche de la réalité, puis on le discrétise en éléments à géométrie simple et régis par des équations différentielles partielles connues et résolubles. On applique ensuite des charges et des conditions aux limites au système d'équations permettant la résolution et d'obtenir une solution unique. Si la géométrie et la taille des éléments ainsi que les conditions aux limites ont été correctement choisies, l'unique solution est une approximation correcte (c'est-à-dire dont l'erreur est inférieure à une valeur ϵ choisie) de la réalité physique du système. Cette méthode s'applique à des problèmes structuraux comme dans le présent projet, mais est aussi utilisée pour résoudre des problèmes thermiques ou de mécanique des fluides. En fonction des problèmes, l'analyse peut être linéaire ou non linéaire.

Cette méthode est à l'heure actuelle largement utilisée dans l'industrie et la recherche et est encouragée par l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. Dans le cadre de ce projet, on a utilisé les logiciels NX10 puis NX11 ainsi que NX NASTRAN. Ces logiciels sont développés par la société Siemens : les logiciels NX ont été créés pour la conception des pièces (CAO) alors que le logiciel NX Nastran est un logiciel de résolution par éléments finis.

3.2. Les étapes et particularités de la modélisation par éléments finis

3.2.1. Modélisation géométrique

La modélisation géométrique est la première étape de la méthode de résolution par éléments finis. On a ainsi créé le domaine d'étude à l'aide d'esquisses et d'extrusions. Chaque extrusion du tablier a fait l'objet d'une pièce (appelé *Part*), puis on a assemblé ces pièces en sous-assemblages puis en un assemblage unique pour définir la géométrie globale à analyser. Dans ce projet, toutes les géométries sont 3D. Les analyses montrent en effet que les géométries et éléments 2D (*Shell*) pour modéliser un système en trois dimensions ont tendance à créer des concentrations de contraintes inexistantes dans la réalité (Maljaars et al., 2008).

3.2.2. Le maillage

Le maillage consiste à discrétiser le domaine géométrique précédemment créé en éléments de taille réduite. Dans ce projet, des éléments hexagonaux à 20 nœuds ont été utilisés (HEX20) : chaque élément est un parallélépipède possédant un nœud à chaque sommet ainsi qu'à chaque milieu d'arête (Figure 3.1) (Dhatt et al., 2005). Ce choix a été fait puisque le modèle géométrique est composé d'extrusions rectilignes, les différents parallélépipèdes remplissent la géométrie de manière régulière et sans être distordus. Suivant le phénomène que l'on souhaite étudier, certaines parties du domaine ont été raffinées. En effet, plus le maillage est fin (c'est-à-dire que les éléments sont de petites tailles), plus le résultat est précis, mais plus le temps de calcul est important. Un maillage fin est nécessaire dans les zones où les gradients (en particulier de contraintes) sont importants.

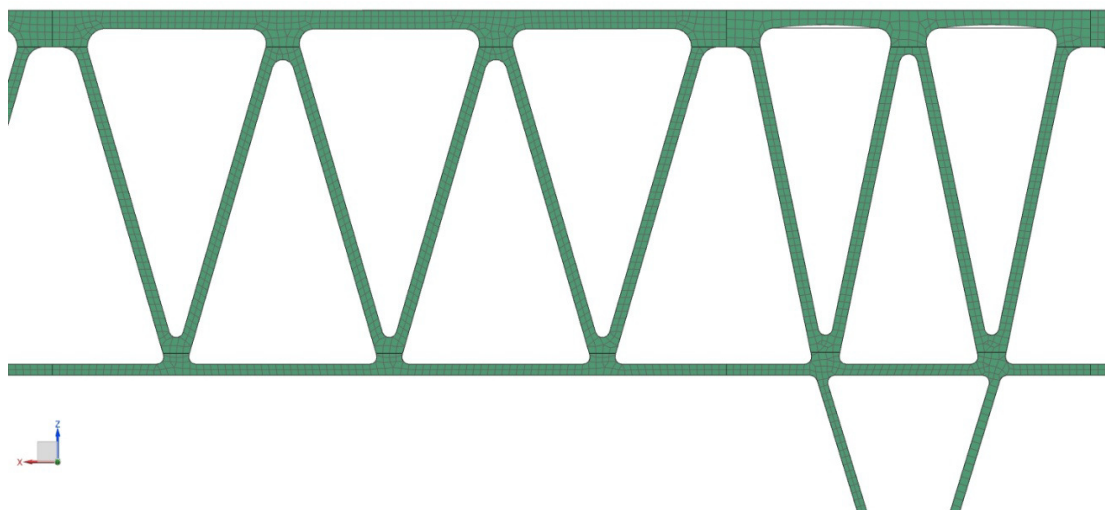


Figure 3.1 Maillage du platelage avec des éléments HEX20

3.2.3. Loi de comportement et propriétés mécaniques des matériaux

Après avoir maillé le domaine d'étude, il faut donner une loi de comportement au matériau utilisé. Dans ce projet, le tablier est entièrement en aluminium 6063-T6. Dans le logiciel, on a fait des analyses linéaires, on a donc considéré un matériau purement linéaire avec un module d'Young E égal à 68,98 GPa (aluminium prédéfini dans la bibliothèque de matériau du logiciel). Cette valeur est nécessaire pour résoudre les équations différentielles utilisées pour une analyse de structure.

Tous les calculs éléments finis présentés dans ce projet sont des analyses linéaires. Les valeurs des contraintes et des déformations seraient les mêmes si l'on utilise un autre alliage d'aluminium (comme le 6061-T6). Ces analyses linéaires permettent un temps de calcul largement réduit par rapport à des calculs non linéaires. Un coefficient de

majoration dynamique est introduit dans les charges pour trouver un équivalent statique sécuritaire à un problème dynamique. Notons enfin qu'une analyse avec un matériau linéaire est sécuritaire par rapport à une analyse avec un matériau élastoplastique.

3.2.4. Détermination des conditions aux limites

En termes mathématiques, les conditions aux limites sont nécessaires à la résolution des équations différentielles partielles. Elles peuvent être de deux types : soit de type Dirichlet, c'est-à-dire que la condition est donnée sur l'inconnue ; soit de type Neumann, et là c'est une valeur sur la dérivée de l'inconnue (donc le gradient ou le flux) qui est donnée. En structure, on utilise surtout les conditions de charge (type Dirichlet).

Dans nos modélisations (à part à la section 4.2.1), les conditions aux limites sont appliquées sur les lignes aux extrémités des poutres. Une des conditions (c'est-à-dire un des appuis) bloque les déplacements dans les trois directions et permet donc de fixer le modèle pour le calcul. Les autres appuis bloquent uniquement le déplacement vertical. Le modèle est alors isostatique pour se rapprocher au mieux de la réalité et pour ne pas créer de concentrations de contrainte dues au blocage d'un déplacement qui n'existerait pas dans la réalité.

En appliquant les conditions sur des lignes, et en ne bloquant pas les rotations, on est donc dans une configuration d'appuis simple. Il faut toutefois noter que cette modélisation crée des concentrations de contrainte proches des appuis puisque le modèle est retenu par une ligne : la force s'exerce sur une aire faible, ce qui engendre des valeurs de contraintes importantes. Il ne faudra donc pas considérer les valeurs des contraintes proches (3% de la portée) des appuis (Figure 3.2). Pour déterminer le comportement réel dans ces zones, il faudrait modéliser des appuis frettés au plus proche de ceux réellement utilisés.

Cette méthode a été expérimentée à la section 4.2.1. On a alors créé des appuis de $300 \times 300 \text{ mm}^2$. Si les résultats aux appuis varient avec cette méthode et sont plus proches de la réalité, on s'intéresse dans ce projet principalement aux contraintes au niveau de la section sollicitée maximalement en flexion. Ces appuis alourdissent le modèle et ne font pas varier les contraintes dans cette section ; on ne les a pas utilisés pour les tests présentés après la section 4.2.1.

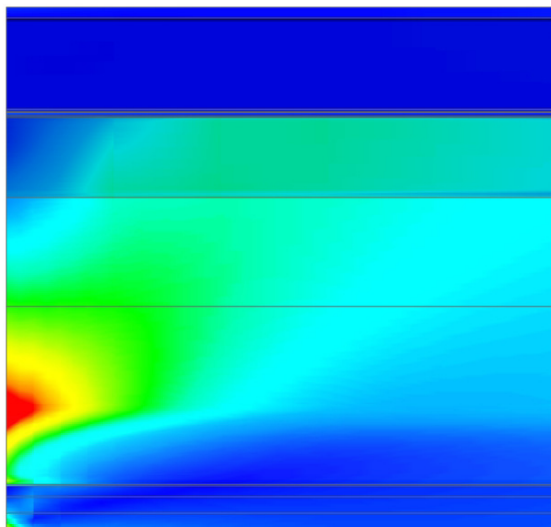


Figure 3.2 Contrainte de von Mises ; concentration de contraintes aux appuis

3.2.5. Détermination du chargement

Le chargement appliqué dans les simulations dépend de ce que l'on modélise. Néanmoins, dans toutes nos simulations, le chargement est celui d'une partie du camion CL-625 décrit dans la norme CAN/CSA S6-2014 (Figure 3.3). Dans le logiciel, on a créé un *Part* représentant les roues du camion avec une épaisseur faible (0,1 mm) que l'on a pu déplacer facilement en fonction du cas à simuler. On a positionné le camion longitudinalement pour obtenir le moment fléchissant maximal ou le cisaillement maximal conformément aux tableaux 3.2-4 et 3.2-5 du Manuel de conception des structures (MTMDET, 2016). Les efforts ont été appliqués directement sur les roues et ont été pondérés en fonction du cas que l'on étudie (ÉLUL1, ÉLUT1 ou ÉLF).

Il est à noter que ce moyen de modélisation permet d'obtenir les contraintes au plus proche de la réalité. En effet, on obtient la combinaison de contraintes liées aux charges de roues et au moment global. Cela n'est pas le cas s'il l'on applique directement un moment sur le tablier ou une pression globale équivalente pour obtenir le moment maximal. Cette plus grande précision empêche néanmoins d'utiliser certaines symétries du modèle et allonge donc le temps de calcul.

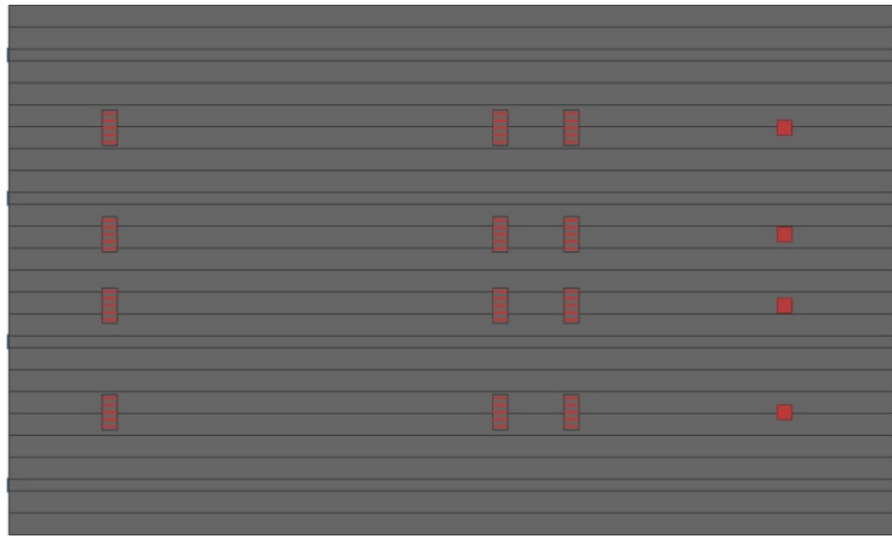


Figure 3.3 Chargement en flexion ; modélisation des essieux avant du camion CL-625

3.2.6. Résolution et post-traitement

Le logiciel NX Nastran résout ensuite le système d'équations différentielles algébriques pour chaque degré de liberté en fonction de tous les paramètres précédemment donnés. Les algorithmes calculent des déplacements et des forces à chaque nœud et les contraintes dans les différentes directions. On a aussi accès aux contraintes de von Mises, qui sont un critère permettant de réduire à une donnée une combinaison multiaxiale de contrainte. L'objectif de la conception est de réduire les contraintes données par le logiciel en deçà des limites de résistance (qui varient en fonction de l'état limite modélisé).

On rappelle l'équation (3.1) permettant d'obtenir les contraintes de von Mises :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{XX}-\sigma_{YY})^2+(\sigma_{XX}-\sigma_{ZZ})^2+(\sigma_{ZZ}-\sigma_{YY})^2+6(\tau_{XY}^2+\tau_{XZ}^2+\tau_{YZ}^2)}{2}} \quad (3.1)$$

3.3. Conclusion

On a précisé dans ce chapitre les paramètres valables dans toutes les simulations. Le raffinement du maillage ou la valeur des charges ne sont pas donnés dans cette section puisqu'ils varient en fonction des essais.

CHAPITRE 4 ANALYSE DES POSSIBILITÉS DE CONCEPT DE PONT TOUT ALUMINIUM

4.1. Comparaison platelages transversaux et longitudinaux

4.1.1. Rigidité flexionnelle des extrusions du platelage

Notons qu'un platelage, tel que l'un de ceux d'AlumaBridge ou ceux proposés dans ce document, se comporte *a priori* différemment selon la direction : ils sont orthotropes. En effet, la forme des extrusions représente un treillis. Si les inerties dans les directions principales sont différentes, alors le comportement ne sera pas le même si le platelage est placé longitudinalement ou transversalement aux poutres principales.

Pour comparer l'effet de l'orientation des extrusions, on compare les inerties qui auront une influence sur la résistance à la compression dans le platelage due à la flexion. On compare ici les inerties des extrusions AlumaBridge GEN II (Beaulieu & Internoscia, 2015).

Si les extrusions sont placées longitudinalement au système porteur, toute leur section reprendra la compression et on considère alors leur inertie totale. L'inertie dans sa direction principale d'une extrusion AlumaBridge GEN II est de $3,23 \times 10^7 \text{ mm}^4$. Au contraire, si les extrusions sont placées transversalement au système porteur, seules les ailes reprennent les forces de compression dues à la flexion. L'inertie des ailes d'une extrusion AlumaBridge GEN II est de $2,81 \times 10^7 \text{ mm}^4$. Le ratio entre ces deux inerties correspond à la participation des âmes. La contribution des âmes implique une augmentation de 15% de l'inertie qui participe à la reprise des forces de compression. Pour une seule extrusion, en valeur absolue, cette inertie est faible ($0,42 \times 10^7 \text{ mm}^4$), mais devient importante sur toute la largeur du platelage.

4.1.2. Platelage transversal

Le platelage est dit transversal lorsque les extrusions sont placées perpendiculairement aux poutres principales. À l'heure actuelle, cette solution est la plus couramment utilisée dans les platelages en aluminium : entre autres, le tablier de Svensson (Arrien, 1995) et celui d'AlumaBridge GEN II (Beaulieu & Internoscia, 2015) ont été conçus ainsi. Il est toutefois à noter que les tabliers de pont possédant des platelages orientés transversalement ne développent actuellement pas l'action composite.

- Avantages :

Le principal avantage qui existe à utiliser les extrusions d'aluminium perpendiculairement aux éléments principaux du système porteur sur lequel elles reposent (poutres ou caissons) réside dans le fait qu'il est plus facile de

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

construire le platelage avec une série de panneaux constitués d'extrusions soudées, préfabriqués en usine, et qui auront tous la même longueur. Il y a alors un gain au niveau de la productivité et de la qualité.

La résistance en flexion de ces extrusions étant plus élevée selon leur axe principal, le fait de les placer perpendiculairement aux éléments du système porteur pourrait également permettre d'espacer davantage ces derniers, par rapport à ce qu'il serait possible de faire si on plaçait les extrusions longitudinalement. En principe, on pourrait donc réduire le nombre d'éléments du système porteur par rapport à ce qui serait requis avec un platelage longitudinal.

- Inconvénients :

À l'heure actuelle, les solutions existantes de platelage transversal en aluminium ne permettent pas de développer une action composite avec le système porteur. Ceci est dû au fait que des joints d'expansion sont prévus entre les panneaux préfabriqués en aluminium, pour tenir compte de la dilatation thermique différentielle qui peut survenir entre l'aluminium et les poutres d'acier sur lesquelles ces platelages sont actuellement utilisés. Ces joints créent une discontinuité dans le platelage, au droit de laquelle seule la poutre sous-jacente travaille en flexion, sans participation possible du platelage. Il en résulte un tablier beaucoup plus flexible longitudinalement et moins résistant en flexion qu'il ne pourrait l'être avec des extrusions placées parallèlement aux poutres, continues entre elles et adéquatement fixées au système porteur. L'expérience du MTMDET² avec les solutions de platelages existantes démontre d'ailleurs que la charpente d'acier d'un pont à platelage d'aluminium transversal ne comporte pas seulement un plus grand nombre de poutres que la charpente qui serait requise avec une dalle de béton pour le même pont, mais que les poutres requises avec ce platelage en aluminium sont également plus massives que les poutres qui travaillent en action composite avec la dalle de béton.

4.1.3. Platelage longitudinal

Le platelage est dit longitudinal lorsque les extrusions sont placées parallèlement aux poutres. À titre d'exemple, le platelage du pont du MTMDET à Saint-Ambroise est constitué d'extrusions Alumadeck (Reynolds puis AlumaBridge) disposées de manière longitudinale. Dans ce cas précis, le platelage n'est toutefois pas fixé au système porteur d'une manière qui assurerait une action composite dans le tablier.

² D'après Dominic Fortin (M.Sc., Ing.), ingénieur structure au MTMDET

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

- Avantages :

Le fait de placer les extrusions parallèlement aux poutres permettrait de maximiser la surface d'aluminium disponible pour reprendre les efforts de compression qui seraient générés dans le platelage par la flexion avec action composite. En effet, en tout point le long du tablier, on pourrait bénéficier de la section complète des extrusions, incluant les parois inclinées. Ce ne serait pas le cas avec les extrusions placées perpendiculairement, puisque là où les âmes rejoignent les semelles, la section d'aluminium efficace se trouverait limitée aux semelles inférieure et supérieure des extrusions.

De plus, les zones du platelage affectées par la chaleur de soudage auront moins d'incidence sur la résistance en compression disponible pour l'action composite si les extrusions sont placées longitudinalement plutôt que transversalement. En effet, ces zones soudées se trouvent concentrées de part et d'autre des joints soudés entre les extrusions. En plaçant les extrusions longitudinalement, la proportion de la section d'aluminium affectée par la chaleur de soudage serait très limitée, puisque concentrée aux joints soudés, et le reste de la section d'aluminium entre ces joints posséderait la résistance d'origine du matériau. À l'opposé, avec les extrusions placées transversalement, pour une section coïncidant avec un joint entre deux extrusions, la totalité de la section d'aluminium soumise à l'effort de compression engendré par la flexion serait constituée d'aluminium affecté par la chaleur de soudage, et donc aux propriétés mécaniques significativement réduites.

L'avantage de placer les extrusions longitudinalement est donc associé à l'efficacité de la section d'aluminium à participer à l'action composite.

Dans le cas du platelage longitudinal sur un système porteur en aluminium, il serait également possible de développer une extrusion de liaison du même type que celle présentée à la Figure 4.1. Cette extrusion de liaison permettrait de développer l'action composite sans recourir au boulonnage pour assembler le platelage et le système porteur. L'emploi de boulons implique des pressions importantes sous les rondelles ce qui peut entraîner des déformations plastiques de l'aluminium. Ces déformations plastiques peuvent créer des micro fissures et cela a pour conséquence d'augmenter les risques de rupture par fatigue. De plus, le nombre de boulons doit être important et devient donc dispendieux en assemblage et en achat, ce qui est évité par une soudure. Enfin, il est à noter qu'aucune technique de boulonnage antiglisement n'a été validée à ce jour pour les platelages extrudés (Fortin, 2001).

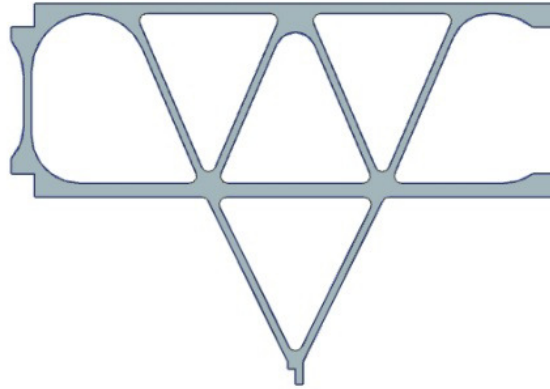


Figure 4.1 Exemple d'extrusion de liaison au-dessus des poutres

- Inconvénients :

Les extrusions longitudinales ne permettent pas toutes les possibilités d'espacement entre les poutres. Il faudra d'abord ajuster la largeur hors-tout réelle du platelage en fonction des largeurs des différents types d'extrusion développés, de façon à ce qu'elle soit le plus près possible de la largeur hors-tout théorique requise d'après la largeur carrossable spécifiée pour la route supportée par le pont. Simultanément, il faudra combiner les différentes extrusions de façon à obtenir un espacement de poutres le plus uniforme possible et qui respectera également la capacité en flexion transversale du platelage.

De plus, dans l'optique de développer l'utilisation de l'aluminium dans les ponts de manière conséquente, il faudra que les solutions puissent atteindre des portées supérieures à 15 mètres. Si l'on utilise un platelage longitudinal, il faudra développer un système d'attache entre les panneaux, pour relier les extrusions bout-à-bout tout en assurant la continuité permettant de transmettre efficacement, d'un panneau à l'autre, l'effort de compression généré dans le platelage par la flexion d'un tablier avec action composite.

4.2. Possibilité de tablier de pont a caisson tout aluminium

4.2.1. Conception d'un pont de type caisson

La conception pour la partie en flexion du tablier sera inspirée de la remorque Capacity d'Alutrec présentée au 2.3. Il faut toutefois noter qu'il existe des différences majeures entre le domaine des ponts et celui des remorques. En effet, le but principal dans la conception de la remorque est de diminuer sa masse au maximum pour pouvoir transporter un chargement plus important et consommer moins de carburant à vide. Ces deux avantages constituent les arguments économiques de la remorque. Le caisson de la remorque doit aussi se montrer aérodynamique et la remorque n'est pas symétrique

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

puisqu'elle repose d'un côté sur des essieux et de l'autre sur la partie arrière du véhicule tractant.

Pour le pont, diminuer la masse conduit à une augmentation de la première fréquence de vibration qui est déjà un des critères limitant au vu des précédentes études réalisées à l'Université Laval entre 1995 et 1999 (Arrien, 1995) (Faucher, 1995) (Roy, 1999)). Bien plus que l'optimisation de la conception en vue d'une diminution de masse, on cherchera à optimiser et à simplifier au maximum la fabrication pour diminuer les coûts.

La conception du pont à caisson s'est faite en plusieurs étapes. Tout d'abord, des extrusions robustes (127,5 x 152,4 mm) ont été imaginées pour le platelage et un caisson dont les âmes sont fines et la semelle épaisse pour augmenter l'inertie (Figure 4.2 à Figure 4.4). Les valeurs ont été prises de manière arbitraire pour les congés et de 5 mm pour les membrures, qui est le minimum suivant la norme CAN/CSA S6-2014.

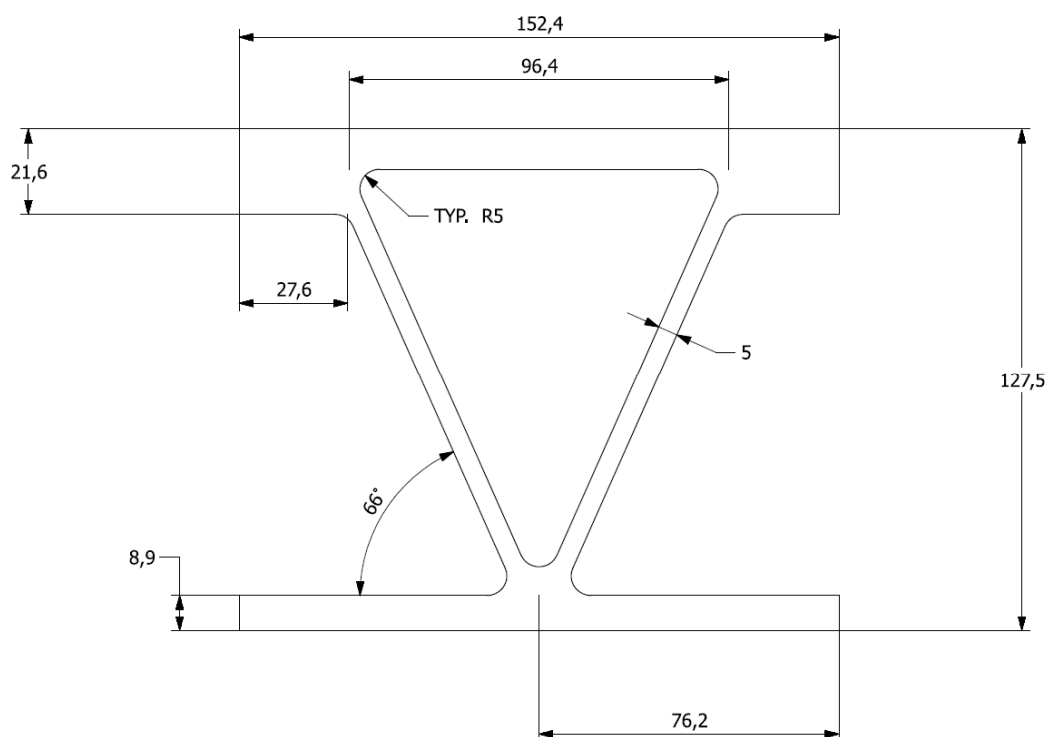


Figure 4.2 Extrusion de platelage initialement envisagée

Les extrusions sont placées de manière longitudinale au système porteur. Ce choix a été argumenté à la section 4.1. Cela augmente, entre autres, l'inertie du platelage suivant l'axe du tablier et permet d'avoir, par soudure, un système d'attache simple avec le système porteur (Figure 4.3).

Le platelage avec de petites extrusions a par la suite été abandonné (voir section 4.3), puisque la section était tout de même trop importante pour être extrudée au Québec sur une longueur de 15 mètres.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Dans un second temps, on a donc choisi de prendre pour le platelage des extrusions inspirées des extrusions GEN II d'AlumaBridge décrites dans le rapport de Beaulieu et Internoscia (Beaulieu & Internoscia, 2015). Les seules différences résident dans la suppression de la partie conçue pour le soudage par friction malaxage (FSW) et que le haut des alvéoles n'est pas courbe, mais rectiligne. On conçoit aussi une extrusion de liaison commune au caisson et au platelage permettant de développer l'action composite totale.

Le caisson est constitué d'extrusions pour les âmes et d'une plaque pour la semelle inférieure. Le caisson est, *a priori*, vide, mais on pourra ajouter des raidisseurs si la modélisation indique que les âmes sont susceptibles de rompre par flambement. Pour les soudures dans le caisson, elles pourront être faites sur deux niveaux pour diminuer les risques de rupture comme cela est montré dans la Figure 4.3.

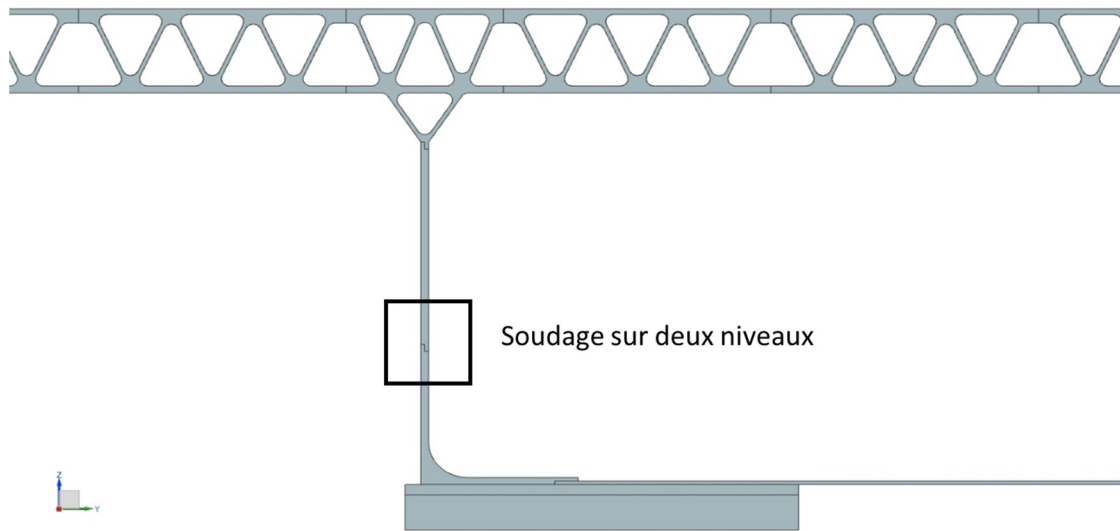


Figure 4.3 Tablier tout aluminium à caisson



Figure 4.4 Concept de tablier de pont caisson tout aluminium

Dimensions principales :

- Espacement des âmes : 2240mm ;
- Porte à faux : 1120mm ;
- Largeur extrusion platelage : 340 mm ;
- Hauteur platelage : 120 mm ;
- Hauteur des âmes : 500 mm ;
- Épaisseur des plaques de caisson : variable pour nos simulations.

4.2.2. Analyse du tablier de pont à caisson tout aluminium

4.2.2.1. Détails de la méthode

La méthode utilisée pour cette conception consiste à modéliser par éléments finis le tablier en entier, ou en considérant un axe (ou alors un ou plusieurs plans) de symétrie, et de le soumettre aux charges permanentes et à la surcharge routière (chargement CL-625) prévues par la norme (les autres charges transitoires et exceptionnelles, comme le vent et le séisme, ne sont pas considérées dans le présent projet de recherche). Pour prendre en compte l'effet dynamique de la surcharge routière, on la majore de 25% (coefficient de majoration dynamique de la norme CAN/CSA S6-2014 au 3.8.4.5.3) pour l'appliquer statiquement. En mettant les conditions et les charges adéquates, on obtient les flèches et surtout les contraintes dans la structure.

Lorsque l'on travaille à l'état limite ultime, les contraintes ne doivent alors pas dépasser la limite ultime pondérée $\Phi_u \times F_u$ du matériau (et $\Phi_u \times F_{wu}$ pour les zones affectées thermiquement par les soudures). De même, lorsque l'on travaille à l'état limite d'utilisation, les contraintes ne doivent pas dépasser la limite élastique $\Phi_y \times F_y$ du matériau (et $\Phi_y \times F_{wy}$ pour les zones affectées thermiquement par les soudures). Dans la présente section on ne considère pas la fatigue qui sera analysée dans la section 6.3.

On négligera les résultats trop près des appuis puisque les contraintes dans ces zones sont largement surévaluées par le logiciel (cela se remarque aisément puisque deux nœuds de différents éléments ayant les mêmes coordonnées donnent des valeurs de contraintes très différentes, on parle d'environ 3% de la valeur de la portée). En effet, en ne bloquant qu'une seule ligne de nœuds, toute la force de réaction aux appuis se concentre sur ces nœuds. Cela engendre des concentrations de contraintes artificiellement élevées. En réalité, les réactions aux appuis sont réparties sur une plus grande surface grâce aux appareils d'appui et les contraintes qui en résultent sont largement diminuées. Ces concentrations de contraintes pourront donc être considérées ultérieurement.

4.2.2.2. Résultats

Les analyses préliminaires par éléments finis montrent plusieurs résultats.

Pour obtenir des contraintes suffisamment faibles dans la partie poutre-caisson, on peut faire varier deux dimensions : la hauteur des âmes et la largeur de la plaque du dessous. Pour obtenir des contraintes inférieures à $0,75F_u$ en traction dans la plaque, il faut utiliser une plaque d'environ 50 mm. Cette valeur est importante ; la plaque sera donc épaisse et sera alors difficilement assemblable.

Les contraintes de von Mises dans le platelage sont faibles, comme on peut le voir à la Figure 4.5 et ne dépassent pas les 40 MPa pour un chargement à l'ultime. Cela est inférieur à $0,75 \times 115 = 86,25$ MPa qui est la limite admissible pondérée à l'ultime pour les parties soudées. Ce résultat semble logique puisque les extrusions AlumaBridge

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

GEN II, dont les épaisseurs de parois sont du même ordre de grandeur que celles utilisées pour ces simulations, ont été dimensionnées pour des cas de fatigue plus contraignants que le cas testé ici (Beaulieu & Internoscia, 2015).

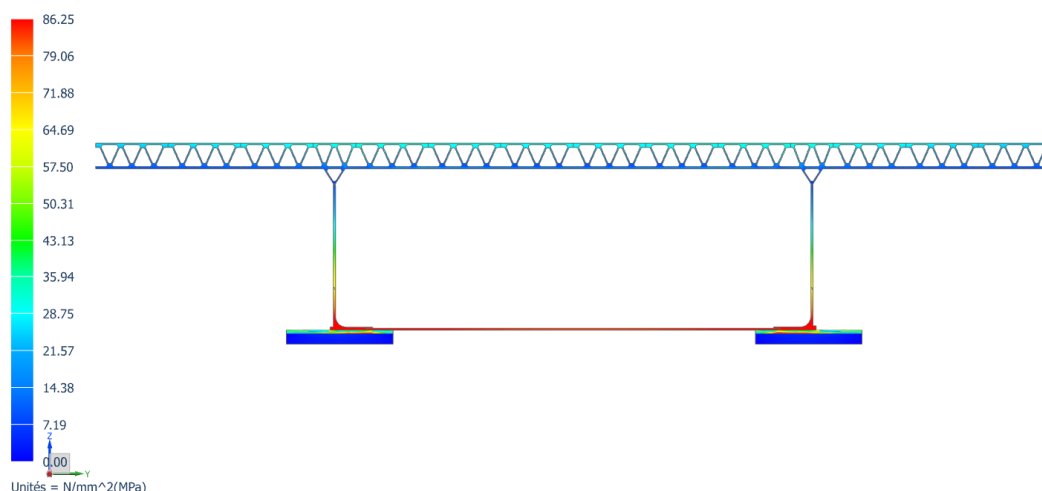


Figure 4.5 Contrainte de von Mises dans le tablier tout aluminium à caisson à l'état limite ultime

Une analyse modale a ensuite démontré que la première fréquence de vibration est de 6,7 Hz. Les flèches étant d'environ 40 mm sous les charges d'utilisation, on est très loin des attentes de la norme (CAN/CSA S6-2014 3.4.4). Un constat similaire avait déjà été mentionné dans les études de 1995 à 1999 faites à l'université Laval (Arrien, 1995) (Faucher, 1995) (Roy, 1999). En effet, cette clause est très contraignante pour les platelages légers et ne semble pas, au vu des commentaires de la norme, être appliquée pour la sécurité ou l'aspect structurel de l'ouvrage. En particulier, la limite varie si des piétons sont amenés à emprunter le pont : cette clause est principalement liée au confort des usagers. Si l'on souhaite tout de même diminuer la fréquence de vibration de l'ouvrage, on pourra travailler sur les appareils d'appuis. En effet, ces derniers peuvent agir comme des ressorts et/ou comme des amortisseurs, ce qui peut faire varier significativement la fréquence de vibration de l'ouvrage. Ce principe de dynamique est le même qui est utilisé pour développer des appuis antisismiques qui vont influencer sur la rigidité totale de l'ouvrage et qui apportent un amortissement important pour la structure.

La conclusion des analyses préliminaires en éléments finis démontre qu'un pont à caisson en aluminium peut supporter les charges prévues dans la norme (à l'état limite ultime, la fatigue et l'état limite d'utilisation n'ont pas été pris en compte ici) en termes de contraintes dans le matériau. Pour être plus précis, il faudrait translater transversalement les charges de roue de la surcharge CL-625, à l'intérieur des limites des voies de circulation, en fonction du gabarit d'encombrement (voir figure 3.2 CAN/CSA S6-2014). Néanmoins, les variations seront *a priori* faibles. Si ces variations engendraient une

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

augmentation de contrainte au-dessus de la limite admissible, il faudrait seulement augmenter l'inertie du système porteur en augmentant la semelle inférieure du caisson.

4.2.3. Faisabilité

Les caissons ne semblent pas être la solution optimale pour une nouvelle conception innovante de pont tout aluminium, principalement à cause de la faisabilité de la plaque inférieure, entre les extrusions du bas de l'âme. En effet, les fournisseurs de plaques n'ont pas la possibilité de faire des plaques d'une telle dimension (15 x 2 x 0,05 mètre). Il faudrait donc avoir recours à un assemblage de plaques soudées. Cette solution serait extrêmement coûteuse. En effet, cela augmente considérablement le temps d'assemblage et donc le coût de la main-d'œuvre. Les plaques ayant une épaisseur importante à la base des âmes des caissons seraient quant à elles difficilement soudables. En outre, les soudures dans les zones susceptibles de développer des problèmes de fatigue sont à éviter.

Enfin, les caissons présentent des inconvénients au niveau de l'inspection et de l'entretien, puisque l'intérieur est inaccessible une fois la construction du pont terminée.

4.2.4. Conclusion

Bien que l'utilisation d'un caisson soit une solution viable pour les remorques d'Alutrec, il n'en est pas de même pour les tabliers de pont, qui ne sont pas soumis aux mêmes problématiques. Ce constat a donc amené à concevoir une nouvelle forme de la partie poutre qui sera développée dans le Chapitre 5.

4.3. Concept de tablier tout aluminium pouvant être entièrement fabriqué au Québec

4.3.1. Introduction

Dans l'optique de développer un concept de tablier de pont tout aluminium québécois, les possibilités d'extrusion au Québec ont été analysées. Les extrusions de faible diamètre avaient été abandonnées pour le concept avec des caissons. Un concept avec des poutres en I et des espacements de poutres différent du concept précédent sera étudié.

Par la suite, une conception d'un tablier de pont a été proposée et qui pourrait être fabriqué en totalité au Québec, sous certaines conditions.

4.3.2. Concept de platelage avec des extrusions de diamètre circonscrit 230 mm (9 pouces)

La masse de la billette semble être le facteur limitant puisque l'extrusion doit être à la fois d'une longueur de 15 mètres (on ne veut pas faire de raccord bout à bout d'extrusions dans ce projet d'après le cahier des charges) et assez massive. Par exemple, pour une billette de 100 kg net, c'est-à-dire après avoir considéré les pertes (d'environ 15%), et en prenant une densité de 2700 kg/m^3 , on obtient une aire de section maximale de 2469 mm^2 (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Aire maximale de l'extrusion pour une masse de 100 kg

Aire maximale d'une extrusion pour une masse de 100 Kg		
Masse	100	kg
Volume	0,037	m^3
Portée	15	m
Aire	2469	mm^2
Masse linéaire	6,7	kg/m

Après discussion avec les personnes concernées, les extrusions du platelage ont été conçues pour être placées longitudinalement, *c.-à-d.* parallèles aux poutres maîtresses. Ce choix a été discuté à la section 4.1.

Une valeur de 200 mm pour la hauteur du platelage a été choisie : cela correspond aux extrusions utilisées pour le platelage en aluminium pour le pont construit par le MTMDET à Saint-Ambroise au Lac-Saint-Jean en 2014-2015. Cette hauteur est la même que celle des dalles de béton et a été choisie pour augmenter la rigidité flexionnelle entre les poutres par rapport aux extrusions de 120 mm et 127,5 mm précédemment envisagées.

Une fois l'aire de la section maximale connue, le diamètre circonscrit maximal fixé et la hauteur décidée, les alvéoles ont été dimensionnées. Le choix de cette conception, illustrée à la Figure 4.6, est le résultat de nombreuses itérations visant à optimiser l'utilisation de la matière pour diminuer les contraintes maximales. Certaines conceptions d'extrusions avaient des hauteurs moins importantes et des largeurs plus importantes. Les résultats ont été similaires dans tous les cas et on ne présentera qu'un exemple ici (Figure 4.6).

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

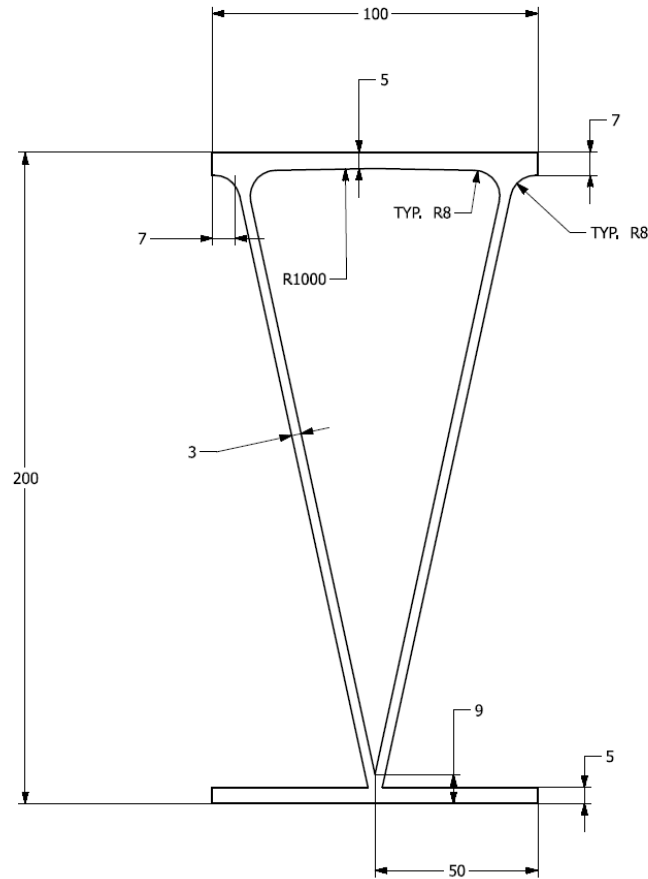


Figure 4.6 Proposition d'extrusion pour un platelage québécois (diamètre circonscrit : 227 mm)

Cette extrusion a une semelle inférieure de 5 mm. La partie supérieure de l'alvéole est un arc de cercle qui vise à distribuer les contraintes uniformément dans toute la paroi. On applique ici le même principe que les ponts en arche. Enfin, les âmes ont une épaisseur de 3 mm, ce qui est contraire aux recommandations du chapitre 17 de la norme CAN/CSA S6-2014 qui demande 5 mm minimum. Cette exigence est justifiée dans les commentaires (C.17.7.2) pour une question de résistance à la corrosion³. Toutefois, cette épaisseur est inférieure à celle pour l'acier. Cette fine épaisseur permet d'utiliser la matière pour les semelles de l'extrusion qui apporte plus d'inertie. Les âmes étant rapprochées dans cette conception, une charge de roue se répartit sur différentes âmes. Si la limite de flambement est atteinte, il faudra alors augmenter l'épaisseur des parois, et donc retirer de la matière à un autre endroit de l'extrusion.

³ Texte intégral de l'article C17.7.2 : « The minimum thickness of aluminum bridge components is less than that required for steel because aluminum has greater corrosion resistance ». Traduction : « L'épaisseur minimale pour les composants en aluminium dans les ponts est moins importante que celle requise pour l'acier car l'aluminium a une meilleure résistance à la corrosion. »

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

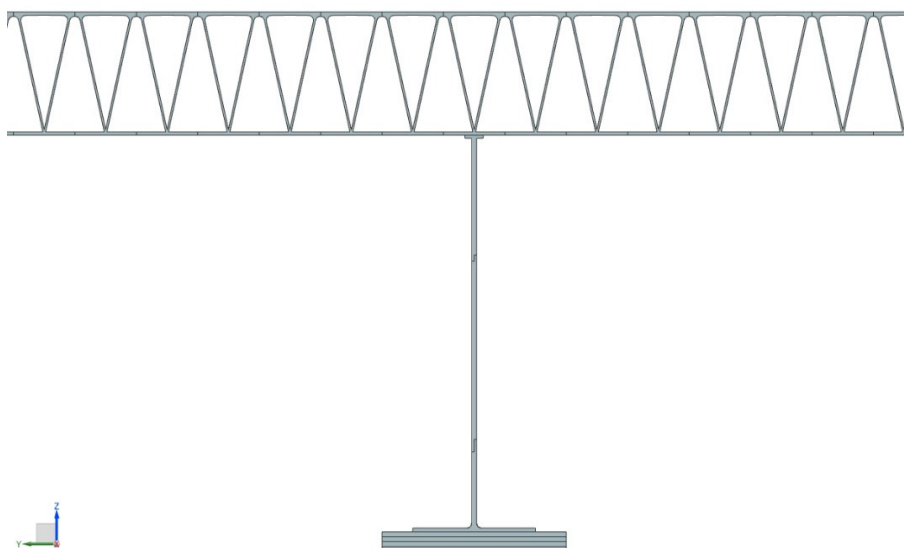


Figure 4.7 Section de tablier avec des composants pouvant être entièrement fabriqués au Québec (presse de 3000 tonnes)

Le concept de tablier de pont tout aluminium présenté Figure 4.7 et à la section 4.3.3 possède 6 poutres de 677 mm de hauteur et l'espacement des poutres est de 1650 mm. La longueur du porte-à-faux est de 350 mm.

4.3.3. Analyse du concept de tablier de pont avec des extrusions de 230 mm de diamètre circonscrit (9 pouces)

Les simulations ont été faites sur un demi-pont (une voie, voir Figure 4.8 et Figure 4.9) avec les charges pour l'état limite ultime 1 (ÉLUL1) ($1,1 \times$ poids propre et $1,7 \times 1,25 \times$ CL-625) ; les contraintes de von Mises dans le platelage ont été comparées avec la limite ultime pondérée du matériau ($\sigma_{wu} = 0,75 \times F_{wu} = 0,75 \times 115 = 86,25$ MPa). La position longitudinale a été prise pour créer le moment de flexion maximal selon le chapitre 3 du Manuel de construction des structures (MTMDET, 2016).

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

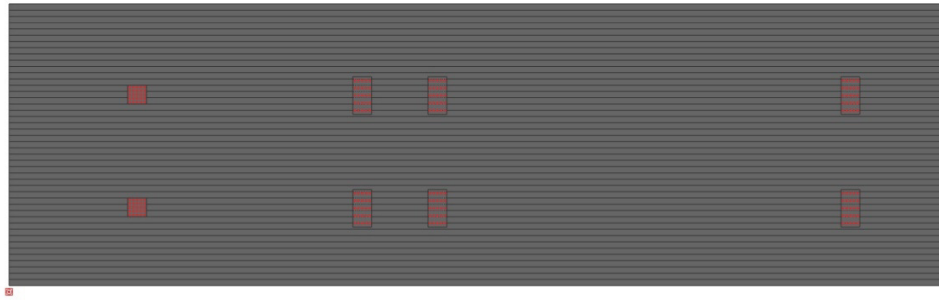


Figure 4.8 Vue du dessus d'un panneau (correspond à une voie) chargé par un camion CL-625 placé longitudinalement pour maximiser le moment de flexion (les zones rouges correspondent aux empreintes des roues où les charges sont appliquées)

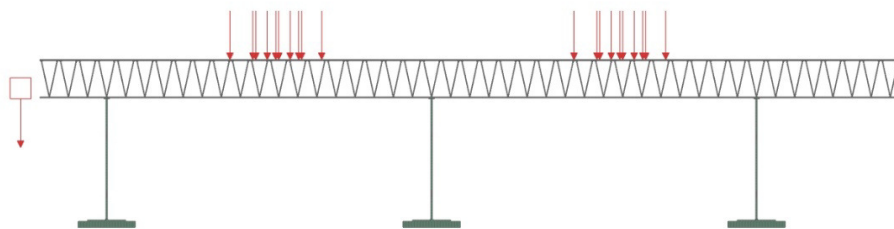


Figure 4.9 Coupe transversale d'un panneau (correspond à une voie) chargé par un camion CL-625 placé transversalement au centre de la voie

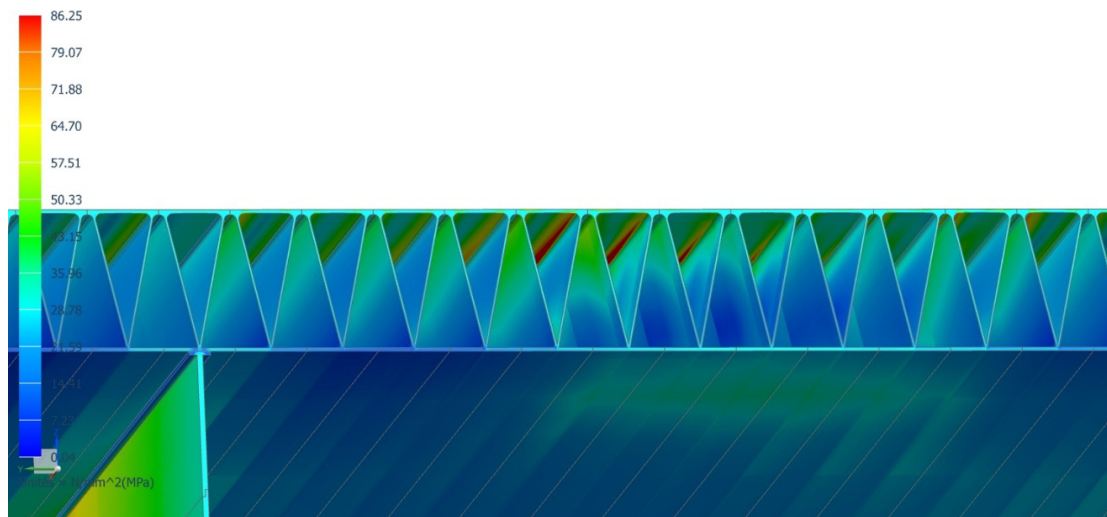


Figure 4.10 Contrainte de von Mises dans le platelage vis-à-vis d'un essieu à l'ÉLUL1 (en rouge les zones où les valeurs de la contrainte de von Mises est supérieure à 86,25 MPa)

On remarque sur la Figure 4.10 que dans les zones affectées thermiquement par la chaleur des soudures (ZAT, 25 mm de chaque côté de la soudure selon la norme) sur la membrure supérieure du platelage (de part et d'autre des joints longitudinaux soudés

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

reliant les extrusions côte à côte), il y a des régions où la contrainte atteint une valeur supérieure à la valeur de la résistance à l'ultime pondérée pour les zones soudées (86,25 MPa). Pour diminuer ces intensités, il faudrait ajouter de la matière dans les endroits les plus sollicités. Toutefois, notre limitation pour ces extrusions réside justement sur la quantité de matière totale pouvant être extrudée sur les presses disponibles au Québec. Pour ajouter de la matière dans les zones affectées thermiquement il faut soit diminuer la hauteur de l'extrusion, soit diminuer sa largeur. Diminuer sa hauteur n'est pas souhaitable puisque cela diminue la rigidité du platelage entre les poutres. Cela augmente les concentrations de contraintes au-dessus des poutres, et dans ces zones, on atteint déjà des valeurs de contrainte trop importantes par rapport à la limite pondérée adéquate. Pour ce qui est de la largeur, on est déjà à 100 mm, ce qui est très faible et il n'y a plus d'intérêt à diminuer cette valeur car elle augmenterait encore le nombre de soudures, ce qui diminuerait encore davantage la résistance globale du platelage.

4.3.4. Conclusion

La contrainte qui limite la quantité de matière due à la capacité limitée des presses à extruder actuellement en fonction au Québec, implique une faible largeur et des parois minces. Les analyses par éléments finis montrent qu'avec les extrusions de platelage considérées précédemment, la résistance au niveau des soudures entre ces extrusions est trop faible, par rapport aux contraintes développées lorsque les charges prescrites à l'ÉLUL 1 par la norme CAN/CSA S6-2014 sont appliquées sur un tablier constitué de ces extrusions de platelage et de poutres "assemblées" en aluminium. Les presses à extruder actuellement implantées au Québec ne sont pas en mesure de produire des extrusions de platelage de plus grandes dimensions ou plus massives que celles considérées dans les analyses faites jusqu'ici ; une capacité plus élevée d'extrusion rendrait possible la production des profilés plus massifs permettant de réduire les contraintes à des niveaux acceptables dans les zones critiques. Il n'est donc pas possible, à l'heure actuelle, de développer un système de tablier de pont tout aluminium dont l'ensemble des composants pourrait être fabriqué au Québec, qui pourrait respecter l'ensemble des critères établis à la section 1.3 et qui pourrait être potentiellement plus économique qu'une autre solution avec des matériaux plus traditionnels.

CHAPITRE 5 PROPOSITION D'UNE NOUVELLE CONCEPTION DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM

5.1. Introduction

Dans cette partie, on propose un concept de tablier tout aluminium qui nécessitera une presse à extruder de grande capacité (supérieure à 3000 tonnes) non disponible actuellement au Québec. Dans un premier temps, on fera l'hypothèse d'une presse de capacité importante. Puis, la géométrie du platelage est présentée, suivie de la liaison entre ce dernier et la poutre en I qui permet de garder l'effet composite. Ensuite, la conception de la poutre est détaillée. Enfin, une présentation de l'assemblage entre les panneaux qui constitueront le tablier au complet est effectuée.

5.2. Le platelage

On a vu précédemment qu'une presse à extruder avec un diamètre probablement supérieur à 230 mm devrait être utilisée pour espérer en arriver à un concept de tablier de pont tout aluminium qui pourrait éventuellement être considéré comme une alternative économique aux solutions de platelages traditionnels.

Selon l'information obtenue auprès des intervenants concernés, des discussions sont actuellement en cours entre l'industrie québécoise de l'aluminium, le ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MÉSI) et des entreprises étrangères afin d'inciter l'un d'eux à implanter au Québec une presse de grande capacité. Celle-ci pourrait alors être utilisée pour produire des extrusions pour le platelage en aluminium envisagé dans le présent projet de recherche.

Les caractéristiques de cette presse à extruder de grande capacité ne sont toutefois pas encore connues au moment de la rédaction de ce rapport. Selon les intervenants concernés, les choix qui seront faits dans le projet global de développement d'un platelage en aluminium québécois, à l'intérieur duquel s'inscrit le présent projet de recherche, pourraient influencer la décision qui serait prise relativement à cette presse. Autrement dit, on pourrait développer ici un concept de platelage qu'il ne serait pas possible de fabriquer au Québec, au moment de la rédaction de ce rapport ; on présume que la presse de grande capacité qui serait implantée éventuellement au Québec serait choisie de façon à être en mesure de produire les extrusions prévues dans ce concept. À défaut de quoi, la présente conception devra être révisée.

Dans ce qui suit, les caractéristiques des presses à extruder existantes dans le nord-est de l'Amérique du Nord sont analysées, pour déterminer ce qui pourrait être un choix réaliste pour la presse de grande capacité qui serait éventuellement implantée au Québec.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Les caractéristiques des presses à extruder sont nombreuses et peuvent être classées dans différentes catégories :

- Les dimensions maximales (en masse et en volume) des billettes d'aluminium qui peuvent être insérées dans une presse pour produire une seule extrusion ;
- Les dimensions de la chambre qui sont caractérisées en particulier par son diamètre intérieur, souvent donné en pouces, et qui limitent les dimensions du diamètre circonscrit des extrusions qui peuvent être produites par la presse ;
- La pression maximale dans la chambre. Une forte pression permet de produire des profilés extrudés avec des parois fines, ce qui peut être pertinent pour certaines applications, mais pas nécessairement dans le cas d'une extrusion qui serait utilisée pour fabriquer un platelage de tablier de pont.

Le Tableau 5.1 qui suit présente ces caractéristiques pour 33 presses à extruder se trouvant dans l'est de l'Amérique du Nord. Ces dimensions ont été recueillies au fil des années par le Pr Guillot (Guillot, 2013) et les presses ont peut-être été changées depuis. Néanmoins, ce tableau donne un bon ordre de grandeur des dimensions de presses étant ou ayant été commercialisées.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Tableau 5.1 Caractéristiques de presses à extruder existantes ou ayant existées dans le nord-est de l'Amérique du Nord (Guillot, 2013)

Force maximale de poussée		Dimensions maximales de billettes						Chambre				Pression maximal dans la chambre	
		Longueur		Diamètre		Poids		Diamètre intérieur		Section d'entrée			
Tonnes (2000 lbs)	MN	pouces	mm	pouces	mm	lb	kg	pouces	mm	po2	mm2	ksi	Mpa
500,0	4,5	12,0	305,0	3,5	89,0	11,3	5,1	3,7	95,0	11,0	7092,8	91,0	627,4
500,0	4,5	12,0	305,0	4,0	102,0	14,8	6,7	4,3	108,0	14,2	9154,5	70,5	486,1
898,9	8,0	18,0	457,0	4,4	113,0	27,2	12,4	4,7	120,6	17,7	11431,8	101,5	699,8
898,9	8,0	18,0	457,0	5,0	127,0	34,4	15,6	5,4	136,3	22,6	14595,9	79,5	548,1
1404,5	12,5	24,0	610,0	5,0	127,0	45,9	20,9	5,4	137,0	22,8	14738,8	123,0	848,1
1404,5	12,5	24,0	610,0	6,0	152,0	65,7	29,9	6,4	162,0	31,9	20603,3	88,0	606,7
1651,7	14,7	32,0	813,0	6,0	152,0	87,6	39,8	6,4	162,3	32,1	20698,4	103,0	710,2
1651,7	14,7	32,0	813,0	7,0	178,0	120,2	54,6	7,4	187,8	42,9	27688,8	77,0	530,9
1651,7	14,7	32,0	813,0	8,0	203,0	156,3	71,0	8,4	212,7	55,1	35533,0	60,0	413,7
1797,8	16,0	34,0	864,0	7,0	178,0	127,7	58,1	7,4	187,5	42,8	27624,3	84,0	579,2
1797,8	16,0	34,0	864,0	8,0	203,0	166,1	75,5	8,4	212,4	54,9	35429,6	65,5	451,6
2000,0	17,8	34,0	864,0	7,0	178,0	127,7	58,1	7,4	187,5	42,8	27609,7	93,5	644,7
2000,0	17,8	34,0	864,0	8,0	203,0	166,1	75,5	8,4	212,2	54,8	35366,6	73,0	503,3
2494,4	22,2	36,0	914,0	7,0	178,0	135,1	61,4	7,4	187,2	42,7	27519,5	117,0	806,7
2494,4	22,2	36,0	914,0	8,0	203,0	175,7	79,9	8,4	212,3	54,8	35384,1	91,0	627,4
2494,4	22,2	36,0	914,0	9,0	229,0	223,6	101,6	9,2	234,6	67,0	43215,9	74,5	513,7
3000,0	26,7	38,0	965,0	8,0	203,0	185,5	84,3	8,4	212,7	55,1	35528,9	109,0	751,5
3000,0	26,7	38,0	965,0	9,0	229,0	236,1	107,3	9,3	235,4	67,4	43513,7	89,0	613,6
3000,0	26,7	38,0	965,0	10,0	254,0	290,4	132,0	10,3	260,8	82,8	53410,7	72,5	499,9
4000,0	35,6	40,0	1016,0	10,0	254,0	305,8	139,0	10,2	260,3	82,5	53229,7	97,0	668,8
4000,0	35,6	40,0	1016,0	12,0	305,0	440,9	200,4	12,2	310,9	117,7	75938,6	68,0	468,8
4000,0	35,6	40,0	1016,0	13,0	330,0	516,2	234,6	13,3	338,2	139,2	89808,3	57,5	396,4
5000,0	44,5	45,0	1143,0	12,0	305,0	496,0	225,5	12,2	310,9	117,7	75925,6	85,0	586,1
5000,0	44,5	45,0	1143,0	14,0	356,0	675,8	307,2	14,3	364,1	161,3	104093,6	62,0	427,5
5000,0	44,5	45,0	1143,0	16,0	406,0	879,0	399,5	16,4	415,9	210,6	135877,9	47,5	327,5
6000,0	53,4	54,0	1372,0	12,0	305,0	595,4	270,6	12,2	310,9	117,7	75927,8	102,0	703,3
6000,0	53,4	54,0	1372,0	14,0	356,0	811,2	368,7	14,3	363,8	161,1	103951,7	74,5	513,7
6000,0	53,4	54,0	1372,0	16,0	406,0	1055,1	479,6	16,4	415,9	210,6	135877,9	57,0	393,0
6000,0	53,4	54,0	1372,0	18,0	457,0	1336,8	607,6	18,4	468,1	266,7	172091,5	45,0	310,3
8000,0	71,2	64,0	1626,0	13,0	330,0	826,1	375,5	13,3	338,1	139,2	89796,9	115,0	792,9
8000,0	71,2	64,0	1626,0	16,0	406,0	1250,4	568,4	16,4	415,9	210,6	135877,9	76,0	524,0
8000,0	71,2	64,0	1626,0	18,0	457,0	1584,3	720,1	18,4	468,1	266,8	172105,4	60,0	413,7
8000,0	71,2	64,0	1626,0	20,0	508,0	1957,6	889,8	20,4	518,0	326,7	210775,6	49,0	337,8

Pour une question d'économie au niveau de la fabrication et de la résistance mécanique, il est évidemment souhaitable de minimiser le nombre de soudures dans le platelage, ce qui permettrait de diminuer en conséquence le nombre de zones affectées thermiquement (ZAT) dues à la chaleur apportée par le procédé de soudage et améliorer ainsi le comportement global du platelage. Pour ce faire, on a donc intérêt à maximiser les dimensions des extrusions qui constitueront le platelage, en particulier leur largeur. Idéalement, on choisirait donc une presse de très grande capacité pouvant produire les extrusions les plus larges, comme celles de 8000 tonnes indiquées dans le bas du Tableau 5.2.

Il faut toutefois savoir que l'investissement requis pour l'implantation de telles presses de très grande capacité est considérable, soit de l'ordre de 50 à 100 M\$, selon l'information obtenue des intervenants concernés. De telles presses doivent également être en service pratiquement en continu pour maintenir leur rentabilité. À première vue, de l'avis des intervenants concernés, le marché potentiel pour les ponts à platelage en aluminium, bien qu'intéressant, n'aura pas l'envergure requise pour justifier

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

l'investissement associé à l'implantation et au fonctionnement d'une presse de très grande capacité, surtout si une presse existante de capacité comparable se trouve déjà relativement près du site d'implantation projeté.

Considérant ce qui précède, les auteurs du présent rapport sont venus à la conclusion qu'une presse de 6000 tonnes de capacité (telle que celle dont les caractéristiques sont encadrées en vert dans le Tableau 5.2) pouvait représenter un compromis réaliste. La géométrie des extrusions du platelage pour ce projet de tablier tout aluminium de même que pour le projet global de développement d'un platelage en aluminium québécois seront donc développés en fonction des limites imposées par la presse choisie de 6000 tonnes.

Tableau 5.2 Comparaison des presses québécoises existantes et de la presse de grande capacité choisie comme potentiellement implantable au Québec (Guillot, 2013)

Force maximale de poussée		Dimensions maximales de billettes						Chambre				Pression maximale dans la chambre	
		Longueur		Diamètre		Poids		Diamètre intérieur		Section d'entrée			
Tonnes (2000 lbs)	MN	pouces	mm	pouces	mm	lb	kg	pouces	mm	po2	mm2	ksi	Mpa
3000,0	26,7	38,0	965,0	9,0	229,0	236,1	107,3	9,3	235,4	67,4	43513,7	89,0	613,6
3000,0	26,7	38,0	965,0	10,0	254,0	290,4	132,0	10,3	260,8	82,8	53410,7	72,5	499,9
5000,0	44,5	45,0	1143,0	16,0	406,0	879,0	399,5	16,4	415,9	210,6	135877,9	47,5	327,5
6000,0	53,4	54,0	1372,0	16,0	406,0	1055,1	479,6	16,4	415,9	210,6	135877,9	57,0	393,0
6000,0	53,4	54,0	1372,0	18,0	457,0	1336,8	607,6	18,4	468,1	266,7	172091,5	45,0	310,3

En fonction de ce qui précède, le concept du platelage en aluminium a été orienté vers une solution avec extrusions pouvant être produites avec une presse de 457 mm (18 pouces) de diamètre circonscrit et qui seront installées parallèlement aux éléments du système porteur du tablier.

Tel qu'indiqué à la section 1.4, le MTMDET a choisi d'amorcer l'étude des platelages en aluminium par des projets pilotes sur des ponts de faible envergure situés sur des routes locales à faible débit. On a donc fixé la largeur hors-tout de notre platelage à 8900 mm, comme point de départ.

Pour des considérations de transport et puisque le platelage en aluminium peut être préfabriqué en usine, on doit considérer que celui-ci sera divisé en deux panneaux longitudinaux. Dans le cas présent, on considérera des panneaux d'environ 4450 mm de largeur chacun. Chaque panneau supportera l'équivalent d'une voie de circulation, l'accotement et le dispositif de retenue.

Puisque l'un des objectifs du projet global (au niveau du MTMDET) est d'évaluer s'il est envisageable de remplacer la dalle de béton d'un tablier à dalle sur poutres, le platelage en aluminium doit avoir une capacité transversale suffisante pour que le nombre de poutres requises pour un tablier avec platelage en aluminium ne soit pas supérieur au nombre de poutres dans un tablier à dalle sur poutres de même portée et même largeur. Typiquement, au Québec, les ponts à dalle sur poutres en acier dont la largeur hors tout est de 8900 mm comptent quatre poutres en acier, ce qui correspond au minimum exigé par le MTMDET afin de permettre un éventuel remplacement de dalle par phases sur ce

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

type de pont. Ceci implique donc que le platelage en aluminium devra posséder une capacité suffisante en flexion transversale pour qu'il puisse être supporté sur un nombre de poutres égal à celui pour un tablier à dalle sur poutres de même géométrie d'ensemble. Pour ce faire, il faut que le platelage soit plus profond que ce qui a été considéré en 1ère itération, soit 127 mm (voir figure 2.3). Toutefois, sur le plan de l'adaptation géométrique à une structure existante, il ne faudrait pas que la profondeur du platelage excède l'épaisseur de dalle la plus courante sur les ponts du MTMDET, soit 200mm.

Par conséquent, l'extrusion typique du platelage pourrait avoir une largeur standard de 405 mm et une hauteur de 200 mm tout en demeurant extrudable dans une presse de 457 mm de diamètre. Toutefois, on a limité la masse totale à 560 kg pour l'extrusion (correspondant environ au maximum du poids des billettes pour ce type de presse) et cela implique de limiter la largeur des extrusions à 370 mm.

Par ailleurs, on s'assurera dans la conception que les parois de l'extrusion typique aient une épaisseur supérieure ou égale à 5 mm, ce qui est une exigence de la norme CAN/CSA S6-2014 (article 17.7.2).

La conception sera faite en considérant que les extrusions seront assemblées entre elles par des soudures conventionnelles (MIG). La technologie de la soudure par friction-malaxage (en anglais friction-stir welding, FSW), qui est une technologie prometteuse pour l'aluminium car elle semble moins affecter la résistance des ZAT (Singh et al., 2012), n'est pas suffisamment développée au Québec à l'heure actuelle et ne sera donc pas considérée pour le moment dans le développement du platelage québécois. La géométrie des extrusions ne sera donc pas optimisée en fonction du FSW comme c'est le cas pour l'extrusion AlumaBridge GEN II. La préparation des joints soudés se limitera donc à une encoche en forme de "demi-V" à chaque extrémité des semelles supérieures et inférieures de chaque extrusion.

La Figure 5.1 présente la géométrie d'une extrusion typique élaborée en fonction des critères décrits ci-dessus. On peut noter que les « demi V », nécessaires à une soudure MIG, ne sont pas présents sur la Figure 5.1, il faudra les intégrer lors de l'envoi des plans aux extrudeurs.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

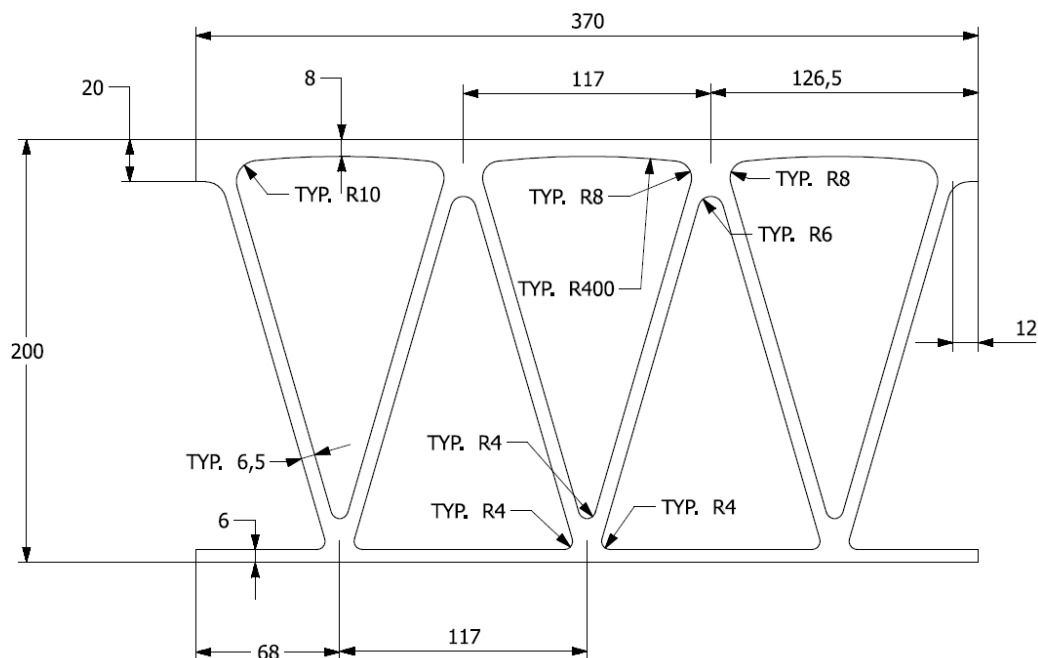


Figure 5.1 Proposition d'extrusion typique pour un platelage québécois

5.3. La liaison platelage poutre

Dans un tablier à dalle de béton sur poutres d'acier, la dalle et le système porteur résistent conjointement aux charges sollicitant le tablier, grâce à l'action composite développée entre la dalle et le système porteur par l'intermédiaire de connecteurs de cisaillement soudés sur les poutres qui rendent celles-ci solidaires avec la dalle. Cette action composite mène à un tablier plus rigide, plus résistant et, de façon générale, plus performant que si les poutres et la dalle n'étaient pas solidarisiées. Habituellement, ceci permet aussi des économies au niveau de la charpente d'acier, les poutres n'ayant pas besoin d'être aussi rigides car elles n'ont pas à supporter seules la totalité des charges permanentes et la surcharge routière, puisque le platelage contribue à la résistance d'ensemble sous les charges d'utilisation.

Compte tenu du coût de base relativement élevé de l'aluminium, il apparaît ainsi évident que l'on devra chercher, dans le projet global de développement d'un platelage en aluminium québécois, une solution permettant de rendre le platelage solidaire du système porteur, pour optimiser le comportement structural du tablier et améliorer les chances qu'un tablier à platelage en aluminium puisse éventuellement devenir une solution compétitive par rapport à un tablier à dalle sur poutres en acier.

Le fait de solidariser le platelage et le système porteur peut toutefois devenir problématique lorsque les deux sont composés de matériaux différents et que les

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

coefficients de dilatation thermique de ces matériaux sont significativement différents l'un de l'autre. C'est le cas pour l'aluminium et l'acier, alors que le coefficient de dilatation thermique du premier est le double de celui du second. Des contraintes élevées pourraient alors être générées dans la structure de tablier sous l'action d'un gradient thermique ou sous les variations saisonnières de la température. C'est un aspect que le projet global de développement d'un platelage en aluminium doit impérativement étudier (R778.1 *Étude des effets de variation thermique sur le comportement structural d'un tablier à platelage d'aluminium sur poutres d'acier, à action composite* (Leclerc, 2017)).

Dans un concept de tablier tout aluminium, la problématique de dilatation thermique différentielle entre le platelage et le système porteur ne se posera pas. Le défi réside plutôt dans le développement d'une solution pratique, efficace et économique pour réaliser la solidarisation du platelage et du système porteur.

L'approche choisie dans le présent projet consiste à solidariser le platelage et les poutres par l'intermédiaire d'une soudure horizontale située à la jonction entre l'âme des poutres et le bas d'une extrusion de liaison intégrée à même le platelage. Cette soudure se retrouvera près de l'axe neutre de la section mixte et ne devrait pas subir d'écarts de contraintes trop marqués sous la surcharge routière. *A priori*, la fatigue au niveau de la ZAT pour cette soudure longitudinale ne devrait donc pas être préoccupante, néanmoins il faudrait vérifier que le cisaillement dans la soudure au niveau des appuis ne dépasse pas la résistance. On pourrait, au besoin, faire varier l'épaisseur du joint soudé pour diminuer les contraintes dans cette zone.

Il est à noter que ces extrusions de liaison se retrouvent là où les efforts de flexion transversale (causés par les charges de roues entre deux poutres) sont les plus élevés au niveau de la semelle supérieure. La section de ces extrusions de liaison a donc été ajustée, par rapport à celle des extrusions typiques décrites précédemment, afin que les alvéoles des extrusions soient plus étroites et qu'il y ait davantage de matière au niveau de la semelle supérieure. De plus, les dimensions hors tout de ces extrusions de liaison ont été déterminées de façon à ce qu'elles puissent être fabriquées avec la presse de 6000 tonnes mentionnée plus haut.

Cette extrusion fait donc partie intégrante du platelage et de la poutre. Ses dimensions sont données à la Figure 5.2.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

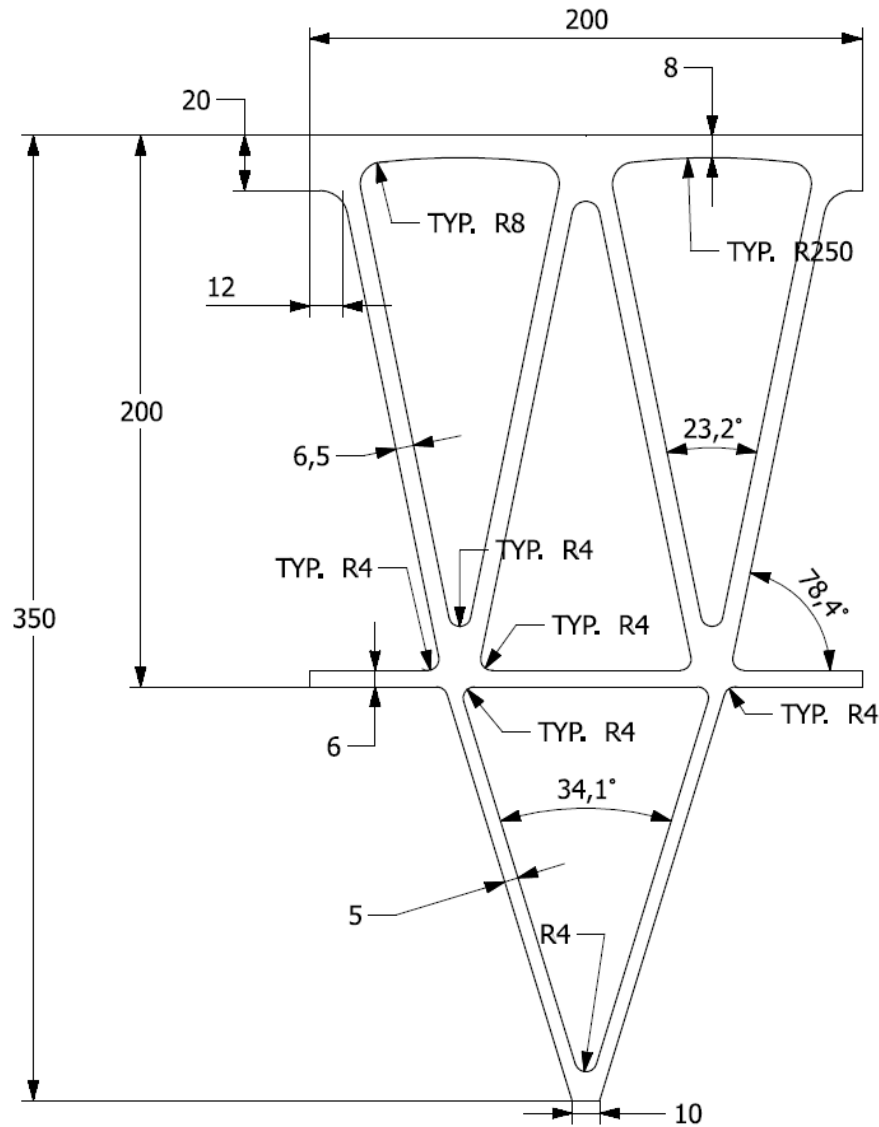


Figure 5.2 Proposition d'extrusion de liaison pour un tablier tout aluminium

Une fois les extrusions assemblées, le platelage est semblable à celui illustré à la Figure 5.3. Il faudra toutefois concevoir des extrusions d'extrémité afin d'attacher les glissières de sécurité. Ce travail sera effectué dans un projet de recherche suivant : R786.1 *Développement d'une solution de platelage en aluminium pour pont routier à poutres d'acier, avec action composite*. Enfin, le concept pour le raccordement entre les panneaux de platelage préfabriqués sera présenté dans la section 5.5. La largeur totale du platelage est de 8940 mm.

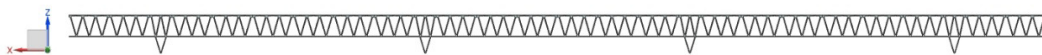


Figure 5.3 Proposition de platelage pour tablier tout aluminium

5.4. La partie poutre

5.4.1. Comparaison préliminaire poutre en acier et poutre en aluminium

La partie poutre doit apporter à la structure une bonne rigidité. On cherche ici à utiliser des poutres avec une conception particulière, soudable sur les extrusions de liaison précédemment présentées.

Il faut, dans un premier temps, comprendre pourquoi on choisit souvent des poutres en I pour les conceptions avec un platelage en béton ou en bois sur poutres d'acier.

L'acier est difficile à travailler ; il n'est pas facilement extrudable et son usinage peut devenir coûteux (sa dureté implique l'utilisation d'outils résistants qui s'usent rapidement, et son poids complique sa manutention). Toutefois, le procédé de laminage à chaud permet d'obtenir des pièces avec des géométries simples non dispendieuses. La forme en I permet quant à elle d'obtenir des bonnes inerties avec une quantité de matière donnée. Le coût de base du matériau (à la tonne) est habituellement bien moindre pour l'acier de construction que pour l'aluminium (du moins pour les nuances d'aluminium que l'on envisage pour les applications structurales type pont routier, c'est-à-dire le 6063-T6 et éventuellement le 6061-T6).

L'acier possède aussi un module d'Young trois fois plus grand que celui de l'aluminium (200 000 MPa pour l'acier, contre 70 000 MPa pour l'aluminium). Pour obtenir la même rigidité flexionnelle avec des poutres d'aluminium il faudra augmenter d'un facteur 3 l'inertie des poutres et donc augmenter leur profondeur. On combine à première vue un coût de matière première plus élevé et une obligation d'utiliser plus de matière pour obtenir par exemple une même inertie flexionnelle. Cela posera un problème majeur si la flèche contrôle le dimensionnement, ou si le dégagement vertical sous le pont est limité et requiert qu'on limite la profondeur du tablier. Dans tout autre cas, cela s'apparente à une contrainte qui peut être contrebalancée par d'autres facteurs.

En principe, une structure d'aluminium nécessitera moins d'entretien qu'une structure comparable en acier, à cause de la résistance de l'aluminium à la corrosion atmosphérique, et si la structure est conçue pour éliminer les risques de corrosion galvanique ou d'accumulation de débris sur la structure. On peut citer, par exemple, le pont d'Arvida construit entièrement en aluminium et qui n'a nécessité aucun entretien majeur en 67 ans (UQAC, 2017), à part au niveau des appuis et du contact entre l'aluminium et le béton. Un platelage en aluminium est aussi significativement plus léger qu'une dalle de béton⁴ et ne nécessite pas de recouvrement avec un enrobé bitumineux. En effet, un revêtement de surface antidérapant et mince devrait être suffisant pour assurer la sécurité des usagers tout en protégeant la surface du platelage contre l'abrasion ; un tel revêtement a d'ailleurs été appliqué sur le platelage du pont construit

⁴ 1,5 kPa vs 4,5 kPa pour le béton environ

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

par le MTMDET à Saint-Ambroise (Beaulieu & Internoscia, 2015). Notons également que, contrairement à un platelage en béton près de sa fin de vie utile ou un platelage en bois, le platelage en aluminium serait étanche ce qui contribuerait à réduire notablement l'exposition des éléments du système porteur aux eaux de ruissellement et aux agents de déglçage provenant du dessus du tablier.

Utiliser un unique matériau pour la partie poutre et le platelage permet aussi de s'affranchir des contraintes dues à la différence de dilatation thermique entre les poutres en acier et le platelage. Le soudage demande quant à lui une main-d'œuvre qualifiée et affecte significativement les propriétés mécaniques de l'aluminium dans les ZAT. Toutefois, le soudage pourrait être réalisé en usine, ce qui diminuerait le temps de construction au chantier par rapport au boulonnage du platelage sur les poutres.

Finalement, rappelons qu'un tablier de pont tout aluminium peut être fabriqué en usine avec un meilleur contrôle de qualité. Celui-ci peut alors être installé au chantier dans un temps très court par rapport à un tablier acier/béton ou, dans une moindre mesure, un tablier acier/bois.

Tous ces avantages à utiliser le concept de tablier de pont tout aluminium représentent un atout financier important sur le long terme quitte à augmenter le coût initial.

5.4.2. Conception des poutres d'aluminium

5.4.2.1. Proposition

Pour la conception, on veut avoir un maximum d'inertie avec un minimum de matière. On cherche donc à avoir une âme la plus haute possible avec une semelle inférieure d'aire élevée, pour compenser la grande flexibilité de l'aluminium, tout du moins si on le compare à l'acier. Cependant, il faudra faire attention à la fatigue dans la semelle inférieure faite d'un assemblage d'extrusions et qui travaillera en traction.

La hauteur du tablier est toutefois limitée par le MTMDET dans le Manuel de Construction des Structures (MTMDET, 2016) conformément au tableau 1.8-2 de la section 1.8.2 *Contraintes à respecter*. Pour des portées de 10 à 25 mètres, l'épaisseur du tablier recommandée est de $L/25$ pour les ponts acier-bois et de $L/20$ pour les ponts acier-béton. Toutefois, ces valeurs semblent plus être des élancements typiques que des contraintes dans un but structural.

Il est aussi précisé dans la section 1.10.3.3 du Manuel de Construction des Structures que « *pour des raisons d'esthétique, l'élancement d'une poutre de profondeur constante (L/d , longueur/profondeur) peut varier de 5 à 30, et même à 50 si les travées sont continues.* »

Se soumettre à un ratio portée/élancement de l'ordre de 20 avec l'utilisation de l'aluminium n'est pas viable puisque l'on cherche à avoir une grande inertie de manière

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

économique, c'est-à-dire en augmentant la hauteur des poutres. On se fixera toutefois un ratio minimal de 15 qui semble être un compromis entre les valeurs recommandées du Manuel de Conception des Structures et l'optimisation de l'utilisation de l'aluminium.

Pour concevoir les poutres, on ne peut pas fixer une géométrie sans penser parallèlement aux contraintes de fabrication. En effet, si l'on utilise des plaques par exemple, il y a des épaisseurs à respecter. Si l'on utilise des extrusions, on a vu à la section 2.4.1 les contraintes limitant les scénarios. En pratique, les extrusions sont moins dispendieuses que les plaques et elles permettent d'avoir des géométries plus complexes. En particulier, les plaques laminées vendues sur le marché ne dépassent pas 3 mètres de longueur, ce qui est bien inférieur à ce que l'on souhaite. On a donc choisi dans cette étude que les poutres soient entièrement composées de pièces extrudées, que ce soit pour la semelle supérieure et le platelage combinés, l'âme ou la semelle inférieure. De cette façon, la longueur de 15 mètres sera atteinte.

On peut voir à la Figure 5.4, la géométrie choisie dont la hauteur totale est de 960mm.

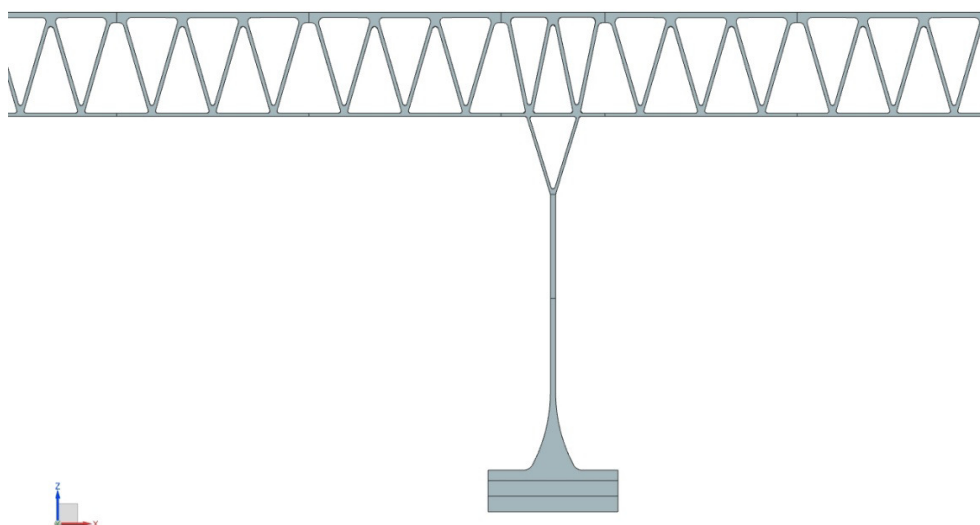


Figure 5.4 Proposition de concept de poutre tout aluminium

Cette géométrie possède une semelle importante (80 mm de hauteur et 250 mm de largeur) qui ne peut pas être extrudée en une seule pièce. La semelle inférieure devra donc être composée de plusieurs pièces qui devront être reliées entre elles de façon à maximiser la résistance en fatigue au niveau de cette semelle. À cet égard, il convient de noter que la norme CAN/CSA S6-2014 demande, à l'article 17.22.2.4.1, que tous les joints boulonnés qui doivent résister au cisaillement entre pièces assemblées, soient conçus comme des assemblages antiglisement. Pour la semelle inférieure de la poutre, si l'on utilise des extrusions plates boulonnées, il faudra un nombre élevé de boulons avec des plaques de répartition, ce qui serait dispendieux. On propose donc différentes solutions envisageables pour la partie inférieure de la poutre.

5.4.2.2. Boulonnage simple

Les avantages principaux de l'utilisation des boulons résident dans la simplicité qu'ils représentent ; ils sont très utilisés avec l'acier en particulier. Toutefois, cette technologie implique un affaiblissement dû à la présence des trous.

La norme spécifie, pour ces types d'assemblages, qu'ils soient en aluminium, en acier galvanisé ou en acier inoxydable (CAN/CSA S6-2014 17.4.4). En pratique, les boulons seront en acier galvanisé car ils sont moins coûteux que les boulons en aluminium ou en acier inoxydable, et qu'ils sont plus résistants que ceux en aluminium. En outre, l'aluminium des extrusions se corrompt plus rapidement avec les boulons en acier inoxydable qu'avec ceux en acier galvanisé (selon les informations recueillies auprès du laboratoire des chaussées du MTMDet). Ce choix de boulons se retrouve également pour les panneaux de signalisation en aluminium fixé à un platelage contenant de l'acier.

Les assemblages boulonnés sont la solution la plus classique : l'avantage principal est qu'ils sont plus faciles à mettre en place en chantier que les soudures. Toutefois, pour la partie inférieure de la poutre, l'assemblage se fait en usine et on propose donc de nouvelles solutions.

5.4.2.3. Clavetage

La Figure 5.5 illustre la notion de clavetage. Cette solution utilise des boulons pour reprendre les efforts de traction qui sont minimes. Les efforts de cisaillement qui sont beaucoup plus importants sont repris quant à eux par des clavettes comme sur la Figure 5.5 .

On ne parle pas ici d'un véritable d'un assemblage antiglisement ici puisque le nombre de boulons en traction requis pour résister à la tendance des pièces à se séparer est de loin inférieur au nombre de boulons en cisaillement qui serait requis pour assurer une résistance adéquate au glissement. La friction entre les extrusions n'intervient pas et cela devient donc un assemblage par contact.

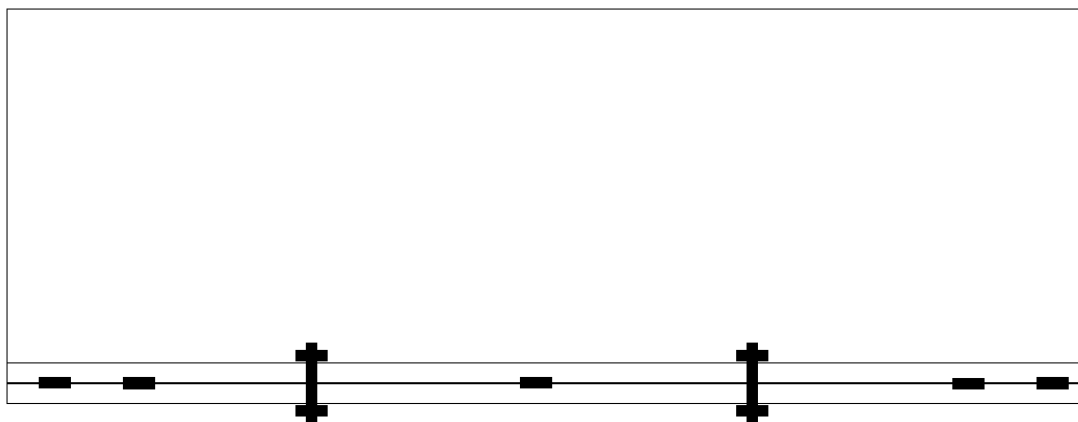


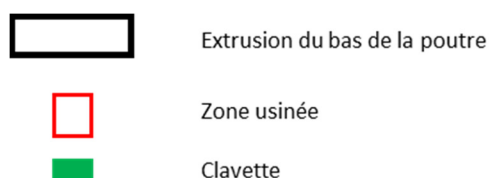
Figure 5.5 Clavetage et boulonnage

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Les clavettes ne seront pas équiréparties sur toute la longueur de la semelle inférieure. Les efforts de cisaillement dans les clavettes reliant les plaques de la semelle inférieure sont maximaux au niveau des appuis et faibles à mi-portée de la poutre.

Cette méthode nécessite un usinage précis (avec des tolérances de type h9 soit, à titre d'exemple, inférieur à 74 microns pour un trou de clavette de 50 à 80 mm) pour aligner les trous prévus pour les clavettes. Pour atteindre un tel niveau de tolérance sur des pièces de 15 mètres de long, cela nécessite des outils de très grande précision. Toutefois, toutes les dimensions de l'assemblage ne nécessitent pas un tel niveau de tolérance.

La méthode pour usiner les pièces et obtenir un assemblage *a priori* correct est décrite sur la figure ci-dessous. Les schémas suivent la légende suivante :



Comme sur la Figure 5.6, les deux extrusions (haute et basse de l'assemblage) sont fixées parallèlement. Les valeurs de b_1 et b_2 doivent alors être identiques, (c'est-à-dire que leurs dimensions doivent être les mêmes à un niveau bien inférieur à la tolérance requise pour l'assemblage). Ceci sera le cas pour toutes les parties usinées (toutes les parties en rouge). Au contraire, les distances entre les zones usinées (exemple : la distance a) ne nécessitent pas d'être précises à un niveau inférieur au millimètre.

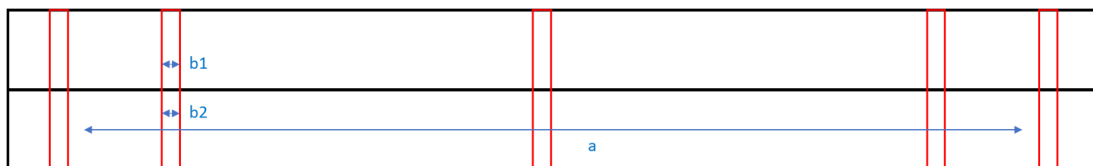


Figure 5.6 Schéma (vue du dessus) de deux extrusions placées parallèlement et usinées en même temps

Les extrusions sont ensuite superposées et boulonnées (non indiqué sur le schéma) pour éviter tout déplacement vertical des extrusions. Les trous pour les clavettes sont alors superposés comme sur la Figure 5.7.

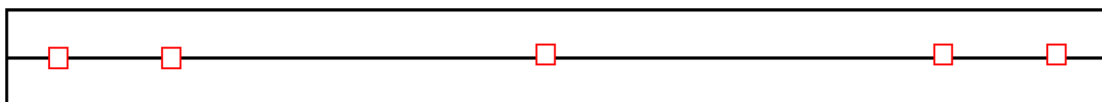


Figure 5.7 Schéma (vue de profil) de deux extrusions superposées et précédemment usinées

Enfin, on insère les clavettes dans les trous prévus à cet effet. La tolérance h9 prise en exemple précédemment implique que la clavette est légèrement (entre 0 et 74 microns)

plus large que le trou. Cela permet d'assurer la reprise des efforts de cisaillement. Pour insérer la clavette, deux approches peuvent être utilisées. D'une part, cela peut se faire en la forçant à l'aide d'une masse. D'autre part, on peut la refroidir pour diminuer ces dimensions (frettage). En revenant à température ambiante, la clavette comblera le trou. Enfin, on note qu'il faut laisser un jeu entre la partie supérieure de la clavette et la partie inférieure du trou (et entre la partie inférieure de la clavette et la partie supérieure de l'extrusion basse de l'assemblage) pour ne pas engendrer de contraintes verticales dans l'assemblage. La Figure 5.8 illustre l'assemblage après insertion des clavettes.

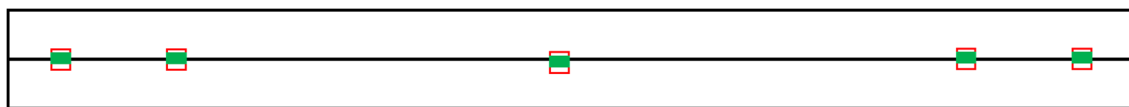


Figure 5.8 Schéma (vue de profil) de deux extrusions superposées et précédemment usinées avec introduction des clavettes et représentation des jeux entre clavettes et extrusions

5.4.2.4. Extrusions spéciales

Les extrusions offrent des possibilités de géométries diverses. Pour obtenir un assemblage antiglisement performant, il est possible de créer des dents sur les extrusions (Figure 5.9). Cela permet d'augmenter la surface de frottement, mais surtout, à l'aide d'un angle judicieusement choisis (c'est-à-dire faible puisque la force variera en fonction de l'inverse du sinus de l'angle), de créer une résistance importante au cisaillement par frottement à l'aide d'un effort de compression faible (voir Figure 5.10).

Cette technique est utilisée dans d'autres secteurs de l'industrie, en particulier pour les poulies courroies trapézoïdales (Figure 5.10), et pourra être testée. L'objectif est d'obtenir une plastification de l'aluminium avant d'obtenir le glissement.

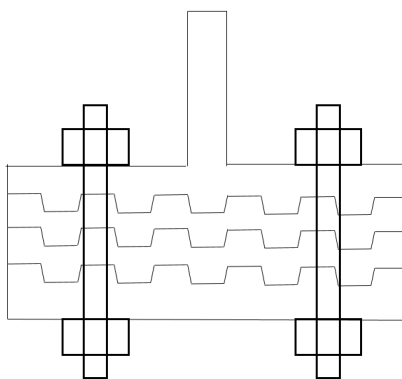


Figure 5.9 Solution avec extrusions à dent

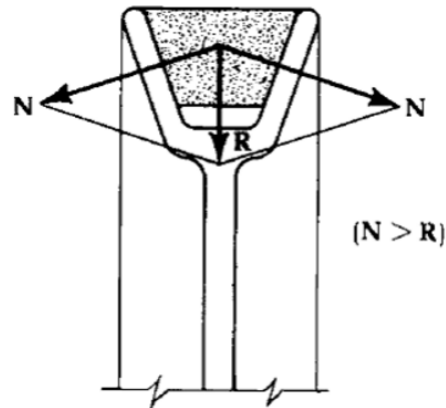


Figure 5.10 Transmission des efforts dans une poulie courroie trapézoïdale

(Delaboure, 2016)

5.5. Assemblage des panneaux de platelage au chantier

Dans le cahier des charges de ce projet, il est nécessaire que le pont soit assemblable rapidement en chantier. Pour cela, le tablier tout aluminium envisagé doit être fabriqué en usine en deux panneaux distincts qui seront rapidement installés au chantier à l'aide d'un équipement de levage léger. Une fois ces deux panneaux mis en place sur le système porteur du pont au chantier, il faudra qu'ils soient reliés l'un à l'autre par un système d'assemblage étanche et résistant.

La solution mise en place pour le pont de Saint-Ambroise est illustrée à la Figure 5.11.

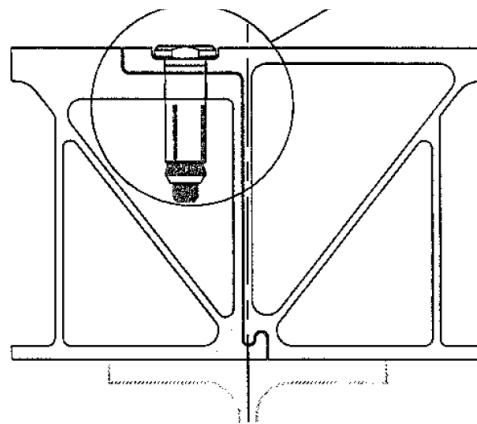


Figure 5.11 Assemblage des panneaux de platelage du pont Saint-Ambroise (Beaulieu & Internoscia, 2015)

Cet assemblage a été conçu avec des boulons aveugles à douille expansible du modèle « Hollo-Bolt » de la compagnie Lindapter. Ce type de boulon ne possède toutefois pas la résistance suffisante (voir l'ANNEXE 6) pour développer la force de précontrainte

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

développée par serrage exigée par la norme CAN/CSA S6-2014 pour les boulons des assemblages antiglisement.

Enfin, le coût des boulons aveugles (entre 10 et 40 US\$ selon des demandes faites à l'Université Laval dans le cadre du projet R779.1) et les imprécisions sur leur résistance amènent à proposer une solution permettant d'utiliser des boulons conventionnels.

Pour diminuer le nombre de boulons, on propose une solution où le cisaillement vertical est transmis par les extrusions, c'est-à-dire directement par la matière (Figure 5.12). La résistance est alors obtenue sur toute la portée du pont et non localement via les boulons, ce qui diminue les concentrations de contrainte. Les boulons restants maintiendront en position le « chapeau » (extrusion de couleur gris bleu de la Figure 5.12) et reprendront les efforts de cisaillement horizontaux qui devraient être quasi inexistant (il correspondrait à un décalage axial entre les panneaux).

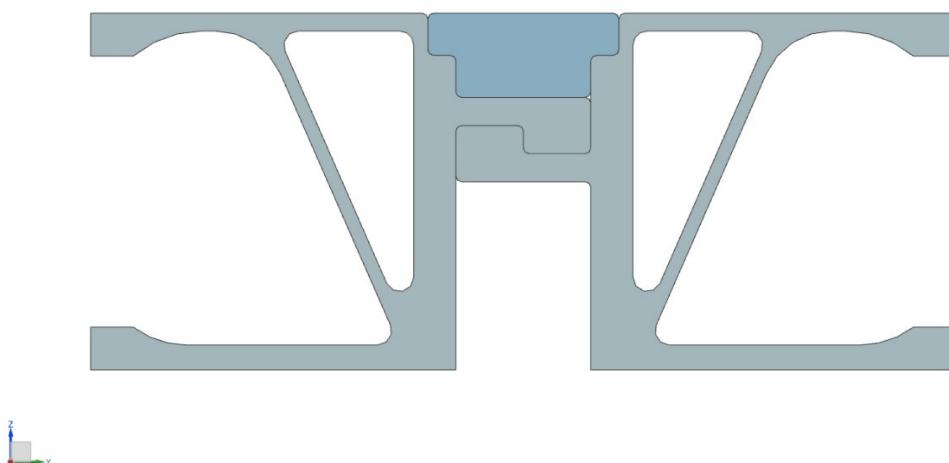


Figure 5.12 Proposition d'assemblage des panneaux de tablier tout aluminium au chantier

La partie supérieure est constituée d'une extrusion qui empêche l'accumulation d'eau au niveau du joint comme sur la Figure 5.12. On pourra, si cela est nécessaire ajouter des joints plats sous les « ailes » du chapeau ou des joints coniques dans les coins. Cette solution permet de changer aisément les joints au cours de la durée de vie de l'ouvrage.

Cette solution devra être testée avant d'être mise en œuvre.

CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS ÉLÉMENTS FINIS VIS-À-VIS DU CALCUL DE LA NORME CAN/CSA S6-2014

6.1. Fractions de charge de camion recommandées pour les tabliers à platelage en aluminium

6.1.1. Fractions de charge de camion selon la norme CAN/CSA S6-2014

Le chapitre de la norme CAN/CSA S6-2014 portant sur les ouvrages en aluminium (chapitre 17) est une addition très récente : ce chapitre n'existait pas dans la version antérieure de la norme (2006). Lorsqu'on en étudie le contenu, on constate que ce chapitre a apparemment été largement calqué sur celui du chapitre sur les ouvrages en acier. Il n'est alors pas surprenant que le chapitre 17 ne traite que de pièces aux géométries simples et classiques, comme le sont habituellement les pièces en acier. Or, les extrusions d'aluminium aux géométries complexes devraient en principe permettre une bien meilleure répartition des contraintes ; cela s'avère cependant virtuellement impossible à calculer avec la norme. De plus, le contenu du chapitre des ouvrages en acier repose sur des décennies d'expérience, de recherche et de développement. Le comportement des pièces d'acier sous différentes conditions de sollicitation est bien connu et bien compris, et les différents facteurs, coefficients et constantes utilisés dans les équations de conception des structures d'acier ont dans la grande majorité des cas été optimisés au fil des années. Cela n'est toutefois pas le cas avec l'aluminium : l'expérience canadienne dans le domaine des ponts en aluminium est extrêmement limitée. Les coefficients et autres valeurs spécifiés dans le chapitre 17 de la norme sont donc généralement très prudents, à cause de l'actuel manque de connaissances dans ce domaine. De ce fait, la conception de ponts en aluminium peut être handicapée parce qu'il est difficile à l'heure actuelle d'utiliser le matériau de façon optimale, à cause de l'approche conservatrice inhérente au chapitre 17 de la norme.

En particulier, pour les platelages en aluminium, la norme CAN/CSA S6-2014 semble être significativement prudente au niveau du calcul des fractions de charge de camion de la méthode simplifiée pour l'analyse des efforts longitudinaux (article 5.6). Pour les ponts à géométrie simple qui rencontrent les critères stipulés à l'article 5.6.2, la norme permet de faire l'analyse des efforts longitudinaux au moyen de la méthode d'analogie de la poutre. Cette méthode est paramétrée dans la norme selon les indications des articles 5.6.3 à 5.6.9. Le principal paramètre de cette méthode d'analyse est la fraction de charge de camion, F_T , plus anciennement appelé « facteur d'essieu » dans la pratique, et qui correspond à la fraction des effets de la surcharge routière appliquée sur le tablier qui sera reprise par un élément porteur donné (une poutre ou une bande unitaire de dalle de portique béton, par exemple). Pour un même pont, la fraction de charge de camion prend différentes valeurs selon le type d'effort (flexion, cisaillement) et selon l'état limite (ultime, utilisation, fatigue) considéré. En principe, si le platelage d'un tablier à poutres était infiniment rigide, la fraction de charge de camion serait égale pour

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

chaque poutre du système porteur. Ce n'est toutefois jamais le cas en réalité, et la fraction de charge de camion permet d'évaluer comment les effets de la surcharge routière sont répartis transversalement entre les poutres du tablier.

Pour les ponts de type poutre (comme les tabliers à dalle sur poutres ou les tabliers à platelage d'aluminium sur poutres), les fractions de charge de camion sont calculées avec les expressions qui suivent (CAN/CSA S6-2014, article 5.6.4.3 : (6.1)(6.2)) :

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c (1 + \mu \lambda)} \geq 1,05 \frac{n R_L}{N} \quad \text{pour l'ÉLU et l'ÉLUT} \quad (6.1)$$

$$F_T = \frac{S}{D_T \gamma_c (1 + \mu \lambda + \gamma_e)} \geq 1,05 \frac{1}{N} \quad \text{pour l'ÉLF} \quad (6.2)$$

avec :

μ : coefficient de modification de la largeur de voie ;

D_T : largeur de répartition des charges des camions, m ;

S : espacement entre axes des poutres longitudinales d'un pont à dalle sur poutres, m ;

γ_c : coefficient de modification de charge de camion pour les ponts à dalle sur poutres ;

γ_e : coefficient de modification de charge de camion pour la poutre extérieure des ponts à dalle sur poutres ;

λ : paramètres de largeur de voie ;

n : nombre de voies de calcul d'un pont conformément à l'article 3.8.2 pour la conception des ponts ;

R_L : facteur de modification de charge tenant compte des situations de chargement multiple de voies sur un pont, selon l'article 3.8.4.2 pour la conception ;

N : nombre de poutres longitudinales sur la largeur B du tablier du pont.

On remarque dans les équations pour F_T que la fraction de charge de camion est inversement proportionnelle à D_T .

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Les tabliers tout aluminium, comme celui étudié dans le présent projet de recherche ne sont pas considérés dans les différentes possibilités couvertes par l'article 5.6 de la norme CAN/CSA S6-2014. Toutefois, pour les tabliers à platelage en aluminium sur poutres d'acier, les valeurs de D_T applicables selon la norme sont données au tableau 5.10, à l'article 5.6.7.4. Ces valeurs sont reproduites dans le Tableau 6.1 ci-dessous.

Tableau 6.1 D_T pour les platelages en aluminium sur des poutres d'acier (CAN/CSA S6-2014 Tableau 5.10)

Type de pont	Condition	N	Moment de poutre intérieure et extérieure	Cisaillement pour poutre inférieure
Platelage en aluminium sur poutres d'acier	ELUL et ELUT	1	2,4	2,4
		≥ 2	2,55	2,55
	ELF	Tous	2,4	2,4

Il est à noter que la norme spécifie à l'article 5.6.7.4 que « dans tous les cas, le coefficient de correction de largeur λ doit être égal à zéro. »

Au premier coup d'œil, ce tableau apparaît extrêmement simpliste lorsqu'on le compare avec les autres tableaux qui donnent les valeurs de D_T pour différents types de tabliers dans les articles 5.6.6 à 5.6.9 de la norme CAN/CSA S6-2014. Cette simplicité est particulièrement évidente si l'on fait la comparaison avec le tableau 5.3 de la norme, qui donne les valeurs des coefficients D_T , λ , γ_c et γ_e pour les ponts à dalle sur poutres dans le cas des classes de route A et B, et qui est recopié dans le Tableau 6.2.

**NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE
EN CHANTIER**

Tableau 6.2 Coefficients D_T , λ , γ_c et γ_e pour les ponts à dalle sur poutres dans le cas des classes de route A et B (CAN/CSA S6-2014 Tableau 5.3)

Condition	Effet des charges	n	D_T	λ	γ_c	γ_e
ÉLUL et ÉLUT	Moment intérieur	1	$4,60 - \frac{3,10}{\sqrt{L_e} + 5}$	$0,05 - \frac{0,10}{L_e}$	1,0	Sans objet
		≥ 2	$4,60 - \frac{5,30}{\sqrt{L_e} + 5} \geq 2,80$	$0,10 - \frac{0,25}{L_e}$	1,0	Sans objet
	Moment extérieur	1	$3,30 + \frac{L_e}{300}$	$0,05 - \frac{0,10}{L_e}$	Voir le tableau 5.5	Sans objet
		2	$3,50 + \frac{L_e}{500}$	$0,10 - \frac{0,25}{L_e}$	Voir le tableau 5.5	Sans objet
		≥ 3	$3,40 + \frac{L_e}{500}$	$0,10 - \frac{0,25}{L_e}$	Voir le tableau 5.5	Sans objet
	Cisaillement	1	3,50	0,0	Voir le tableau 5.6	Sans objet
		≥ 2	3,40	0,0	Voir le tableau 5.6	Sans objet
	Moment intérieur	1	$4,60 - \frac{3,10}{\sqrt{L_e} + 5}$	0,05	Voir le tableau 5.4	0,0
		2	$4,80 - \frac{3,00}{\sqrt{L_e}}$	0,05	Voir le tableau 5.4	0,0
		3	$4,95 - \frac{3,50}{\sqrt{L_e}}$	0,05	Voir le tableau 5.4	0,0
		≥ 4	$5,15 - \frac{4,00}{\sqrt{L_e}}$	0,05	Voir le tableau 5.4	0,0
ÉLF	Moment extérieur	1	$3,25 + \frac{L_e}{200} \leq 3,50$	0,05	Voir le tableau 5.5	Voir le tableau 5.7
		2	$3,55 + \frac{L_e}{200} \leq 3,80$	0,05	Voir le tableau 5.5	Voir le tableau 5.7
		≥ 3	$3,65 + \frac{L_e}{150} \leq 4,10$	0,0	Voir le tableau 5.5	Voir le tableau 5.7
	Cisaillement	1	3,50	0,0	Voir le tableau 5.6	0,0
		≥ 2	3,60	0,0	Voir le tableau 5.6	0,0
	Moment intérieur	1	$4,60 - \frac{3,10}{\sqrt{L_e} + 5}$	0,05	Voir le tableau 5.4	0,0
		2	$4,80 - \frac{3,00}{\sqrt{L_e}}$	0,05	Voir le tableau 5.4	0,0
	Cisaillement	1	3,50	0,0	Voir le tableau 5.6	0,0
		≥ 2	3,60	0,0	Voir le tableau 5.6	0,0

En plus de l'extrême simplicité du Tableau 6.1, comparé au Tableau 6.2, on remarque aussi que les valeurs minimales du coefficient D_T sont, dans tous les cas, plus élevées dans le Tableau 6.2 que dans le Tableau 6.1. Pour un pont de géométrie donnée, cela implique que les fractions de charge de camion F_T seraient significativement plus faibles avec un tablier à dalle sur poutres qu'avec un tablier à platelage en aluminium sur poutres d'acier. Ceci n'est pas nécessairement surprenant, considérant qu'une dalle de béton armé devrait normalement être plus rigide transversalement qu'un platelage en aluminium, mais on peut se demander jusqu'à quel point. Par exemple, pour le cisaillement à l'ÉLUL dans une poutre intérieure d'un tablier à platelage sur poutres

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

d'acier à deux voies de circulation, l'effort à considérer dans une poutre sous un platelage en aluminium ($D_T = 2,55$) serait-il réellement 33% plus élevé que si la même poutre se trouvait sous une dalle de béton ($D_T = 3,40$) ? Un platelage en aluminium est-il à ce point plus flexible qu'une dalle de béton ? Ces constats et interrogations amènent à remettre en question l'approche prudente de la norme pour ce qui est des valeurs de D_T pour les platelages en aluminium, sachant que les valeurs du Tableau 6.2 reposent sur des décennies d'expérience avec les ponts à dalle sur poutres, alors que l'expérience canadienne avec les ponts à platelage en aluminium est, en pratique, inexistante.

À cet égard, le commentaire de la norme, CAN/CSA S6.1-2014, ne donne absolument aucun éclairage sur l'origine des valeurs de D_T données dans le tableau 5.10. En effet, l'article C5.6.7 du commentaire ne mentionne que les tabliers à platelage de bois sur poutres d'acier⁵. Il semblerait donc que les platelages en aluminium ont été inclus dans la section 5.6.7 de la norme essentiellement par défaut. D'ailleurs, si l'on regarde les valeurs données dans le tableau 5.8 de la norme, qui s'applique aux platelages en bois sur poutres d'acier, on constate que les valeurs qui s'appliqueraient aux platelages en aluminium selon le tableau 5.10 de la norme sont les mêmes que pour les platelages à madriers de bois, comme le montre le Tableau 6.3.

Tableau 6.3 D_T pour les platelages en madriers de bois (CAN/CSA S6-2014 Tableau 5.8)

	Condition	N	Moment de poutre intérieure et extérieure	Cisaillement pour poutre inférieure
Platelage en madriers de bois	ELUL et ELUT	1	2,4	2,4
		≥ 2	2,55	2,55
	ELF	Tous	2,4	2,4

Ceci revient donc à dire que, selon la norme CAN/CSA S6-2014, la rigidité transversale d'un platelage en aluminium ne serait pas supérieure à celle d'un platelage de pont acier-bois typique au Québec, composé de traverses 8"x8" en bois et de madriers 4"x6" longitudinaux, et ce peu importe l'épaisseur ou l'inertie de la section de ce platelage. Il va sans dire qu'il apparaît illogique qu'un platelage métallique soit aussi souple qu'un platelage de bois.

⁵ Texte intégral de l'article C5.6.7: « Smith (1999) analysed approximately 120 wood deck-on-girder bridges for determining D_T for the fatigue and vibration limit state. No correction factors were determined for the effects of vehicle edge distance. The equations for D_T for the external girders were selected using a minimum value of $D_{VE}=1.20$ m. »

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Une discussion téléphonique tenue le 15 mars 2017, par un des co-auteurs de ce rapport, avec le responsable du comité de la rédaction du chapitre 5 de la norme canadienne, a permis de connaître l'origine des valeurs données dans le tableau 5.10 de cette norme : elle se base sur un platelage en bois (madriers) car il n'existait pas de données probantes pour les platelages en aluminium à ce moment. Une approche prudente a été mise de l'avant par les membres du comité.

Suite à ce constat, il apparaît essentiel que les fractions de charge de camion prescrites par la norme pour les platelages en aluminium soient révisées. En effet, l'approche prudente associée aux valeurs obtenues avec la norme constitue assurément un obstacle au développement de solutions économiques de platelage en aluminium. Cette problématique devra être étudiée dans le projet de recherche R786.1 ou dans un nouveau projet concernant le développement d'un platelage en aluminium québécois, qui sera conçu pour être installé sur un système porteur constitué de poutres en acier.

Pour ce qui est du présent projet de recherche portant sur un tablier tout aluminium, une évaluation des fractions de charge de camion propres à ce type de tablier en utilisant une modélisation par éléments finis a été faite.

6.1.2. Proposition d'une fraction de charge de camion au moyen des éléments finis

6.1.2.1. Démonstration théorique

Pour le cisaillement, la fraction de charge de camion est définie comme le rapport de la réaction d'appuis avec la charge appliquée. Dans le cas d'un tablier de 15 mètres, la surcharge routière (les trois essieux arrière des deux camions CL-625 nécessaires pour avoir un cisaillement maximal) sera placée longitudinalement et transversalement pour maximiser la sollicitation d'une poutre en cisaillement.

Pour la flexion, la fraction de charge de camion est définie comme le rapport du moment de flexion repris par une poutre par rapport au moment de flexion global. Néanmoins, le moment de flexion dans chaque section de tablier semble proportionnel à la somme des réactions d'appuis dans ladite poutre. Par la suite, on considérera que le ratio du moment de flexion repris par une poutre par rapport au moment de flexion global est le même que celui des réactions d'appuis avec la charge totale appliquée (on donne en ANNEXE 2 des exemples afin d'étayer cette approche). Dans le cas de la flexion, la surcharge routière (les quatre essieux avant des deux camions CL-625 dans notre cas) sera placée longitudinalement et transversalement pour maximiser la sollicitation en flexion d'une poutre.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Dans les deux cas (flexion et cisaillement) on a :

$$F_{Ti} = \frac{(R_{i\ tot1} + R_{i\ tot2})}{R_{tot}} \quad (6.3)$$

avec :

F_{Ti} : la fraction de charge de camion de la poutre i ;

$R_{i\ tot1} + R_{i\ tot2}$: la somme des réactions aux appuis de la poutre i ;

R_{tot} La charge totale appliquée sur le pont ;

Pour obtenir la fraction de charge de camion globale pour le tablier de pont donné, on prendra le maximum des fractions de charge de camion.

6.1.2.2. Définition des modèles éléments finis

On applique cette méthode dans les modèles éléments finis en recherchant la position de la surcharge routière qui maximisera la sollicitation en flexion dans une des poutres intérieures (la position sera différente pour la sollicitation maximale en cisaillement).

Pour cela :

- On modélise le tablier de pont au complet ;
- On place (longitudinalement pour obtenir le moment fléchissant maximal conformément au tableau 3.2-4 du manuel de conception des structures) un camion CL-625 sur une des voies en juxtaposant son gabarit à la ligne centrale ;
- On positionne ensuite un second camion longitudinalement pour obtenir le moment fléchissant maximal conformément au tableau 3.2-4 du manuel de conception des structures dans la seconde voie. Il faut faire varier sa position transversale pour obtenir une sollicitation maximale dans la poutre intérieure de cette voie.

Remarque : Les pondérations de la norme telles que le coefficient de majoration dynamique (CMD), ou la pondération des états limites, ou les facteurs de modification de charge tenant compte des situations de chargement multiple de voies sur un pont (R_L) ne feront pas varier la valeur du ratio (puisque'ils pondéreront de la même manière la charge et les réactions d'appuis). Ils peuvent être intégrés ou pas dans les simulations. Il est toutefois nécessaire d'appliquer les mêmes pondérations aux différentes charges intervenant dans les simulations.

6.1.2.3. Analyses et résultats des modèles éléments finis

On utilise dans cette partie le concept de tablier tout aluminium décrit au Chapitre 5 de ce rapport. Les analyses ont été faites avec un matériau linéaire ($E = 70 \text{ GPa}$) et on a utilisé un maillage hexaédrique à 20 nœuds.

i. Premier placement transversal

Dans un premier temps, les deux gabarits d'encombrement de camion sont juxtaposés à la ligne centrale. On a alors une symétrie du modèle et des charges selon le plan médian du pont, ce qui permet d'utiliser une condition aux limites de symétrie (représentée dans le logiciel par des lignes bleues) pour le modèle éléments finis de la Figure 6.1 afin d'alléger les calculs.

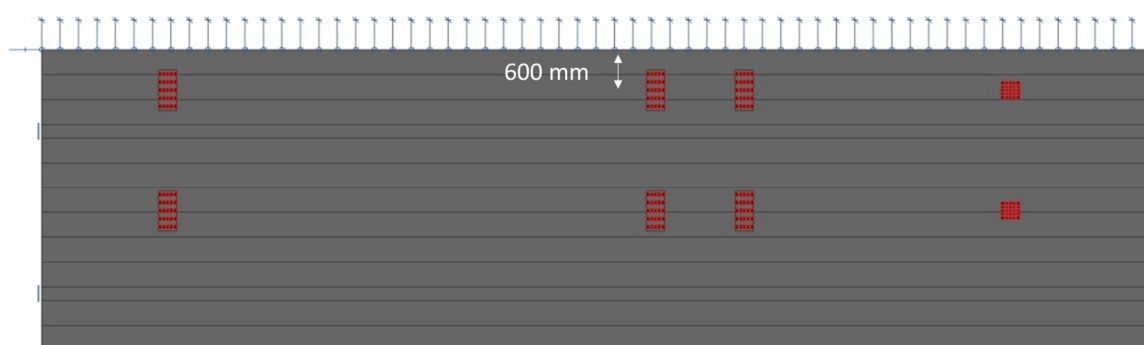


Figure 6.1 Vue du dessus d'une voie de pont chargée transversalement pour que le gabarit du camion CL-625 soit juxtaposé à la ligne de centre avec une symétrie au niveau de la ligne de centre

Les charges du camion ont été ici pondérées par 1,7 (ÉLUL1), 1,25 (CMD) et 0,9 (R_L), mais cela n'a aucune influence sur le résultat final de la fraction de charge de camion : on aurait aussi bien pu prendre une charge unitaire et les mêmes fractions de charge de camion auraient été obtenues. La configuration considérée dans cette analyse correspond toutefois à la situation peu probable où deux camions CL-625 se retrouveraient simultanément sur le pont et à la position considérée sur celui-ci. Le coefficient de simultanéité R_L approprié doit donc être appliqué aux fractions de charge de camion obtenues ci-dessous pour en tenir compte.

Après le calcul éléments finis, on obtient les résultats présentés dans le Tableau 6.4.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Tableau 6.4 Fractions de charge de camion en flexion pour un placement symétrique et juxtaposé à la ligne de centre des camions CL-625

	Poutre extérieure	Poutre intérieure	Somme
Réactions d'appuis (N)	267444	641009	908453
Fraction de charge de camion	0,294	0,706	1

Remarque : la somme des réactions d'appuis correspond (aux erreurs près dues au calcul éléments finis) à :

$$(50 + 125 + 125 + 175) * 0,9 * 1,25 * 1,7 * 1000 = 908437,5 \text{ N}$$

La fraction de charge de camion en flexion de la poutre intérieure lorsque les camions sont juxtaposés à la ligne de centre est de 0,706. Il faut toutefois noter que la norme CAN/CSA S6-2014 prévoit un facteur R_L égal à 0,9 pour deux voies chargées simultanément. Il faut donc multiplier la valeur obtenue par cette pondération, ce qui donne une valeur finale de 0,635 pour ce cas de chargement.

Rappelons que ce cas de positionnement transversal n'est pas forcément celui qui sollicite maximale la poutre intérieure ; on présente en 5.2.3.2 d'autres cas de chargement transversaux.

ii. Autres placements transversaux des charges

Dans cette partie, on décale le camion d'une des voies pour analyser l'impact sur les valeurs des fractions de charge de camion et donc de la répartition des charges dans les poutres.

Dans le premier exemple, présenté dans la sous-section précédente, les camions sont juxtaposés à la ligne de centre. Leurs centres de gravité respectifs sont positionnés chacun à 1500 mm de l'axe central du pont, en tenant compte du gabarit d'encombrement du camion CL-625 selon la norme S6-14 (l'axe de la file de roues la plus près de la ligne de centre est à 600 mm de celle-ci).

Dans le deuxième exemple (Figure 6.2), l'un des camions est décalé de 200 mm vers la rive du pont, par rapport à sa position dans le premier exemple (l'axe de la file de roues la plus près de la ligne de centre est placé à 800 mm de celle-ci), alors que dans le troisième exemple (Figure 6.3) il est décalé de 600 mm par rapport à sa position dans le premier exemple.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

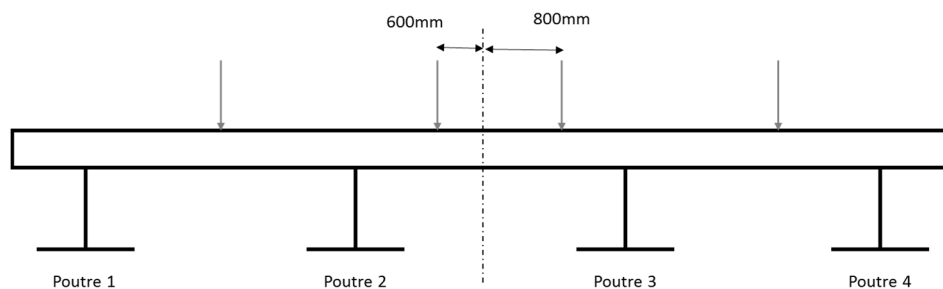


Figure 6.2 Exemple 2 : Placement transversal des camions CL-625

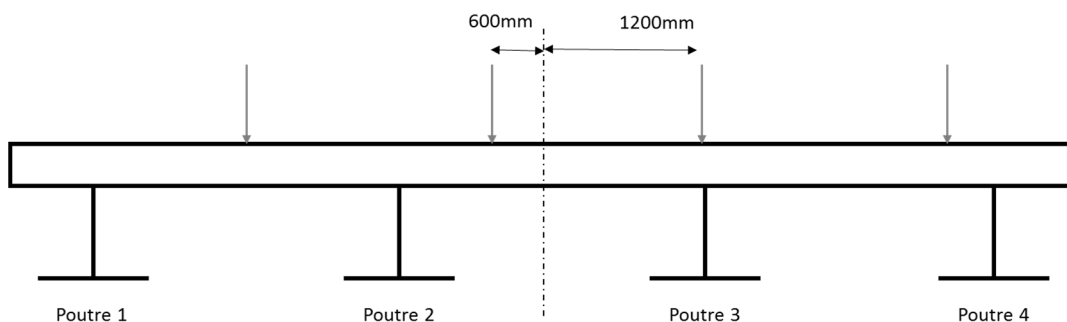


Figure 6.3 Exemple 3 : Placement transversal des camions CL-625

On applique la même méthode que précédemment pour obtenir les valeurs des fractions de charge de camion en flexion pour chaque poutre dans ces deux cas. Naturellement, l'analyse a été faite avec le pont entier car on perd ici la symétrie de chargement. Le Tableau 6.5 et la Figure 6.4 présentent un récapitulatif des résultats obtenus.

Tableau 6.5 Fractions de charge de camion non pondérés en flexion par poutre en fonction du placement latéral des camions CL-625

	Poutre 1	Poutre 2	Poutre 3	Poutre 4	Somme
Force de réaction en N (Charge à 600mm)	267444	641009	641009	267444	1816906
Charge à 600mm	0,294	0,706	0,706	0,294	2,000
Force de réaction en N (Charge à 800mm)	260500	617848	633122	305421	1816891
Charge à 800mm	0,287	0,680	0,697	0,336	2,000
Force de réaction en N (Charge à 1200mm)	250963	572583	602235	391111	1816892
Charge à 1200mm	0,276	0,630	0,663	0,431	2,000

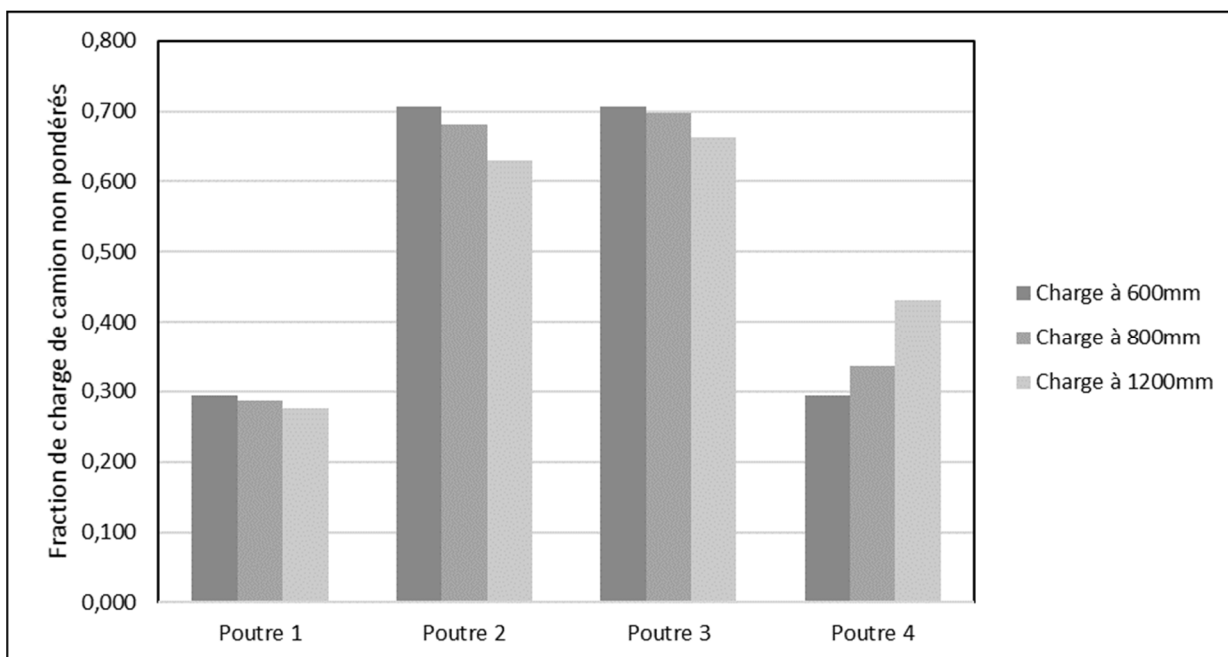


Figure 6.4 Fractions de charge de camion non pondérées en flexion par poutre en fonction du placement latéral des camions CL-625

De ces résultats obtenus, on remarque que plus on décale le camion, plus la poutre 4 reprend une fraction importante de la charge. Le plus intéressant ici est de voir que la fraction de charge de camion maximale est celle du premier exemple, c'est dire lorsque les deux camions sont juxtaposés à ligne de centre. La valeur maximale pour les poutres intérieures est donc de 0,706 non pondérée. En fonction du nombre de voies du pont considéré, il faut multiplier cette valeur par R_L suivant la norme.

6.1.2.4. Conclusion

Pour conclure, une valeur de 0,706 a été obtenue pour la flexion comme maximum pour les différents cas de chargement sans pondération. Une fois pondérée par $R_L=0,9$ car le pont possède deux voies, on obtient une fraction de charge de camion de 0,635.

Cette valeur a été obtenue pour un platelage donné et un espacement de poutre donné. Elle ne peut donc être appliquée que dans cet unique cas. Elle ne prend en compte que les poutres intérieures, et on s'efforcera de faire la même analyse pour les poutres extérieures.

En appliquant la norme, on peut remonter à la valeur de D_T qui donne une fraction de charge de camion de 0,635. On applique alors la formule suivante :

$$F_T = \frac{s}{D_T \gamma_c (1 + \mu \lambda)} \geq 1,05 \frac{n R_L}{N} \quad (6.4)$$

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Avec :

$F_T = 0,635$	$S = 2,42 \text{ m}$	$W_e = 4,02 \text{ m}$
$\gamma_c = 1$	$\mu = 1$	$\lambda = 0$
$n = 2$	$N = 4$	$R_L = 0,9$

On obtient une valeur pour D_T de 3,81, qui est bien supérieure aux 2,55 donné dans la norme. On augmente quasiment de 50% la valeur de D_T . La valeur obtenue l'a été pour un cas précis, avec un espacement de poutres donné et un platelage de géométrie donnée. Le résultat pourrait être différent si le platelage était constitué d'extrusions différentes.

L'objectif de ce paragraphe n'est pas tant de trouver une valeur de D_T pour un tablier de pont donné que de mettre en évidence que les valeurs de la norme semblent indûment prudentes pour les platelages en aluminium, du moins pour les platelages constitués d'extrusions longitudinales soudées côte à côte. En particulier, lorsque l'on augmente la hauteur du platelage, on devrait normalement améliorer la répartition des charges, ce qui n'est pas pris en compte, dans la norme CAN/CSA S6-2014, pour les platelages en aluminium. Il est à noter ici que le chapitre 17 de la norme ne fait référence qu'aux platelages constitués de plaques raidies, ce qui explique peut-être les faibles valeurs de D_T spécifiées pour calculer les fractions de charge de camion pour les platelages en aluminium dans le tableau 5.10 de la norme CAN/CSA S6-2014.

Pour faire changer les valeurs de D_T données dans la norme, il faudra évidemment une étude plus poussée des fractions de charge de camion en fonction de l'espacement des poutres et des valeurs de la hauteur ou de l'inertie du platelage. Cette étude sera indispensable pour que l'aluminium soit concurrentiel pour être utilisé dans les platelages.

Remarques :

La valeur de D_T de 3,81 pour le platelage en aluminium analysé précédemment est supérieure à la valeur de D_T pour un pont avec dalle de béton sur poutre en acier de la norme. En appliquant l'équation du tableau 5.3 de la norme CAN/CSA S6-2014 (Tableau 5.2 de ce rapport) pour les poutres intérieures à l'ÉLUL pour un pont à deux voies, on obtient une valeur de D_T de 3,41 ($L_e=15\text{m}$).

Cela peut sembler étrange qu'un platelage d'aluminium répartisse mieux les charges qu'une dalle de béton. Il faut alors préciser que le calcul de la fraction de charge de camion avec une dalle de béton ne prend pas en compte l'épaisseur de ladite dalle. Si on compare la rigidité flexionnelle d'une dalle de béton de 150 mm de hauteur (minimum requis pour appliquer la méthode simplifiée selon la norme CAN/CSA S6-2014 5.6.2 i (vi)) avec la rigidité flexionnelle du platelage en aluminium dont la section est montrée en Figure 5.1, on obtient :

$$E_{\text{béton}} = 30 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{aluminium}} = 70 \text{ GPa}$$

$$I_{\text{béton}} = 4,22 * 10^9 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{aluminium}} = 2,10 * 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\frac{E_{\text{aluminium}} I_{\text{aluminium}}}{E_{\text{béton}} I_{\text{béton}}} = 1,16$$

La rigidité flexionnelle du platelage en aluminium est 16 % plus importante que celle de la dalle de béton.

On peut aussi remarquer que la valeur du D_T pour la dalle de béton a été obtenue à partir d'équations de la norme qui ont été calées en fonction d'un grand nombre de cas et qui mènent à une valeur de D_T prudente pour tous les cas : cette valeur de D_T est donc sous-estimée par rapport à la valeur réelle que l'on trouverait en analysant la dalle pour le cas précis.

6.2. Largeur effective pour les platelages treillis

6.2.1. Définition du concept d'aire effective pour les platelages treillis

Pour calculer le moment résistant d'une section poutre-platelage travaillant de manière composite dans la norme CAN/CSA S6-2014, il faut connaître la largeur effective du platelage. Cette largeur diminue *a priori* la largeur tributaire pour prendre en compte la répartition non uniforme des contraintes dans le platelage et due au décalage en cisaillement.

La méthode de calcul proposée par la norme CAN/CSA S6-2014 a été développée pour les dalles en béton sur poutres dans la section 5.8.1 de la norme. Il est alors proposé un système d'équations pour trouver le rapport largeur effective sur largeur tributaire pour les dalles de béton :

$$\frac{b_{eff}}{b} = 1 - \left(1 - \frac{L}{15b}\right)^3 \text{ pour } \frac{L}{b} \leq 15 \quad (6.5)$$

$$\frac{b_{eff}}{b} = 1 \text{ pour } \frac{L}{b} > 15 \quad (6.6)$$

Les commentaires de la norme indiquent que ces équations proviennent des travaux de Cheung et Chan (Cheung et Chan, 1978). La méthode a été reprise plus récemment par Chen (Chen, 2007) pour trouver un critère de largeur effective pour les ponts avec action composite dalle sur poutres (Figure 6.5).

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

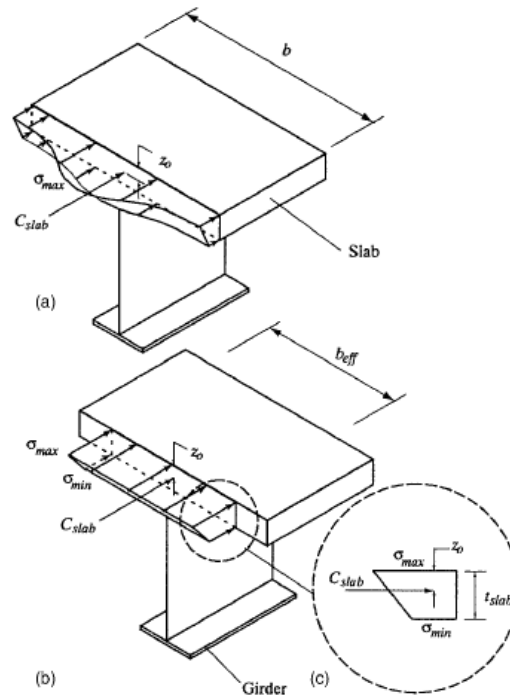


Figure 6.5 Illustration de la largeur effective (Chiewanichakorn, 2004) (Chen, 2007)

Pour définir la largeur effective pour le béton on utilise la formule :

$$b_{eff} = \frac{C_{slab}}{0,5 * t * (\sigma_{max} + \sigma_{min})} \quad (6.7)$$

où C_{slab} : représente la force axiale dans le platelage. Toutes les valeurs doivent être prises à la section où le moment fléchissant est maximal.

Cette équation revient à approcher les contraintes dans les fibres supérieures et inférieures par leur maximum respectif. La contrainte moyenne est alors supérieure dans le platelage et il faut multiplier par une aire plus faible pour obtenir la force de compression dans la dalle C_{slab} . La hauteur de la dalle de béton étant constante, cela revient à diminuer la largeur tributaire en largeur effective.

Pour les platelages d'aluminium, le platelage est en treillis. On ne peut donc pas effectuer facilement la dernière étape consistant à transformer l'aire effective en largeur effective. On travaillera donc ici directement avec l'aire effective. Dans un second temps, pour retrouver une largeur effective, il faudra connaître la fonction reliant la largeur avec l'aire, qui n'est pas linéaire. En connaissant l'aire effective on pourra tout de même trouver une largeur effective.

Dans notre cas on utilise donc une équation du type :

$$A_{eff} = \frac{C_{slab}}{0,5 * (\sigma_{max} + \sigma_{min})} \quad (6.8)$$

Enfin, pour faciliter la compréhension et la représentation des valeurs, on travaillera avec le ratio :

$$\frac{A_{eff}}{A_{totale}} = \frac{C_{Slab}}{0,5 * (\sigma_{max} + \sigma_{min}) * A_{totale}} \quad (6.9)$$

Ce ratio définit le pourcentage de la surface de la section transversale de platelage à prendre en compte pour la résistance de la section. On essaiera de le maximiser puisque plus la section de platelage travaillant en flexion est grande, plus le moment résistant de la section sera important.

6.2.2. Description de la méthode pour l'évaluation de l'aire effective

Une fois que l'équation est mise en place, il faut en évaluer ses différents termes. On travaille ici sur une section de platelage de largeur tributaire b égale à la moitié de l'espacement entre les poutres S (Figure 6.6).

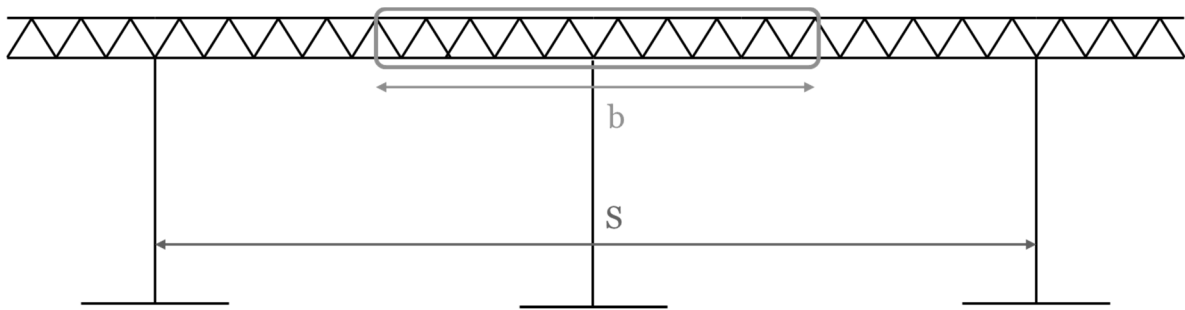


Figure 6.6 Définition de la largeur tributaire b

On simule donc à l'ÉLUL1 le pont et on trouve dans la section où le moment maximal, les valeurs des contraintes maximales dans les ailes supérieure et inférieure du platelage. On connaît aisément l'aire totale du platelage.

Il faut néanmoins avoir accès à la force axiale notée C_{slab} . Pour cela il faut intégrer les contraintes sur l'ensemble de la section de platelage. Lorsque l'on travaille avec les éléments finis, il faut faire la somme sur tous les éléments :

$$C_{Slab} = \sum_e \sigma_e * A_e \quad (6.10)$$

avec : C_{Slab} : la force de compression dans le platelage ;

σ_e : la contrainte axiale de l'élément e ;

A_e : l'aire transversale de l'élément e .

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Deux problèmes apparaissent dans notre cas :

- Une partie du platelage est en traction sous les roues. Il ne faut pas la faire intervenir dans le calcul de la force. Or, lorsque l'on sélectionne les différentes parties et que le logiciel somme les contraintes, ces éléments en traction diminuent la somme des contraintes ;
- Le logiciel ne permet pas de faire la somme d'un produit de valeur.

Pour résoudre ces problèmes, on a utilisé un maillage dont les aires des différents éléments varient peu. Si on suppose que l'aire des éléments est constante, on a alors :

$$C_{slab} = A_m * \sum_e \sigma_e \quad (6.11)$$

où A_m est l'aire moyenne transversale des éléments dans le plan de la section.

On exporte ensuite la valeur des contraintes pour faire la somme uniquement sur les contraintes négatives, c'est-à-dire sur les éléments en compression.

6.2.3. Résultats

On applique dans cette section la méthode décrite à la sous-section 6.2.2 au concept de pont avec quatre poutres, présenté dans le Chapitre 5. On présente à la Figure 6.7 le maillage que l'on a choisi.

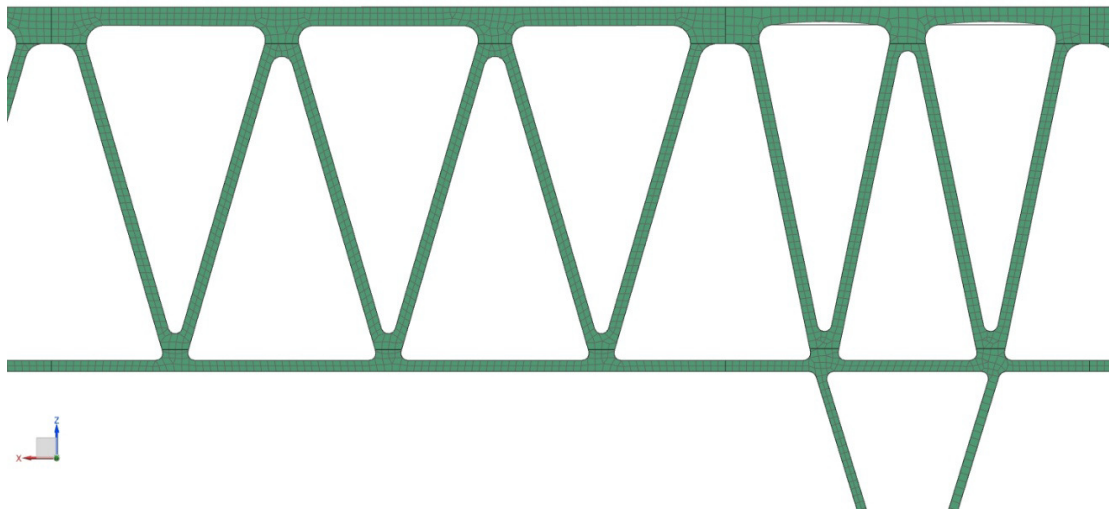


Figure 6.7 Maillage régulier du nouveau platelage en aluminium de 200 mm de hauteur

On considère que l'aire des éléments est constante et que l'aire moyenne d'un élément est de $12,7 \text{ mm}^2$ (aire totale divisée par le nombre d'éléments).

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

On applique au tablier les charges de deux camions CL-625 pondérées par 1,25 (CMD), par 1,7 (ÉLUL1) et par 0,9 (R_L) (Figure 6.8) conformément aux exigences de la norme. Les deux camions sont côte à côte de la ligne de centre.

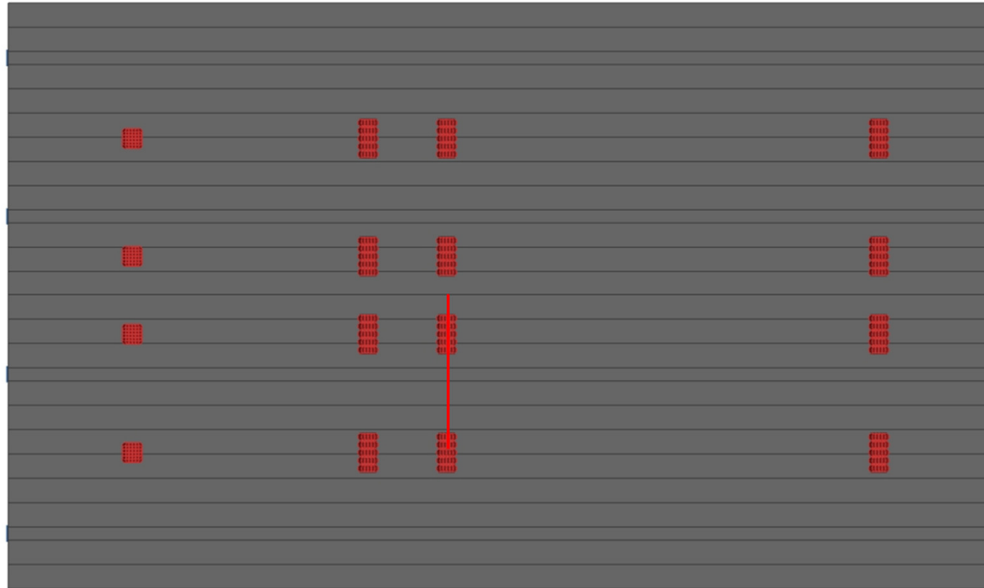


Figure 6.8 Application des charges et section considérée pour l'aire effective. Vue du dessus

Sur la Figure 6.9, les zones en rouge sont en traction. Elles sont présentes sous les roues et ne permettent pas de faire simplement la somme de toutes les contraintes sur les éléments. En effet, les éléments en traction annulent de manière algébrique une partie des contraintes en compression.

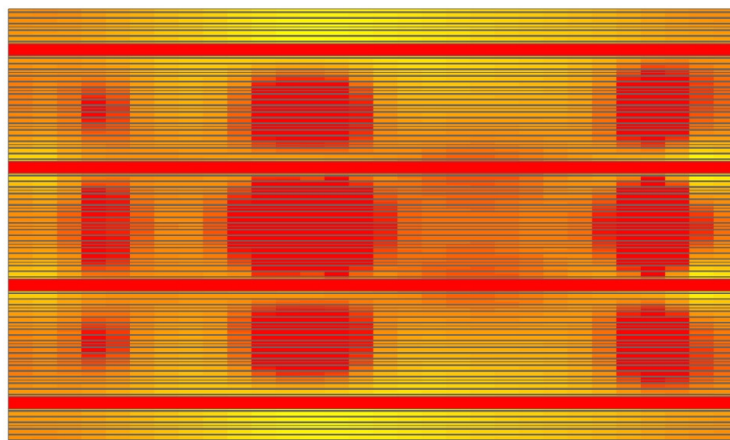


Figure 6.9 Vue du dessous du tablier : présence de traction dans le platelage sous les charges de roues

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Sur la Figure 6.10, on a tracé les contraintes dans l'axe du pont (notées YY) en fonction de la distance à la poutre. Pour faciliter la lecture et la compréhension, les contraintes $-YY$ sont indiquées : les contraintes de compression, présentes dans la partie supérieure du tablier, étant notées par convention négatives dans le logiciel. On reconnaît la forme du platelage, schématiquement représentée sur la Figure 6.6. Cela est possible puisque l'analyse et la loi de comportement du matériau sont linéaires.

Dans un premier temps, on observe que les contraintes de compression augmentent lorsque l'on se rapproche de la poutre conformément à la théorie développée à la section 6.2.1. On cherche tout d'abord les contraintes maximales dans les semelles supérieures et inférieures. En rouge, on a représenté le cas prenant en compte les concentrations de contraintes indiquées sur la Figure 6.11. Il est difficile de dire si ces concentrations sont réellement présentes ou si elles sont dues au maillage. En vert, on a tracé un cas plus « optimiste » qui suppose que ces concentrations sont diluées dans la réalité à la matière adjacente.

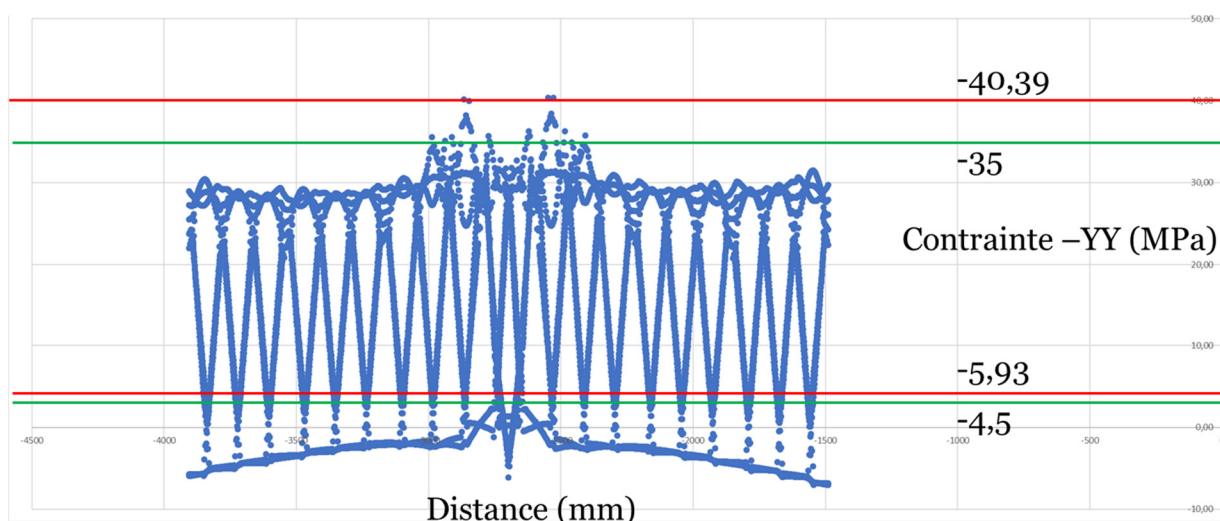


Figure 6.10 Contrainte -YY sur éléments dans le platelage à la section où le moment fléchissant est maximal

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

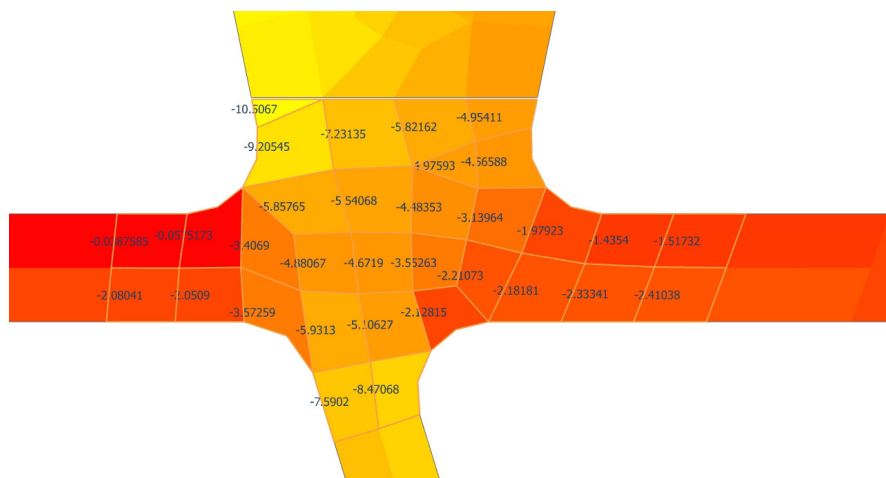


Figure 6.11 Contrainte -YY dans l'aile inférieure du platelage au droit de la poutre

On présente dans le Tableau 6.6 les résultats pour le cas avec concentration de contraintes (cas rouge sur la Figure 6.10) et dans le Tableau 6.7 le cas sans concentration de contraintes (cas vert sur la Figure 6.10). On a aussi indiqué la valeur du ratio donné dans la norme pour les dalles de béton.

Tableau 6.6 Résultats avec concentration de contrainte du ratio A_{eff}/A_{totale}

Valeur géométrique		
Aire du platelage	91113	mm ²
Valeur géométrique avec la modélisation éléments finis		
Nombre d'éléments total	7297	
Nombre d'éléments en compression	6159	
Nombre d'éléments en traction	1138	
Aire moyenne d'un élément	12,7	mm ²
Aire de la travée en compression	78267	mm ²
Valeur des contraintes avec la modélisation éléments finis		
Contrainte maximale dans l'aile supérieure	-40,39	MPa
Contrainte maximale dans l'aile inférieure	-5,93	MPa
Somme des contraintes en compression	-111294	MPa
Calcul de la force de compression dans le platelage		
C_{slab}	-1414302	N
Ratio Aire effective/Aire totale		
Platelage en aluminium	0,67	
Dalle de béton suivant la norme CAN/CSA S6-2014	0,80	

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Dans le cas avec concentration de contraintes (rouge), l'aire effective représente environ deux tiers (67%) de l'aire totale du platelage. Ceci est inférieur au 80% calculé avec la norme CAN/CSA S6-2014 pour une dalle de béton sur poutres. Si l'on accepte cette valeur, pour le calcul du moment résistant de la travée suivant la méthode simplifiée de la norme, une partie importante du platelage ne doit pas être considérée et on perd donc une partie de l'intérêt de l'action composite.

Tableau 6.7 Résultats sans concentration de contrainte du ratio A_{eff}/A_{totale}

Valeur géométrique		
Aire du platelage	91113	mm ²
Valeur géométrique avec la modélisation éléments finis		
Nombre d'éléments total	7297	
Nombre d'éléments en compression	6159	
Nombre d'éléments en traction	1138	
Aire moyenne d'un élément	12,7	mm ²
Aire de la travée en compression	78267	mm ²
Valeur des contraintes avec la modélisation éléments finis		
Contrainte maximale dans l'aile supérieure	-35	MPa
Contrainte maximale dans l'aile inférieure	-4,8	MPa
Somme des contraintes en compression	-111294	MPa
Calcul de la force de compression dans le platelage		
C_{slab}	-1414302	N
Ratio Aire effective/Aire totale		
Platelage en aluminium	0,78	
Dalle de béton suivant la norme CAN/CSA S6-2014	0,80	

Dans le cas sans les concentrations de contraintes, on obtient un ratio de 78% qui est assez proche du ratio de 80% obtenu avec la norme CAN/CSA S6-2014 pour une dalle de béton sur poutres. Ce résultat semble plus réaliste. En effet, comme expliqué en remarque de la section 6.1.2.4, la norme pour les dalles de béton doit permettre d'être sécuritaire pour une dalle de 150 mm d'épaisseur qui a une rigidité flexionnelle transversale inférieure à celle des ailes du platelage en aluminium de 200 mm de hauteur.

On rappelle aussi que le cas simulé ici est plus sécuritaire que celui donné par la norme : un des camions chevauche la voie mitoyenne à la sienne.

6.2.4. Conclusion

L'analyse et les résultats obtenus pour la largeur effective des platelages en aluminium dont les extrusions sont placées parallèlement aux poutres sont encourageants. En effet, il semble montrer que le platelage d'aluminium est assez proche du béton en termes de ratio A_{eff}/A_{totale} . Une étude plus approfondie, mettant en place un outil d'intégration des contraintes sur la section de platelage, est recommandée, avec pour objectif de prouver que l'équation pour les dalles en béton est applicable pour les platelages en aluminium selon certaines conditions à déterminer. Cet outil pourra, le cas échéant, permettre de valider la solution pour déterminer les fractions de charge de camion de la section 6.1.2.

6.3. Fatigue dans les tabliers de pont tout aluminium

6.3.1. Généralités

C'est aux environs de 1970 que les scientifiques se sont mis à s'intéresser et à comprendre le phénomène de la fatigue (Leprince, 2015). Depuis cette époque, on s'est aperçu que la fatigue est la cause de 80% des accidents mécaniques (Maitournam, 2017) et, par conséquent, la fatigue est souvent devenue au fil du temps, le critère le plus contraignant pour les dimensionnements de structures.

Les tabliers de pont sont soumis aux charges cycliques dues au passage des camions et donc à la fatigue. Le dimensionnement du platelage AlumaBridge GEN I (Beaulieu & Internoscia, 2015) nous montre par exemple que c'est la fatigue qui gouverne la conception. D'un autre côté, le professeur Maljaars de l'Université d'Eindhoven se consacre uniquement à ce phénomène pour les platelages en aluminium avec pour objectif d'obtenir des courbes S-N pour des détails de soudure qui interviennent régulièrement dans ces structures (Maljaars, 2006).

Comme pour les ÉLUT et les ÉLUL, l'ÉLF souhaite comparer une valeur de résistance à une valeur de sollicitation. Toutefois, contrairement à F_y (pour l'ÉLUT) et à F_u (pour l'ÉLUL), il n'existe pas de valeur précise de résistance pour chaque alliage et chaque nuance d'aluminium. En effet, en fonction du type de sollicitation (traction, flexion, torsion ou cisaillement) et du rapport de charge noté R (rapport entre la contrainte minimale et la contrainte maximale au cours d'un cycle de chargement), les valeurs de résistance pour le matériau de base ou pour des assemblages (en particulier soudés) sont extrêmement variables (Kaufman, 2006). Pour atteindre une limite de fatigue sécuritaire, il faut donc réaliser de nombreux essais et connaître avec précision les détails de conception à dimensionner.

Pour prendre en compte la fatigue dans le dimensionnement des ponts routiers, la norme CAN/CSA S6-2014 s'inspire de la norme AASHTO et des données de l'AA (the aluminum association) d'après le commentaire C17.20.2.4 et propose cinq courbes S-N en fonction de la catégorie de détails de A à E (Figure 6.12) largement inspirés du tableau 10.7 de la norme CAN/CSA S6-2014 pour les détails dans les ouvrages en

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

acier. Ces courbes ont toujours le même aspect : une droite décroissante (dans un système d'axe bi-logarithmique) jusqu'à $N = 5 \times 10^6$ cycles (chaque cycle correspondant au passage d'un groupe d'essieu en tandem du camion CL-625) puis une asymptote que l'on appelle communément limite d'endurance ou limite de fatigue. Si l'on prend cette valeur asymptotique comme limite de résistance, quel que soit le nombre de cycles, la fatigue ne causera pas la rupture de l'ouvrage. C'est donc pour une durée de vie infinie que l'on souhaite dimensionner le tablier de pont tout aluminium comme AlumaBridge le présente pour le platelage GEN I dans le rapport de G. Patton (voir l'annexe 4) (Beaulieu & Internoscia, 2015).

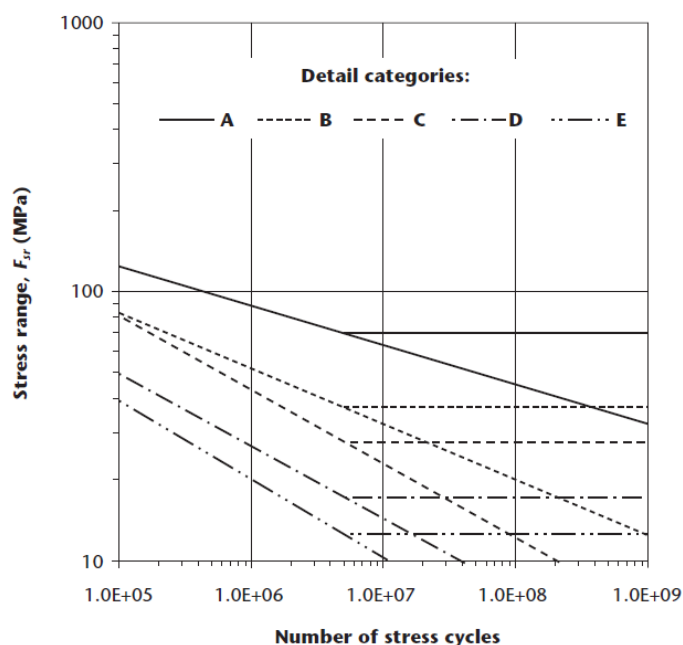


Figure 6.12 Courbes SN des commentaires de la norme CAN/CSA S6-2014 C17.28 pour les différentes catégories de détails pour les ouvrages en aluminium

On peut remarquer ici que les normes américaines et canadiennes tiennent pour acquise l'existence d'une limite d'endurance pour l'aluminium comme il en existe une pour l'acier. Cette affirmation est remise en cause pour les très grands nombres de cycles par une partie de la communauté scientifique (Pastor, 2008), (Bahuaud et al., 1969), (ETS, 2014). On appliquera néanmoins la norme CAN/CSA S6-2014 dans le présent rapport en remarquant aussi qu'elle ne fait pas de distinction de résistance entre les différents alliages, ce qui semble contraire aux données des essais présentés dans la littérature (Kaufman, 2006).

6.3.2. Analyse de la conception en fatigue pour le platelage AlumaBridge GEN I

Cette section s'appuie sur l'ANNEXE 4 Fatigue pour le platelage AlumaBridge GEN I (Beaulieu & Internoscia, 2015).

AlumaBridge considère deux détails et applique la norme américaine AASHTO pour le dimensionnement de ses platelages en aluminium. Le premier détail de catégorie A est le métal de base et le second est la partie soudée par friction-malaxage (FSW) qui s'apparente à un détail de catégorie C. En appliquant la norme AASHTO, la contrainte maximale admissible pour une durée de vie infinie est de 9,5 ksi (65 MPa-Cat A) et de 4,0 ksi (27,6 MPa-Cat C). Ces valeurs doivent être divisées par deux pour prendre en compte la multiplicité des cas de chargements et pondérées par un coefficient γ dont la valeur est de 0,975 pour la catégorie C et de 0,916 pour la Catégorie A. Ces coefficients de l'AASHTO diminuent encore la contrainte maximale admissible.

En conclusion, les contraintes admissibles calculées par AlumaBridge selon la norme américaine sont de 4,35 ksi (30 MPa) pour le métal de base et de 1,95 ksi (13,4 MPa) pour les zones affectées thermiquement par le soudage FSW. Le dimensionnement considère (au vu des essais) que ce type de soudage obtient de meilleurs résultats (pour la résistance en fatigue, mais à l'ÉLUT et à l'ÉLUL) que les assemblages soudés au MIG et prend donc la norme pour les soudures MIG comme référence sécuritaire. Sur la Figure 6.13, on remarque que la géométrie de l'extrusion a été faite pour atteindre les valeurs limites dans les différentes zones à prendre en considération. Il faut noter que la ZAT est de 0,5' (13 mm) de chaque côté de la soudure.

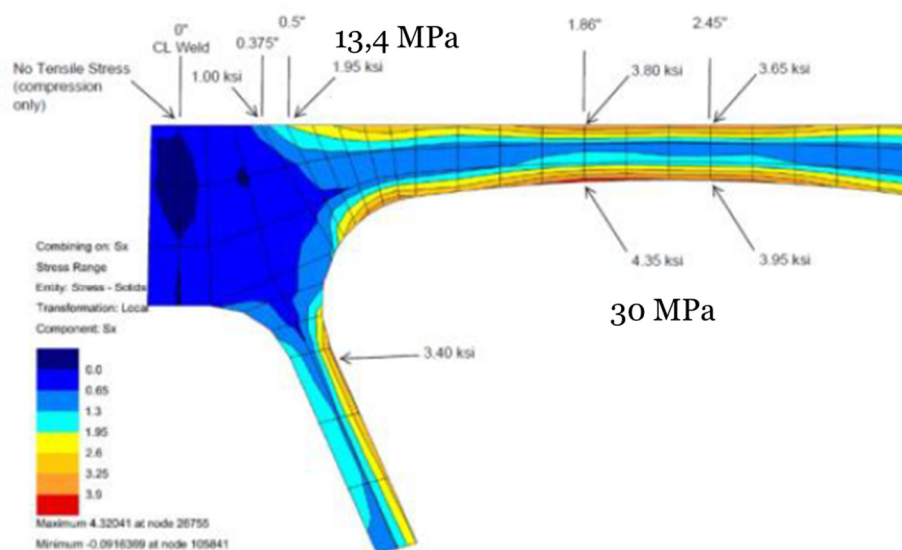


Figure 6.13 Contrainte de von Mises dans l'extrusion AlumaBridge GEN I sous charge de fatigue (Beaulieu & Internoscia, 2015)

Dans l'ANNEXE 4 Fatigue pour le platelage AlumaBridge GEN I, on remarque que la simulation faite pour obtenir ces résultats modélise deux extrusions encastrees sous leur

semelle inférieure sur lesquelles on a appliqué une charge de roue. La valeur de la charge n'est pas spécifiquement indiquée. On peut seulement faire remarquer que dans la norme AASHTO, les roues ont une surface de 10" × 20" (254 mm × 508 mm) contre 250 mm × 600 mm dans la norme CAN/CSA S6-2014. La surface des roues dans l'AASHTO est plus faible que pour la norme canadienne : pour une force égale la pression due aux charges de roue sera plus importante si on considère la norme américaine.

6.3.3. Analyse en fatigue du nouveau platelage encastré

On a voulu appliquer le même test qu'AlumaBridge avec les éléments finis pour le platelage présenté à la sous-section 4.3.4.

Dans un premier temps, même si la norme CAN/CSA S6-2014 est inspirée de l'AASHTO, les valeurs qu'elles proposent sont quelque peu différentes (CAN/CSA S6-2014 17.20). Pour les détails de catégorie A et C, les limites d'endurance sont respectivement 70 et 27,7 MPa (contre 65 et 27,6 MPa pour l'AASHTO). Comme dans l'AASHTO, ces valeurs doivent être divisées par 2 pour le dimensionnement. Ces valeurs de résistance doivent être comparées et supérieures à la sollicitation en suivant l'équation suivante (CAN/CSA S6-2014 17.20.2.2.2) :

$$(\lambda + 0,1)C_L f_{sr} \leq F_{sr} \quad (6.12)$$

Avec λ : coefficient d'équivalence de dommages indiqué au tableau 17.5 de la norme CAN/CSA S6-2014 ;

$C_L = 1$: sauf lorsque $W > 625$ kN et que le volume de camions lourds justifiant l'utilisation d'une charge plus importante que pour les camions CL-625 n'est pas supérieur à la valeur la plus grande de 200 par jour et de 5 % de l'ADTT (débit journalier moyen de camions par voie pour la fatigue) sur la route, $C_L = 0,20 + 500/W$;

F_{sr} : résistance à l'écart des contraintes de fatigue, MPa ;

f_{sr} : écart calculé des contraintes de fatigue au détail, dû au passage d'un groupe d'essieux en tandem d'un poids de 125 kN, espacés de 1,2 m, l'espacement transversal des roues étant égal à 1,8 m, MPa.

Les valeurs de λ sont respectivement de 0,65 et de 0,55 pour les détails de catégorie A et C (CAN/CSA S6-2014, 2014). Ces valeurs tendent à diminuer la sollicitation ou, d'un autre point de vue, à augmenter la contrainte maximale admissible pour prendre en compte la sollicitation réelle sur les routes canadiennes (Coughlin & Walbridge, 2012). On augmente la contrainte admissible ici.

Si la norme recommande d'utiliser le tandem d'essieu de 125 kN, on a pour notre part utilisé une seule roue de l'essieu de 175 kN appliquée à deux extrusions dont la semelle inférieure est encastrée. D'après les résultats obtenus par AlumaBridge, il semble qu'ils aient appliqué ce même chargement et ces mêmes conditions aux limites. On a aussi

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

multiplié 87,5 kN (175/2 pour une seule roue) par 1,25 pour prendre en compte les effets dynamiques et on a appliqué la gravité qui a toutefois très peu d'importance ici. Le résultat global est donné à la Figure 6.14 qui représente les contraintes de von Mises.

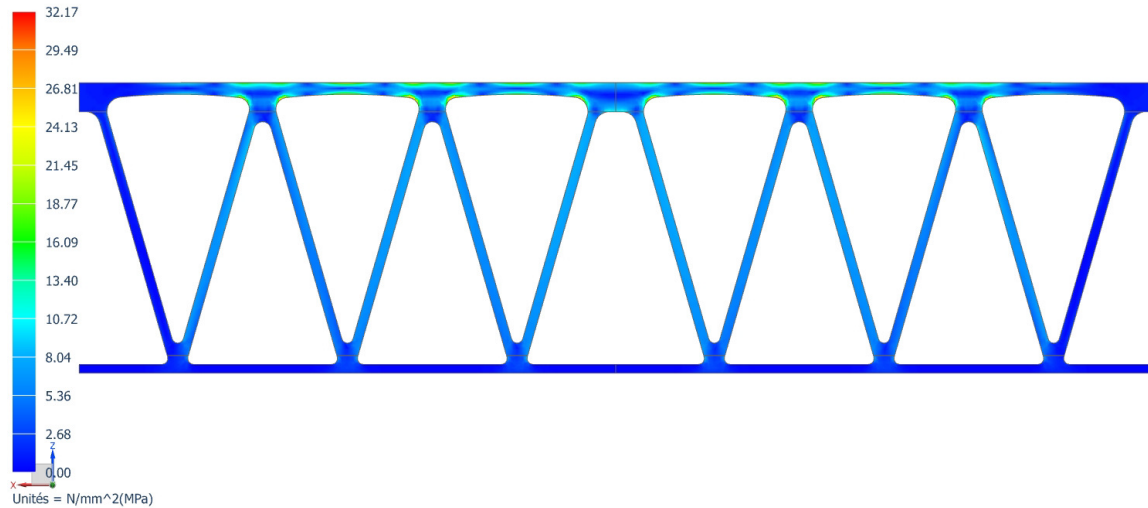


Figure 6.14 Contrainte de von Mises pour le dimensionnement en fatigue du nouveau platelage

Plus précisément, on montre à la Figure 6.15 les zones les plus sollicitées pour les détails de catégorie A. On remarque que la contrainte maximale dans la semelle supérieure est de 21,72 MPa ce qui est largement inférieure au 46,6⁶ MPa admissible. Pour optimiser cette partie, on pourra donc affiner l'épaisseur de la semelle supérieure de l'extrusion. Les contraintes dans les congés atteignent des valeurs comprises entre 30 et 35 MPa ; on pourra aussi optimiser la géométrie.

$${}^6 \frac{F_{Sr}(A)}{\lambda_A + 0,1} = \frac{35}{0,75} = 46,6 \text{ MPa}$$

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

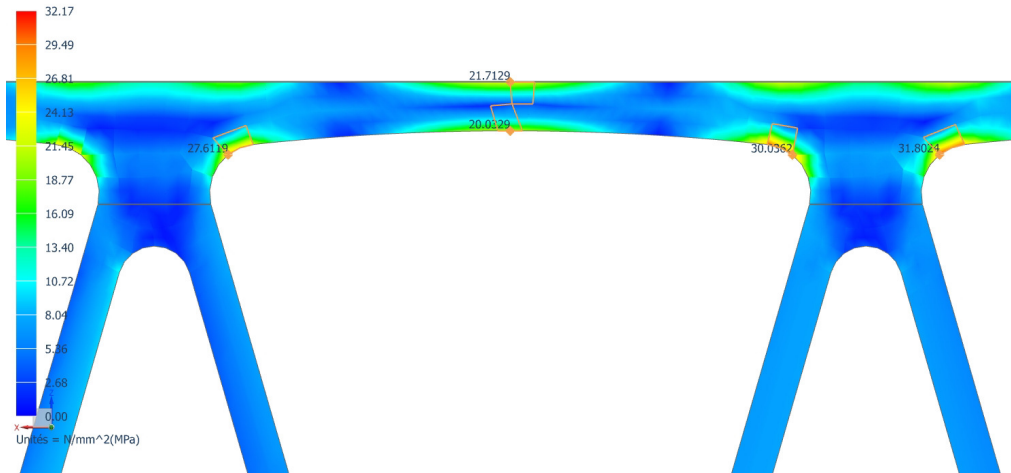


Figure 6.15 Contrainte de von Mises pour le dimensionnement en fatigue du nouveau platelage, détail A

La Figure 6.16 et la Figure 6.17 représentent les zones soudées (35 mm de ZAT (Beaulieu, 2016)) et donc les détails de catégorie C. On remarque tout d'abord que les contraintes de von Mises dans cette zone dépassent légèrement la résistance de 21,37 MPa donnée pour cette catégorie de détail.

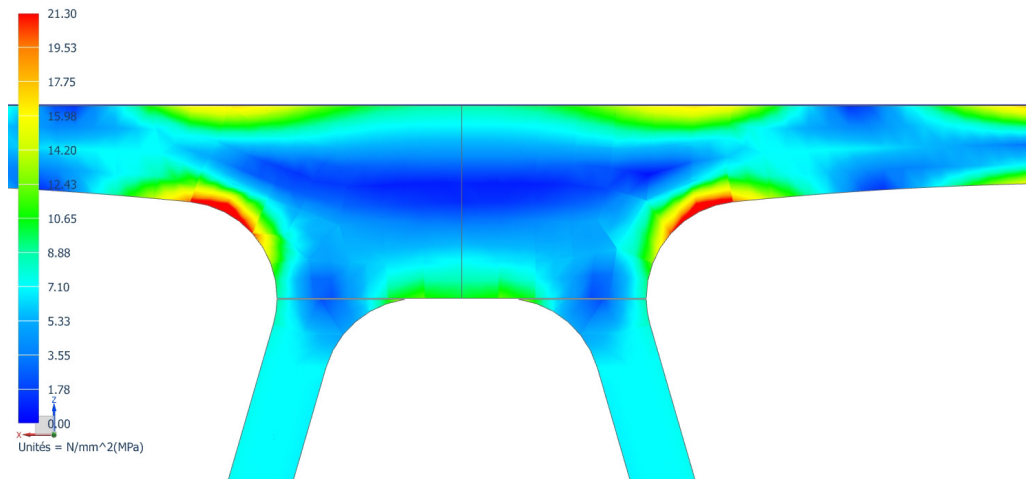


Figure 6.16 Contrainte de von Mises pour le dimensionnement en fatigue du nouveau platelage, détail C

En particulier, on obtient des contraintes en traction dans la semelle supérieure atteignant des valeurs de 24 MPa. Cette partie de l'extrusion doit être retravaillée pour diminuer les contraintes dans cette zone.

$$7 \frac{F_{Sr}(C)}{\lambda_{C+0,1}} = \frac{13,85}{0,65} = 21,3 \text{ MPa}$$

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

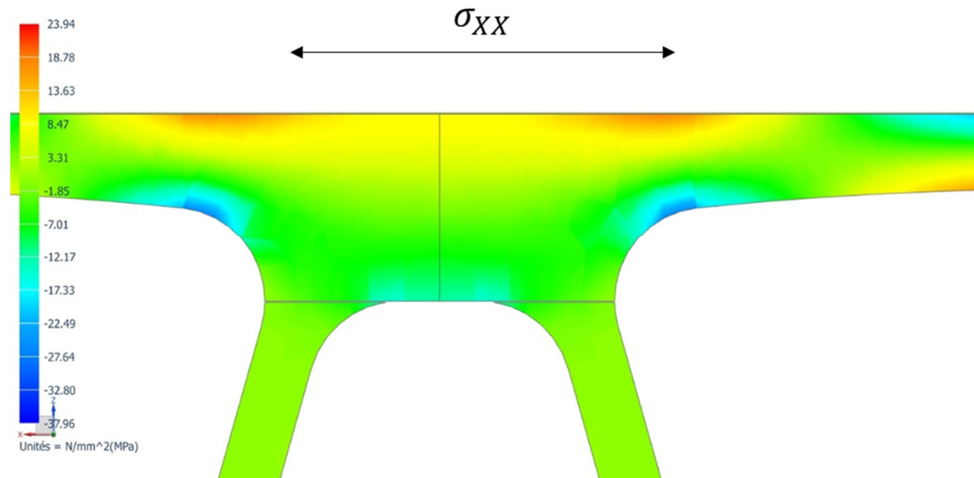


Figure 6.17 Contrainte σ_{xx} pour le dimensionnement en fatigue du nouveau platelage, détail A

6.3.4. Conclusion

Les analyses en fatigue s'inspirant de celles proposées par AlumaBridge montrent qu'un travail doit être effectué dans la partie supérieure de l'extrusion pour diminuer les contraintes dans la partie soudée. On pourra aussi diminuer légèrement la semelle supérieure de l'extrusion qui, au vu de nos résultats, semble surdimensionnée.

On peut néanmoins se demander si les résultats obtenus pour deux extrusions encastrées et chargées avec une seule roue, sont les plus contraignants. En effet, la semelle supérieure du platelage peut subir des contraintes de traction dues à la flexion transversale entre deux poutres. Les contraintes locales dues à la charge de roue s'additionnent alors avec les contraintes dues à la flexion transversale entre poutres. Cela semble une explication plausible à la limitation imposée par AlumaBridge d'un espacement maximal de 6 pieds (1829 mm) entre les poutres : cela diminue la flexion entre poutres et donc les contraintes de traction pouvant en résulter. Enfin, il est à noter que les platelages proposés par AlumaBridge ont été conçus pour être placés perpendiculairement aux poutres (platelage transversal), les contraintes de traction dues à la flexion entre poutres sont alors orthogonales aux contraintes de traction locales dues à la roue. Le cas d'un platelage placé parallèlement aux poutres (platelage longitudinal) est *a priori* plus critique.

Dans la section 8.2, on fait les analyses en fatigue de la conception avec un tandem d'essieu conformément aux exigences de la norme CAN/CSA S6-2014 et non plus seulement d'une roue des extrusions encastrées.

CHAPITRE 7 ANALYSE ÉCONOMIQUE

7.1. Analyse des coûts pour les platelages d'aluminium

7.1.1. Généralités

Les analyses de coûts pour les tabliers tout aluminium sont peu nombreuses dans la littérature puisque ce type de tablier n'a jamais été développé. On trouve en revanche plus d'analyses pour les coûts de production de tablier avec platelage en aluminium ou de platelage en aluminium seul.

7.1.2. Analyse des coûts par Roy (1999)

Dans un premier temps, on présente quelques graphiques et analyses développés par Roy dans son mémoire de maîtrise sur l'évaluation du potentiel d'utilisation de l'aluminium dans les ouvrages d'art fait à l'Université Laval (Roy, 1999). On se restreint ici à la présentation des analyses pour les tabliers de pont de 15 mètres de portée.

Dans son mémoire, le système porteur est en aluminium et le platelage varie : il est soit en aluminium, soit en béton armé.

La Figure 7.1 représente le coût (de production *a priori*) d'un pont à âme pleine de 15 mètres en fonction du type de platelage (appelé tablier sur la figure). On rappelle que le tablier de Svensson est la version suédoise du platelage en aluminium, et le tablier Alumadeck (Reynolds) est une version désormais obsolète d'un platelage étatsunien en aluminium. Ces deux tabliers ne développent pas l'action composite et nécessitent des poutres de dimensions plus importantes que les tabliers avec des dalles de béton composite.

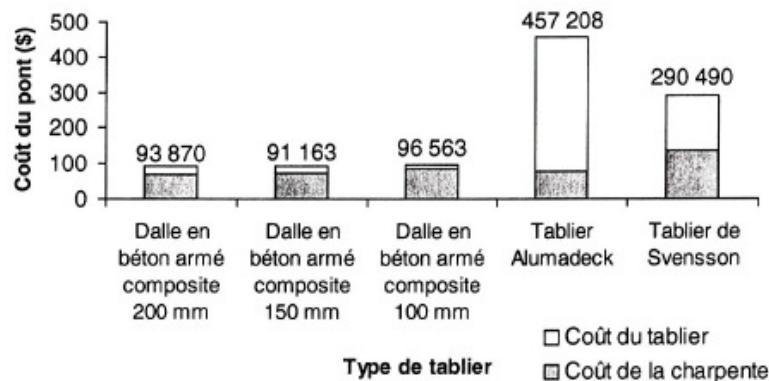


Figure 7.1 Coût d'un tablier avec poutres à âmes pleines de 15 mètres en fonction du type de platelage (Roy, 1999)

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

On remarque que les coûts des tabliers avec des platelages en aluminium sont entre 3 et 4,5 fois plus élevés que ceux avec des dalles de béton.

Le rapport compare ensuite le coût de production du pont en fonction du rapport L/h qui représente la portée sur la hauteur du tablier. Les résultats sont donnés à la Figure 7.2.

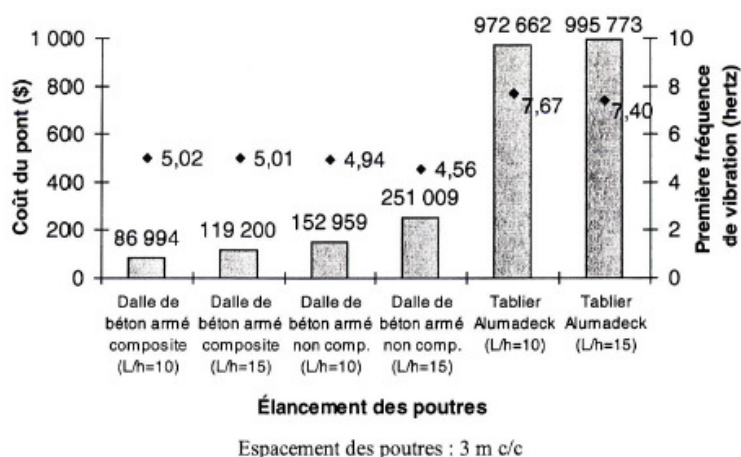


Figure 7.2 Coût d'un pont de type Pratt de 15 mètres en fonction du rapport d'élancement des poutres (Roy, 1999)

On remarque d'abord que les valeurs des ratios L/h sont soit de 10, soit de 15. Ces valeurs sont inférieures à celles recommandées au tableau 1.8-2 du Manuel de construction des structures (MTMD, 2016) de 25 pour les ponts acier-bois et de 20 pour les ponts acier-béton. En effet, le module d'Young de l'aluminium est trois fois plus faible que celui de l'acier et implique donc une augmentation de la profondeur des poutres pour obtenir une même rigidité flexionnelle. Dans la conception présentée dans le rapport, soumise au même problème, on a choisi un ratio de 15. La Figure 7.2 montre que plus le ratio L/h est faible, plus le coût de production du tablier sera faible. En effet, les ponts avec des poutres profondes se comportent de façon plus efficace structuralement parlant (et ce quel que soit le matériau utilisé). Pour le platelage en aluminium Alumadeck (Reynolds), le rapport d'élancement des poutres affecte peu, en proportion, le coût total de production du tablier puisque la majeure partie du coût est compris dans le platelage.

Enfin, pour un rapport d'élancement de 10, le mémoire de maîtrise de Roy (1999) compare l'influence de l'espacement des poutres sur le coût total du pont. Les résultats sont donnés à la Figure 7.3.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

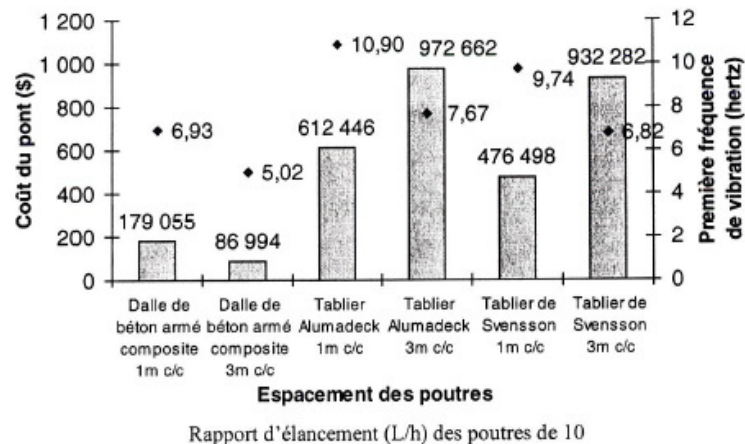


Figure 7.3 Coût d'un pont de type Pratt de 15 mètres en fonction de l'espacement des poutres (Roy, 1999)

Plus l'espacement des poutres est faible, plus les coûts de production diminuent pour les platelages en aluminium. En effet, les charges sont mieux réparties transversalement si les poutres sont plus rapprochées, ce qui diminue de manière conséquente la quantité d'aluminium à utiliser et donc le coût.

Toutes les analyses économiques du mémoire de maîtrise de Roy sont fondées uniquement sur les coûts résumés ci-dessous et ne sont pas justifiées par des références particulières (Roy, 1999) :

- Coût de la charpente métallique, ponts de 15 à 35 mètres de portée : 2,5 \$/kg
- Coût de la charpente d'aluminium :
 - Poutres à âme pleine et poutres-caissons : 7,5 \$/kg + 120 \$/m de poutre
 - Pont à âmes triangulées : 9,30\$/kg
- Coût du béton de la dalle, pont de 15 mètres de portée : 700 \$/m³
- Coût du tablier de Svensson : 900\$/m²
- Coût du tablier AlumaDeck : 2200\$/m²

On peut remarquer l'extrême simplicité de ces données. Il n'y a pas de précision sur ce qui est pris en considération dans chaque valeur de coût. On peut aussi noter que dans la liste des prix suggérés 2016 par le MTMDet (MTMDet, 2016), le coût pour le béton de dalle (sur poutres) est de 1400 \$/m³, auquel il faut ajouter le prix des armatures, du revêtement, ou de la membrane d'étanchéité. Le coût choisi dans le mémoire de maîtrise de Roy (1999) peut donc être contesté au vu du peu d'information qui le décrit.

On peut constater que le coût des platelages d'aluminium a diminué aujourd'hui puisque les extrudeurs et les techniques et pratiques de soudage de l'aluminium se sont améliorés depuis 20 ans. En particulier, le coût du platelage AlumaBridge Gen II tout assemblé est de 119 US\$/pi² (Beaulieu & Internoscia, 2015). Avec un taux de change de 1,3 entre le dollar canadien et le dollar américain, on obtient un coût d'achat du

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

platelage AlumaBridge GEN II de 1665 CAN\$/m²; le coût au mètre carré pour le platelage d'aluminium a donc diminué de 25% par rapport au coût choisi dans le mémoire de maîtrise de Roy (1999).

Il est à noter aussi que lorsque l'espacement des poutres diminue (passant de 3 mètres à 1 mètre), le nombre d'appareil d'appuis est multiplié par 3. Pour un pont de 3 voies de large (étudié dans le mémoire de Roy (1999)), on passe de 4 à 12 poutres et il faut payer 16 appareils d'appuis supplémentaires. Si l'on considère 2 000 CAN\$ par unité (MTMDET, 2016) il faut augmenter de 32 000 CAN\$ le coût global, ce qui n'est pas pris en compte ici dans le coût de production. Cette valeur est non négligeable par rapport au 476498 CAN\$ (7%) que coûte le tablier avec un platelage de Svensson.

Enfin, le critère de dimensionnement pour les tabliers dans le mémoire de maîtrise de Roy (1999) est la première fréquence de vibration de la structure. Pour les nouveaux concepts de tablier tout aluminium, on propose un travail sur les appuis pour pallier à cette limitation (voir la section 2.4.4). Cela pourrait avoir une influence sur l'analyse des coûts.

En conclusion, les données chiffrées présentées dans le mémoire de maîtrise de Roy (1999) doivent être utilisées avec précaution puisqu'elles ne sont pas à jour.

7.1.3. Analyse des coûts pour la production des platelages en aluminium par Viami International Inc. et The Technology Strategies Group

L'analyse de coût de Viami International Inc. et The Technology Strategies Group (2013) est présentée en ANNEXE 3 Analyse des coûts pour la production des platelages en aluminium par Viami International Inc. Et The Technology Strategies Group en 2013. Il est nécessaire de remarquer que le terme de « tablier » est utilisé dans cette étude pour désigner ce qu'on appelle dans ce rapport « platelage ».

On présente dans le Tableau 7.1 les résultats de l'étude :

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

**Tableau 7.1 Coûts de conception et de production d'un platelage de pont en aluminium
(Miami International Inc et The Technology Strategies Group, 2013)**

Poste de dépense	Coût (\$ par pied carré de tablier)	Source
Prix d'aluminium (MWT)	14.42	Platts Metals Week
Prime de billet/alliage	2.38	Platts Metals Week
Coût d'extrusion	19.60	Estimation de RTA, Miami/TSG
Revêtement antiusure	10.00 (7.00 – 12.00)	Sout-traitant de SAPA
Fabrication (FSW)	16.00 (10.00 – 20.00)	ESAB
Drainage, rivets, boulons, joints de dilatation	10.00 (8.00 – 15.00)	Estimation de Miami/TSG
Ingénierie, transport, outillage, etc.	20.00 (15.00 – 25.00)	Estimation de Miami/TSG
Frais généraux et profit	25.00 (10.00 – 35.00)	Miami/TSG
Coût livré au chantier	117.40 (86.40 – 136.40)	

Note : Tous les coûts sont en dollars canadiens en supposant la parité avec le dollar américain. Le coût d'installation n'est pas compris.

On cherche à isoler les coûts nécessaires à la fabrication du platelage et à les donner en CAN\$/m² pour les comparer avec les platelages en béton ou en bois.

On présente dans le Tableau 7.2 le résultat, si l'on considère uniquement le prix de l'aluminium, des extrusions, du soudage (FSW dans l'étude) et de la prime de billette (qui n'est pas présente dans tous les devis des entreprises, mais parfois répartie dans d'autres coûts).

Tableau 7.2 Coût de production d'un platelage de pont en aluminium

Poste de dépense	CAN\$/pi ²	CAN\$/m ²
Prix d'aluminium	14,42	155,22
Prime de billette/alliage	2,38	25,62
Coût d'extrusion	19,6	210,97
Soudage FSW	16,0	172,22
Total platelage		564,03

On obtient, en suivant cette étude, un coût de fabrication de 564 CAN\$/m².

Les coûts donnés par cette étude sont valables pour l'année 2013 et supposent la parité du dollar canadien avec le dollar américain. Cette équivalence n'est plus du tout réaliste en 2017. Néanmoins, on considérera cette valeur comme représentant la réalité dans la comparaison des coûts de la section 7.2.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

On a comme autre valeur de coût celui du platelage AlumaBridge GEN II donné dans le rapport de la mission Floride (Beaulieu & Internoscia, 2015) de 119 US\$/pi² soit 1665 CAN\$/m² avec un taux de change de 1,29. Cette valeur n'est pas un coût de production : il prend en particulier en compte la marge de profit, l'ingénierie, les frais généraux et sans doute le revêtement anti-usure. Il ne peut pas être comparé avec les coûts de production donnés pour chaque solution.

7.2. Comparaison du coût théorique des platelages

7.2.1. Comparaison entre platelage en aluminium et dalle de béton armé

Dans la liste des prix suggérés pour la construction et la réparation (MTMDET, 2016), le ministère des transports donne une valeur de 1400 CAN\$/m³ pour le béton des dalles sur poutres. Si l'on considère une dalle de béton de 200 mm de hauteur (ce qui est le plus commun), on obtient alors un coût de 280 CAN\$/m². On rapporte ici un courriel de D. Fortin (M.Sc., Ing.), ingénieur structure au MTMDET :

« [...] Ce prix est celui payé à l'entrepreneur chargé de la construction du pont concerné, et n'inclut donc pas l'ingénierie, qui est toujours donnée dans un autre mandat qui est réalisé au préalable [...]. »

Dans la plupart des contrats du Ministère [MTMDET], un article « Organisation de chantier » est généralement prévu au bordereau pour le paiement des « frais généraux ». Ces frais ne sont donc pas inclus dans le prix estimé de 1400\$/m³. De même, ce prix au m³ n'inclut pas la membrane d'étanchéité que l'on pose sur la dalle sous le revêtement bitumineux, ni ce même revêtement ; des articles distincts sont prévus au bordereau de paiement pour ces items. Il en est de même pour l'armature dans la dalle, les ancrages pour les poteaux de glissières, les joints de tablier, etc., qui sont exclus du prix de béton de dalle. »

Il contient toutefois des tests sur des éprouvettes témoins par exemple qui n'ont pas été prises en compte *a priori* dans le calcul pour le platelage d'aluminium. La liste des coûts inclus dans cette valeur est donnée à l'annexe 5.

La liste des prix suggérés pour la construction et la réparation (MTMDET, 2016) donne un prix de 2 CAN\$/kg pour les armatures en acier et de 2,5 CAN\$/kg pour les armatures en acier galvanisé. On considère qu'il y a 40 kilogrammes d'acier par mètre carré dans une dalle en béton (espacement 300 mm longitudinal, M20, l'aire de l'armature longitudinale est égale à 67% de l'aire de l'armature transversale), ce qui ajoute un prix d'armature de 80 CAN\$/m².

Pour la comparaison, on a donc un coût de fabrication d'environ 360 CAN\$/m² pour une dalle de béton et de 564 CAN\$/m² pour un platelage en aluminium. Le coût de fabrication du platelage en aluminium est alors 1,57 fois supérieur.

7.2.2. Comparaison entre platelage en aluminium et platelage de bois

Pour ce qui a trait au platelage en bois, le prix donné par le MTMDET est de 1100 CAN\$/m³ (MTMDET, 2016), soit 220 CAN\$/m² pour un platelage de 200 mm de hauteur. Le ratio est alors de 2,56 par rapport au platelage d'aluminium.

7.2.3. Conclusion préliminaire sur les coûts théoriques des différentes solutions de platelage de pont

Un platelage en aluminium sera plus coûteux à fabriquer qu'une dalle de béton ou qu'un platelage de bois. Toutefois, il semble que le ratio soit d'environ 1,57 pour le béton et 2,56 pour le bois en première approximation si on suit le rapport de Miami International Inc. et The Technology Strategies Group.

Pour l'aluminium, on vise une durée de vie d'au moins 75 ans sans changement de platelage. Au contraire, la dalle de béton devrait être changée une fois au cours de la durée de vie de l'ouvrage.

L'analyse de coûts faite dans ce rapport est une analyse préliminaire et sera poursuivie dans un projet subséquent (R787.1 *Analyse du coût total de possession sur le cycle de vie d'un pont routier à platelage en aluminium*) pour déterminer avec précision l'analyse du coût de cycle de vie d'un tablier de pont avec un platelage en aluminium et pour le comparer à des tabliers utilisant le béton ou le bois.

Les analyses de coûts sont dans les cas présentés ici, des prévisions et sont donc soumises à des hypothèses importantes. L'inflation et les évolutions des coûts rendent parfois obsolètes les analyses proposées par le passé.

7.3. Estimation préliminaire du coût du nouveau concept de pont tout aluminium

7.3.1. Estimation du coût des extrusions

Dans une première partie, on donne (Tableau 7.3 et Tableau 7.4) les coûts relatifs à la production des extrusions selon deux compagnies européennes qui ont répondu aux demandes d'estimé budgétaire. La première extrusion est celle du T en bas de la poutre, la seconde est l'extrusion de liaison poutre/platelage et la troisième est l'extrusion de platelage.

**NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE
EN CHANTIER**

Tableau 7.3 Estimation budgétaire pour des extrusions en 6063-T6 (Entreprise 1)

	Masse linéaire	Outillage	Longueur	Surface	Quantité min	Prix /kg
	kg/m	CAN\$	m	mm ²	kg	CAN \$
Profilé en T	33,008	9 950	10	12225	4000	7,20
Profilé 2 : au-dessus de la poutre	27,127	26 600	8,5	10067	3000	7,80
Profilé 3	37,193	29 950	8,5	13777	2000	8,00

Tableau 7.4 Estimation budgétaire pour des extrusions en 6063-T6 (Entreprise 2)

	Masse linéaire	Outillage	Longueur	Surface	Quantité min	Prix /kg	Prix /kg
	kg/m	Euro	m	mm ²	kg	Euro	CAN\$
Profilé en T	33,008	20 000	15	12225	4000	5,00	7,0
Profilé 2 : au-dessus de la poutre	27,127	23 000	15	10067	3000	5,00	7,0
Profilé 3	37,193	26 000	15	13777	2000	5,00	7,0

On a considéré que 5 € sont équivalents à 7 CAN\$.

La masse totale du platelage en aluminium proposé au Chapitre 5 est d'environ 15 tonnes. Sans considérer le prix des matrices on obtient un coût pour les extrusions de 105 000 CAN\$.

La masse des 4 poutres est d'environ 3 tonnes soit 21 000 CAN\$.

7.3.2. Estimation du coût du soudage

Dans une seconde partie, on propose une estimation du coût de soudage du platelage et du tablier.

On suppose que le platelage sera fait en panneau de 4,5 × 15 mètres. On suppose aussi que l'usine qui sera chargée de l'assemblage par soudage MIG du platelage possédera une table de dimension suffisante pour placer côte à côte toutes les extrusions de manière plane. On suppose finalement que le soudage sera automatisé avec une machine semblable à celle de la Figure 7.4.



Figure 7.4 Machine à souder automatiser (Huayuan Welder, 2016)

On suppose donc une vitesse de soudage de 1,2 mètres/min une fois que la machine est installée. Comme présenté sur la Figure 7.6 et dans le Tableau 7.5, on considère deux types de soudure pour le platelage : la première de 20 mm et la seconde de 7 mm. Si on considère que chaque passage de la machine à souder donne un cordon de soudure d'une épaisseur de 4 mm, il faut 5 étages de passes (donc 15 passes) pour souder pleine profondeur les 20 mm du dessus du platelage et 2 étages de passes (soit 3 passes) pour la soudure de 7 mm.



Figure 7.5 Soudure de 20 mm de profondeur avec 5 étages de passes et 15 passes

**NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE
EN CHANTIER**

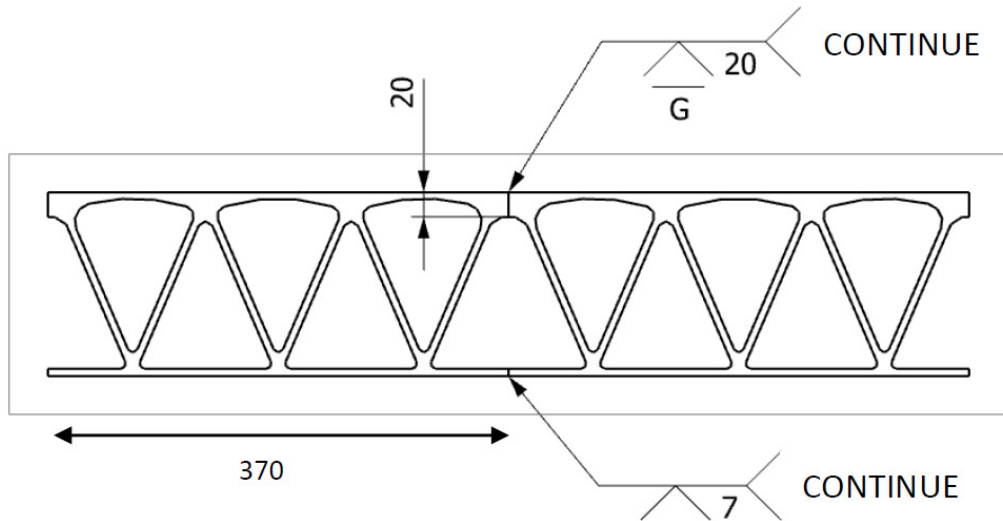


Figure 7.6 Détails de soudure pour le platelage

Tableau 7.5 Longueur de soudure équivalente

Profondeur de soudure	Nombre d'étages de passes	Nombre de passes	Nombre de soudures	Longueur de chaque soudure	Équivalent de longueur totale à souder
mm				m	m
20	5	15	13	15	2925
7	2	3	13	15	585

On obtient ainsi une longueur équivalente de soudage : on peut considérer que pour le platelage il y a 3500 mètres de cordon une passe à souder.

On peut ensuite estimer que le coût est de 100 CAN\$ par heure pour un soudeur d'aluminium ainsi que son matériel et les consommables. Avec une avance de 1,2 mètres/min, il faut 50 heures de soudage effectif pour assembler tout le platelage.

Néanmoins, un platelage d'une telle dimension nécessite une séquence de soudage travaillée, et on ne peut évidemment pas souder en continu chacune des soudures de 15 mètres, cela engendrerait des distorsions trop importantes. On considère donc que le soudage effectif correspond seulement à 50% du temps du soudeur. On a finalement un temps de 100 heures soit 10 000 CAN\$ pour le soudage simple.

Il faut ajouter des coûts pour le contrôle des soudures par un technicien avec un coût horaire estimé à 60 CAN\$/heure. Les soudures pour une telle structure nécessitent une vérification visuelle à 100% et une vérification plus approfondie (type ultrason) sur 10%

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

de sa longueur. On estime à 15 heures ce travail ce qui engendre un coût supplémentaire de 900 CAN\$.

On peut considérer que le coût de production pour chaque platelage de 15 mètres de longueur et de 9 mètres de largeur (2 panneaux) est d'environ 10 900 CAN\$.

Il faut ajouter à ce coût unitaire par platelage des coûts initiaux liés au contrôle qualité. Des tests préliminaires sur les soudures et des tests sur la séquence de soudage devront être effectués. L'ordre de grandeur du coût engendré est de 40 heures à 60 CAN\$/heure et de 5 heures à 100 CAN\$/heure, soit un coût initial supplémentaire de 3000 CAN\$.

Ces valeurs sont des estimations du prix coûtant, auxquels il faut ajouter une marge de profit d'environ 70 %. On récapitule la démarche et les coûts exposés dans le Tableau 7.6 et le Tableau 7.7.

Tableau 7.6 Coûts initiaux des tests et ajustements préliminaires

Temps technicien	h	40
Temps soudeur	h	5
Coût horaire technicien	CAN\$/h	60
Coût horaire soudeur + consommables	CAN\$/h	100
TOTAL	CAN\$	2900

Tableau 7.7 Coût du soudage par platelage

Coût soudage platelage		
Longueur de soudure équivalente	m	3500
Temps de soudage effectif	h	50
Temps total de soudage	h	100
Coût horaire soudeur + consommables	CAN\$/h	100
SOUS TOTAL	CAN\$	10000
Coût tests visuels à 100 % et ultrason à 10%		
Temps technicien	h	15
Coût horaire technicien	CAN\$/h	60
SOUS TOTAL	CAN\$	900
TOTAL par platelage	CAN\$	10900

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

On considère finalement un coût de 20 000 dollars pour le soudage d'un platelage pour la suite de l'étude, puisque les marges prises par les entreprises peuvent être importantes.

7.3.3. Conclusion

Pour les coûts de production du platelage, on a un prix pour les extrusions d'environ 105 000 CAN\$ et un prix de soudage estimé à 20 000 CAN\$. En divisant par les dimensions du platelage, on obtient un coût pour les extrusions de 778 CAN\$/m² et un coût de soudage de 150 CAN\$/m². En additionnant ces valeurs on obtient un coût d'environ 925 CAN\$/m². Cette valeur est bien plus importante que les 360 CAN\$/m² obtenus pour une dalle de béton armé : le platelage en aluminium est, selon l'estimation présentée, 2,6 fois plus cher que la dalle en béton.

L'analyse de coût de la solution présentée au Chapitre 5 a montré que le platelage concentre 83 % de la masse du tablier. Cette valeur est trop importante. On présente donc dans le Chapitre 8, une conception avec 6 poutres avec pour objectifs de diminuer la masse d'aluminium dans le platelage en diminuant sa hauteur.

CHAPITRE 8 CONCEPT FINAL

8.1. Description de la conception finale

On présente à la Figure 8.1, le concept final avec six poutres. Pour empêcher l'accumulation des eaux de pluie, on doit fournir à chaque voie une pente de 2%. Pour cela, les extrusions pour la zone centrale des poutres intérieures ont été agrandies de respectivement 117,26 et 58,63 mm par rapport au 200 mm de l'extrusion présente pour la poutre de rive. La largeur totale du tablier est ici de 9340 mm ce qui est supérieur au 8900 mm que l'on souhaitait. Cette valeur sera amenée à changer en fonction de la conception finale du système d'attache des voies entre elles et de l'extrusion spéciale nécessaire à la mise en place des glissières de sécurité (R786.1 *Développement d'une solution de platelage en aluminium pour pont routier à poutres d'acier, avec action composite*).



Figure 8.1 Coupe transversale du tablier de pont avec pente de 2% pour le drainage des eaux

Pour le dimensionnement suivant la méthode simplifiée, on a choisi la poutre ayant la hauteur la plus faible (celle de la poutre de rive (760 mm)) et la travée possède de chaque côté deux extrusions de 370 mm de large. La hauteur totale de la travée est de 910 mm. La travée est présentée à la Figure 8.2.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

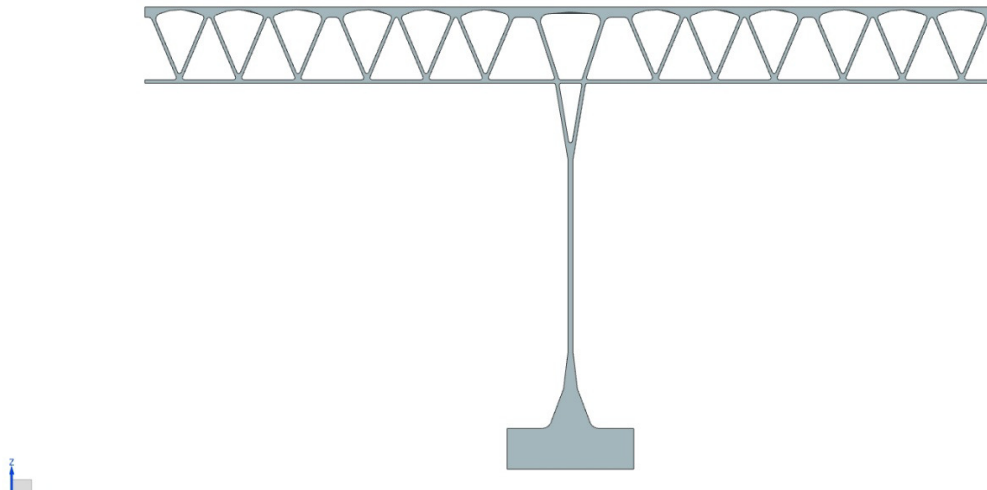


Figure 8.2 Coupe transversale de la travée pour le dimensionnement suivant la méthode simplifiée

Les propriétés relatives à cette travée ont été calculées par NX NASTRAN et sont présentées dans le Tableau 8.1.

Tableau 8.1 Propriétés de la travée

Propriété	Valeur	Unité
Largeur tribulaire L	1680	mm
Hauteur du tablier H	910	mm
Aire totale A_{tot}	85907	mm ²
Centre de gravité par rapport au bas de la poutre y	586	mm
Inertie principale au centre de gravité I_{xx}	$1,28.10^{10}$	mm ⁴
Inertie principale au centre de gravité I_{yy}	$1,11.10^{10}$	mm ⁴
Constante de torsion K	$5,568.10^8$	mm ⁴
Constante de gauchissement C_w	$1,046.10^{14}$	mm ⁶
Masse linéique de la travée	232	kg/m

La masse totale du tablier est de 19,8 tonnes et la masse du platelage est de 12,5 tonnes (63%).

On donne à la Figure 8.3 et à la Figure 8.4, les plans des extrusions utilisées pour le platelage.

**NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE
EN CHANTIER**

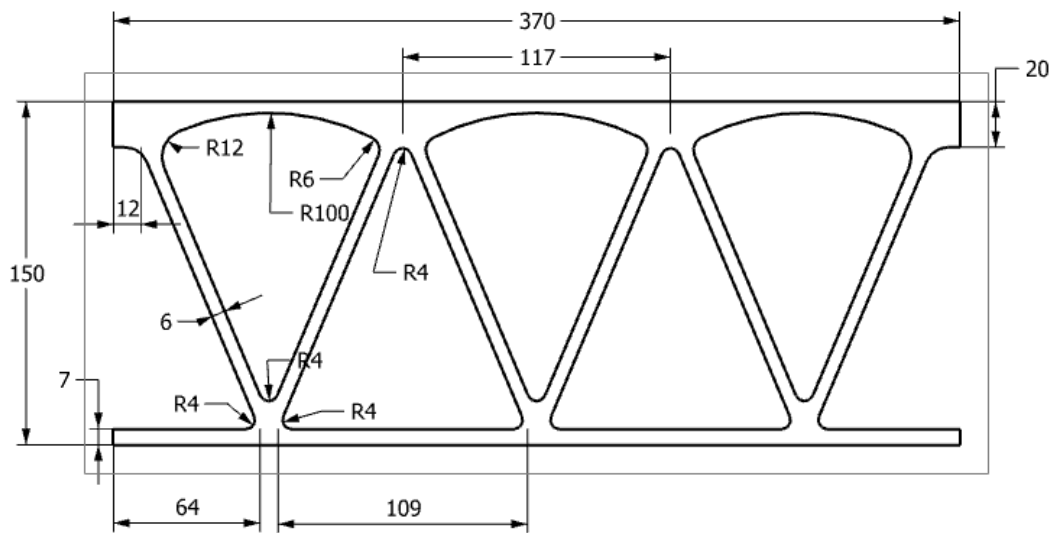


Figure 8.3 Extrusion de platelage

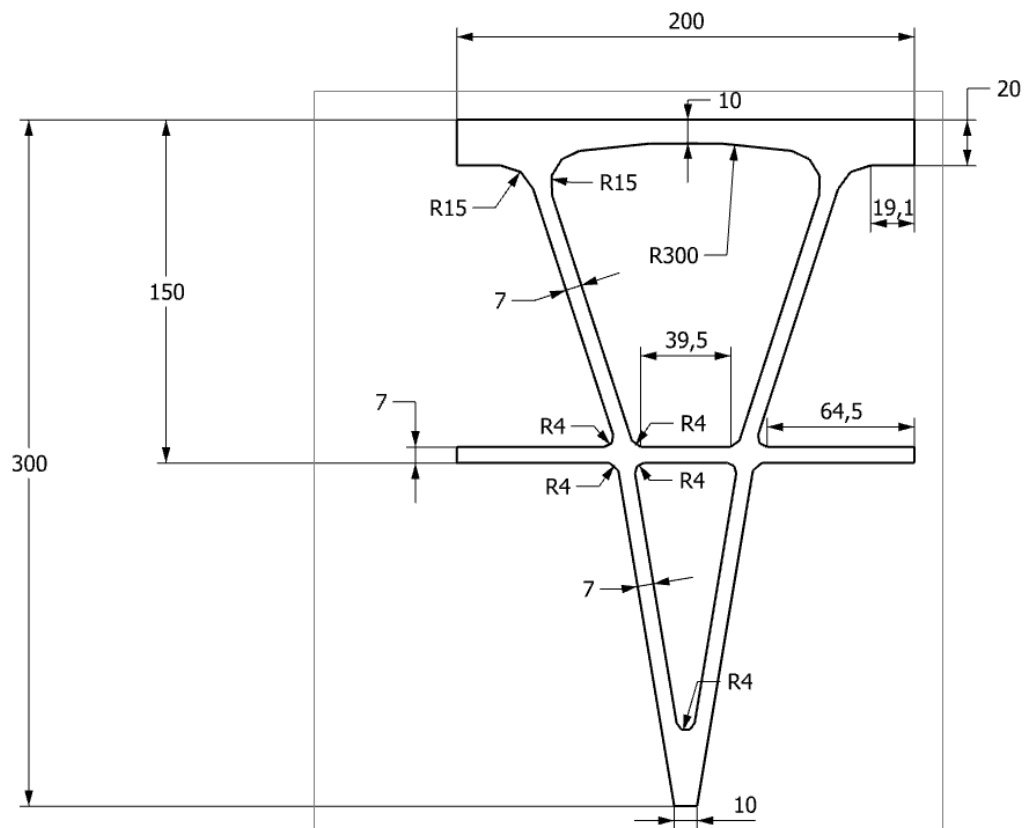


Figure 8.4 Extrusion de liaison

Dans ce chapitre, on applique la méthode simplifiée à ce concept final pour prouver qu'il est en grande partie conforme aux exigences de la norme CAN/CSA S6-2014. La pente

de 2% ne sera pas prise en compte pour les calculs et les modélisations par la méthode des éléments finis.

8.2. Dimensionnement en fatigue

8.2.1. Description du modèle

Pour satisfaire le critère en fatigue de la norme CAN/CSA S6-2014, il ne suffit pas de comparer les contraintes dans le platelage sous une charge de roue comme on l'a exposé à la section 6.3.3. La norme stipule dans l'article 17.20.2.2.2 que la résistance en fatigue doit être inférieure à « l'écart calculé des contraintes [en MPa] de fatigue au détail, dû au passage d'un groupe d'essieux en tandem d'un poids de 125 kN, espacés de 1,2 m, l'espacement transversal des roues étant égal à 1,8 m ». On applique ce critère grâce aux simulations éléments finis.

Dans la Figure 8.5, le modèle que l'on utilise est montré. On a modélisé une portion de tablier de 3 mètres de longueur et de 4670 mm de largeur soumis au passage d'un groupe d'essieu en tandem du camion CL-625 pondéré par un CMD de 1,4. On permet, dans cette modélisation, la flexion du tablier : elle n'est toutefois pas représentative de la flexion globale du tablier. En particulier, les contraintes en traction dans les poutres dues à la flexion globale ne seront pas les bonnes avec cette modélisation. L'objectif ici est de valider en fatigue la conception du platelage.

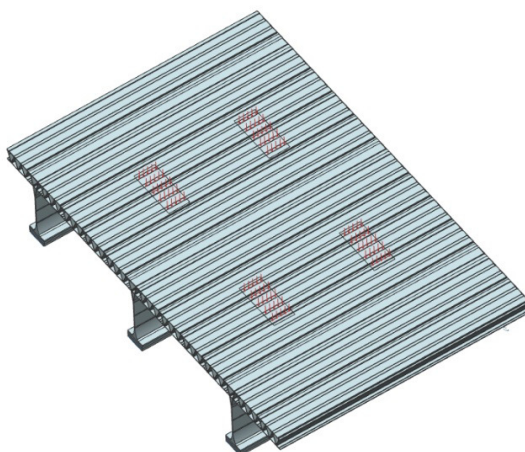


Figure 8.5 Portion de tablier soumis au passage d'un groupe d'essieu en tandem du camion CL-625 pondéré par un CMD de 1,4

8.2.2. Résultats

Comme présenté à la section 6.3.3, l'extrusion doit satisfaire différentes catégories de détails : le métal de base de catégorie A, dont la résistance à la fatigue est de 46,6 MPa, les soudures (de 20 mm de profondeur engendrant une ZAT de 35 mm de chaque côté de la soudure) des ailes supérieures des extrusions du platelage de catégorie C, dont la résistance à la fatigue est de 21,3 MPa, et enfin, les soudures (de 7 mm de profondeur engendrant une ZAT de 30 mm de chaque côté de la soudure) des ailes supérieures des extrusions du platelage de catégorie C, dont la résistance à la fatigue est de 21,3 MPa.

Sur la Figure 8.6, on observe les contraintes de von Mises avec une vue du dessus du tablier. On remarque sur cette vue que les contraintes dans la surface supérieure du platelage sont bien inférieures à la limite de 46,6 MPa pour le métal de base. On a effectué une coupe sous un des essieux qu'on nommera coupe 1. Les figures présentées dans la suite de cette section seront des vues prises à différentes localisations le long de la coupe.

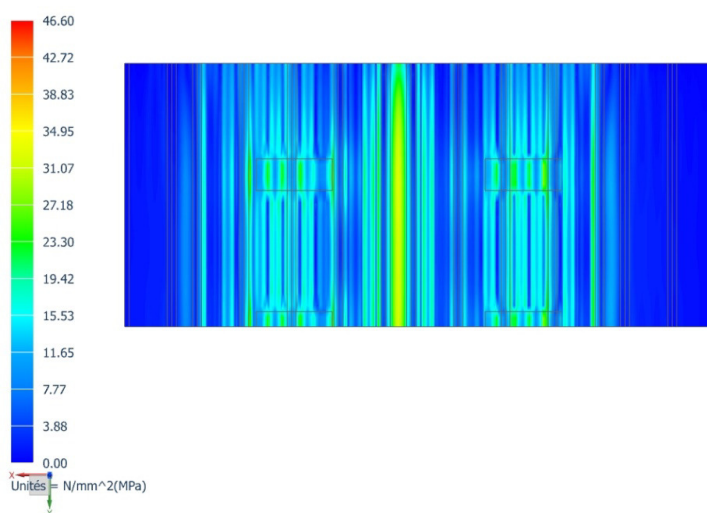


Figure 8.6 Vue du dessus du tablier. Vérification du métal de base. Coupe 1 sous essieu

Pour le métal de base, on vérifie sur la Figure 8.7, les contraintes de von Mises dans la coupe 1 pour l'extrusion de liaison poutre/platelage. Les contraintes ne dépassent pas la valeur de 46,6 MPa dans cette extrusion.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

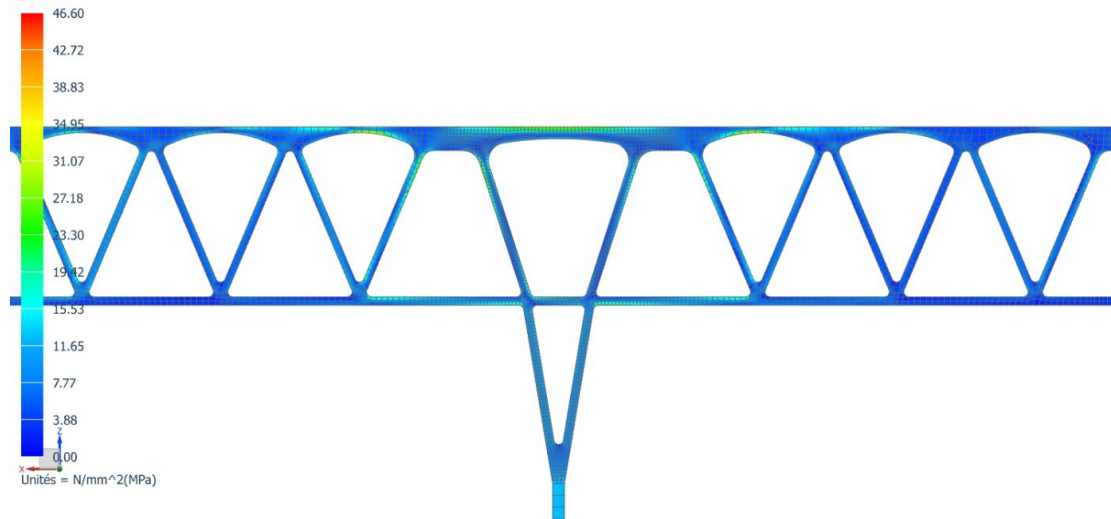


Figure 8.7 Coupe 1. Métal de base. Extrusion de liaison poutre/platelage avec maillage apparent.

Après avoir vérifié le métal de base (catégorie de détail A), on change l'échelle pour comparer les contraintes dans le ZAT (encadrée en rouge sur la Figure 8.8) avec la résistance de 21,3 MPa admissible dans cette zone. Sur la Figure 8.8, on remarque que certains éléments ont des contraintes dépassant la limite de 21,3 MPa admissible. Néanmoins, ces contraintes sont dans les âmes des extrusions et sont dues à la flexion transversale (donc entre poutres) du platelage. On montre à la Figure 8.9 les contraintes transversales (notées XX dans cette modélisation). L'échelle a été choisie pour que les éléments en compression soient en bleus et que seuls les éléments en traction soient dans une autre couleur. Les zones en traction dépassant la limite de 21,3 MPa admissible pour la ZAT sont en rouge. On voit alors que les zones dépassant la limite admissible avec les contraintes de von Mises sont en compression et ne sont donc pas sujettes à la fatigue. Ces résultats valident, en fatigue, la conception de l'extrusion de liaison entre le platelage et la poutre.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

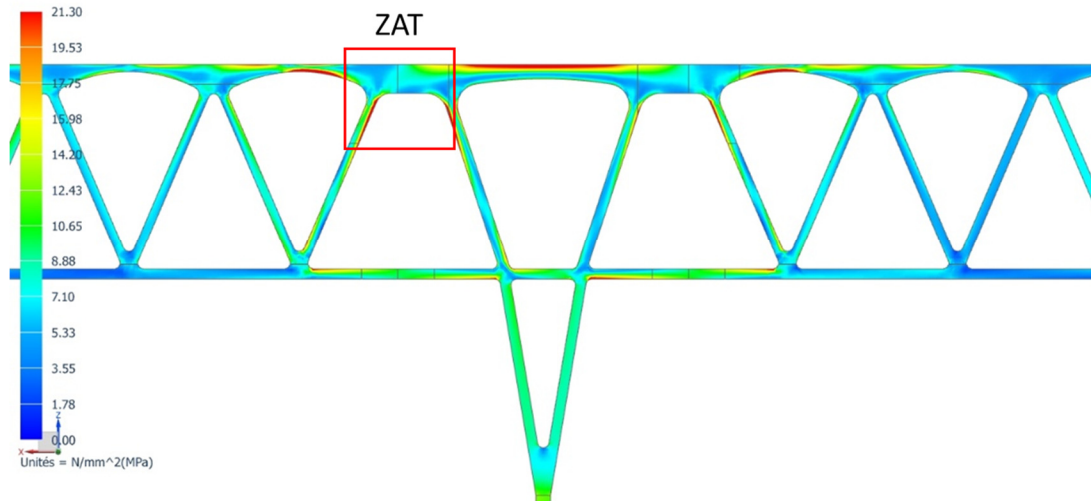


Figure 8.8 Coupe 1. ZAT. Contrainte de von Mises. Extrusion de liaison poutre/platelage

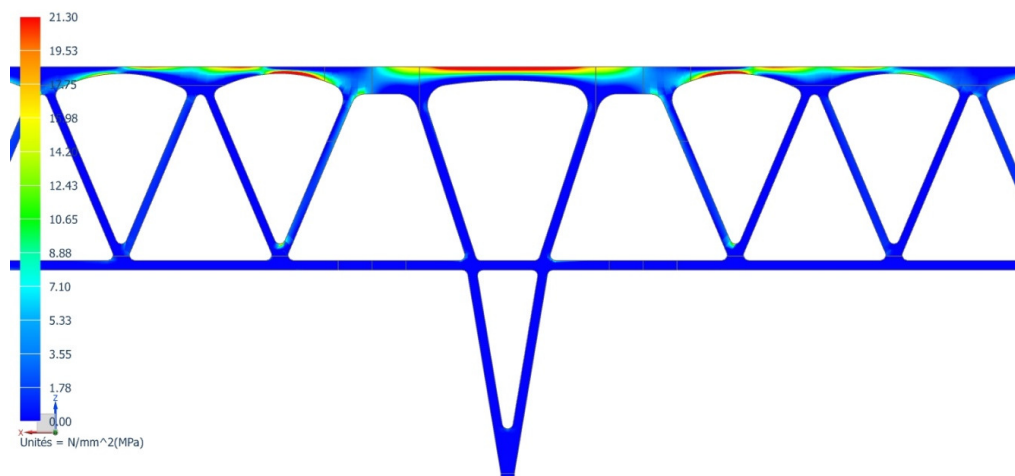


Figure 8.9 Coupe 1. ZAT. Contrainte de XX. Extrusion de liaison poutre/platelage

On présente à la Figure 8.10, une vue plus globale de la coupe 1 avec la même échelle que pour la Figure 8.9. On remarque alors qu'une partie du platelage entre les poutres travaille en traction (due à la flexion transversale). Dans cette partie, les contraintes ne dépassent pas la contrainte admissible de 21,3 MPa, et la conception en fatigue du platelage peut donc être acceptée.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

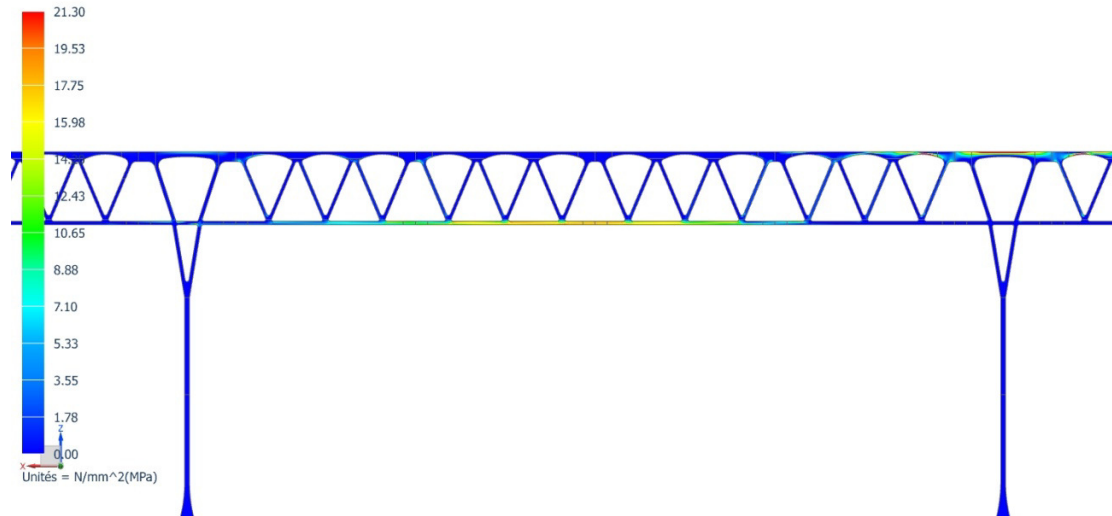


Figure 8.10 Coupe 1. ZAT. Contrainte de XX. Platelage entre poutres

8.2.3. Conclusion

La conception présentée dans la section 8.1, répond au critère de la norme CAN/CSA S6-2014 pour la fatigue. Au vu des différents résultats, la conception pourrait encore être améliorée pour répartir les contraintes et diminuer la matière utilisée. En particulier, dans les extrusions de platelage une partie du métal utilisé dans l'aile supérieure pourrait être enlevée.

8.3. Calcul des fractions de charge de camion

8.3.1. Cas 1

On place le camion au plus proche de l'axe de symétrie du pont (en haut de la Figure 8.11), c'est-à-dire que le centre de gravité de la file de roues supérieure est à 600 mm de l'axe.

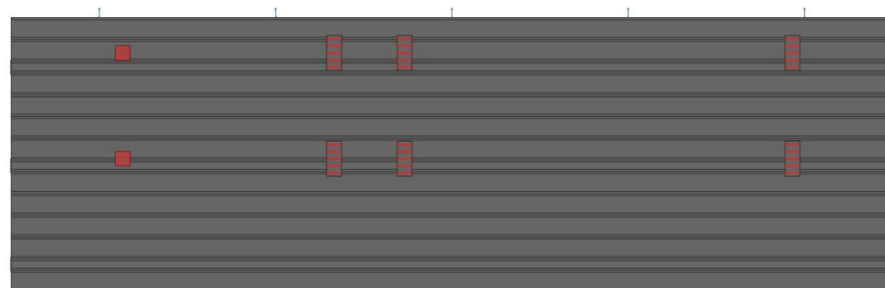


Figure 8.11 Cas 1. Fraction de charge de camion

On obtient, dans le Tableau 8.2, les réactions aux appuis qui donnent les fractions de charge de camion reprise par chaque poutre.

**NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE
EN CHANTIER**

Tableau 8.2 Cas 1. Fraction de charge de camion

Numéro de la poutre	1	2	3	Somme
Réactions d'appuis (N)	486088	352517	69848	908453
Fraction de charge de camion non pondérée	0,54	0,39	0,08	1,00
Fraction de charge de camion pondérée	0,48	0,35	0,07	

On pondère dans ce cas les ratios obtenus par $R_L = 0,9$. On considère que $F_T = 0,5$ pour la poutre intérieure.

8.3.2. Cas 2

On décale, comme on peut le voir sur la Figure 8.12, les charges pour charger au maximum la poutre centrale (poutre 2).

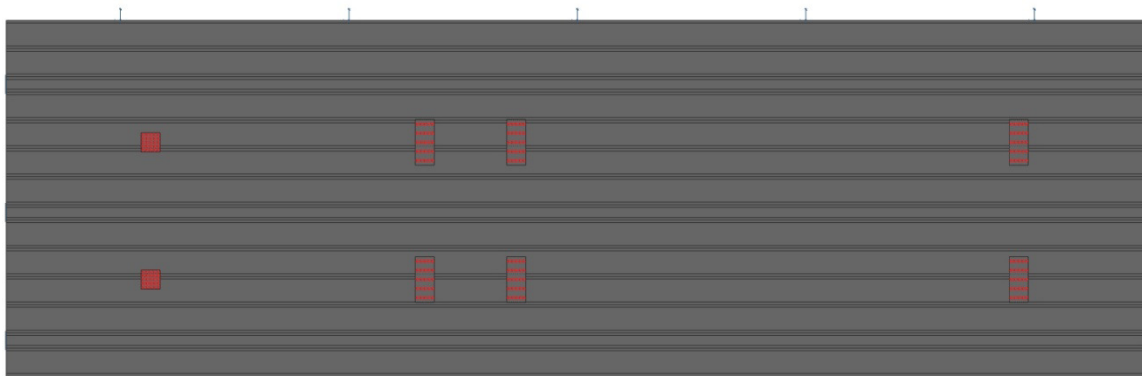


Figure 8.12 Cas 2. Fraction de charge de camion

On obtient les fractions de charge de camion qui sont données dans le Tableau 8.3.

Tableau 8.3 Cas 2. Fraction de charge de camion

Numéro de la poutre	1	2	3	Somme
Réactions d'appuis (N)	293503	366828	248123	908454
Fraction de charge de camion non pondérée	0,32	0,40	0,27	1,00
Fraction de charge de camion pondérée	0,29	0,36	0,25	

Le maximum est de 0,36. Ce cas est moins critique que le précédent.

8.3.3. Cas 3

Dans ce dernier cas, présenté à la Figure 8.13, on ne place qu'un seul camion sur le pont au complet. On ne devra pas pondérer les fractions de charge de camion ($R_L = 1$).

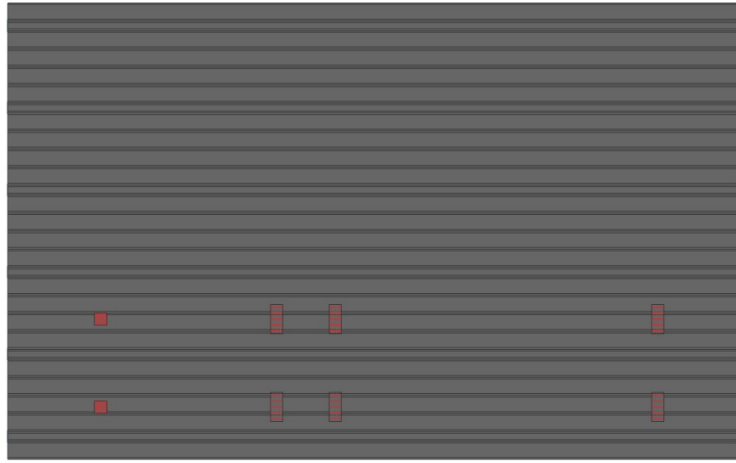


Figure 8.13 Cas 3. Fraction de charge de camion

On obtient pour les six poutres les fractions de charge de camion qui sont données dans le Tableau 8.4. On remarque que le ratio (ou les réactions d'appuis) est négatif pour la poutre la plus éloignée de la charge. Le tablier a tendance à se relever dans cette zone du fait de l'application des charges du camion.

Tableau 8.4 Cas 3. Fraction de charge de camion

Numéro de la poutre	1	2	3	4	5	6	Somme
Réactions d'appuis (N)	354012	395233	225727	56716	3611	-25614	974972
Fraction de charge de camion	0,36	0,41	0,23	0,06	0,00	-0,03	1,00

La fraction de charge de camion maximale dans ce cas (0,41) est encore inférieure à celle obtenue dans le cas 1.

8.3.4. Conclusion

On prend pour la suite de nos calculs le cas le plus contraignant des cas calculés dans cette section.

La valeur la plus importante est de 0,48 pour le premier cas. On arrondira de manière sécuritaire à 0,5 cette valeur pour la suite de nos calculs.

8.4. Calcul de la largeur effective

Les résultats concernant la largeur effective en suivant la méthode décrite à la section 6.2 ne sont pas présentés. En effet, les résultats que l'on a obtenus sont trop incertains. Une analyse plus précise pour la largeur effective (ou aire effective) pour les platelages en aluminium devra être effectuée pour déterminer une valeur fiable.

Pour le calcul du moment de résistance en flexion, on considérera dans la suite la largeur tributaire.

8.5. ELUL1 en flexion

8.5.1. Moment sollicitant :

Charge vive :

$$M_L = 1,7 * F_T * M_T$$

avec :

$$F_T = 0,5$$

$$M_T = 1287 \text{ kNm}$$

donc :

$$M_L = 1094 \text{ km}$$

Charge morte :

$$M_D = 1,1 \cdot \frac{w \cdot L^2}{8}$$

avec :

$$w = m \cdot g = 2,28 \text{ kN/m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

donc :

$$M_D = 70,4 \text{ kNm}$$

8.5.2. Moment résistant :

Fibre supérieure :

$$M_R = \phi_y * \frac{I * F_y}{y}$$

avec :

$$I = 1,28.10^{10} \text{ mm}^4$$

$$\phi_u = 0,9$$

$$F_u = 170 \text{ MPa}$$

$$y = 324 \text{ mm}$$

donc :

$$M_{R1} = 6044 \text{ kNm}$$

Fibre inférieure :

$$M_R = \phi_y * \frac{I * F_y}{(h - y)}$$

avec :

$$I = 1,28.10^{10} \text{ mm}^4$$

$$\phi_u = 0,9$$

$$F_u = 170 \text{ MPa}$$

$$h - y = 586 \text{ mm}$$

donc

$$M_{R2} = 3242 \text{ kNm}$$

conclusion :

on a bien,

$$\min(M_{R1}; M_{R2}) \geq M_L$$

On a même un moment résistant à l'ultime trois fois supérieur au moment sollicitant.

8.6. ÉLUT 1 en flexion

8.6.1. Moment sollicitant :

Charge vive :

$$M_L = 0,9 * F_T * M_T$$

avec :

$$F_T = 0,5$$

$$M_T = 1287 \text{ kNm}$$

donc :

$$M_L = 580 \text{ kNm}$$

Charge morte :

$$M_D = \frac{w \cdot L^2}{8}$$

avec :

$$w = m \cdot g = 2,28 \text{ kN/m}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

donc :

$$M_D = 64,0 \text{ kNm}$$

8.6.2. Critère flèche-première fréquence de vibration

Calcul de la première fréquence de vibration :

$$F_{1s} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

avec :

$$L = 15 \text{ m}$$

$$E = 69\,000 \text{ MPa}$$

$$I = 1,28 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$m = 232 \text{ kg/m}$$

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

donc :

$$F_{1s} = 43,07 \text{ Hz}$$

Calcul de la flèche :

$$f = \frac{5wL^4}{384EI}$$

avec :

$$L = 15 \text{ m}$$

$$w = 2,28 + \frac{8.580}{15^2} = 22,90 \text{ N/mm}$$

$$E = 69\,000 \text{ MPa}$$

$$I = 1,28 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

donc :

$$f = 17,09 \text{ mm}$$

Le critère de vibration en fonction de la flèche n'est pas respecté comme cela est présenté dans la littérature (Arrien, 1995). Un travail au niveau des appareils d'appuis devra être fait pour pallier cette limitation.

CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet de recherche a évolué au cours du temps en fonction des résultats obtenus. Les connaissances sur les ponts en aluminium étant assez limitées à l'heure actuelle, différentes pistes de solutions sont possibles.

Dans un premier temps, la conception d'un tablier de pont tout aluminium avec des caissons, inspiré de la remorque Capacity d'Alutrec, a été explorée. Même si les analyses démontrent qu'un tablier en caisson en aluminium pourrait en théorie résister aux charges routières qui pourraient le solliciter, il a été constaté que la fabrication des composants requis serait complexe et indûment coûteuse. Entre autres, il serait nécessaire d'avoir recours à plusieurs pièces assemblées pour fabriquer dans la partie inférieure de la partie poutre qui est en tension. Pour ces raisons, ce concept a été abandonné au profit d'une solution inspirée des poutres en I traditionnelles. L'étude de cette conception a toutefois été utile pour le choix de la nouvelle solution.

Pour un pont avec platelage en aluminium sur des poutres en I, on a d'abord cherché à concevoir une solution totalement québécoise, c'est-à-dire dont toutes les extrusions pourraient être produites dans la province de Québec. L'étude des possibilités implique l'utilisation d'extrusions dont le diamètre circonscrit est de 230 mm et dont le poids maximal est de seulement 100 kg. Les modélisations par la méthode des éléments finis ont montré qu'il faudrait des extrusions de très faible largeur pour qu'elles aient une hauteur suffisante et une distribution de matière adéquate pour que les contraintes induites dans l'aluminium par les charges sollicitant le tablier n'excèdent pas les limites prescrites dans les zones affectées par la chaleur de soudure. Ceci fait toutefois en sorte qu'un très grand nombre d'extrusions longitudinales seraient requises pour couvrir la largeur hors tout du platelage, ce qui implique un nombre de soudures tout aussi grand, éliminant toute possibilité d'en arriver à une solution qui pourrait éventuellement être économique, si on se limite aux extrusions qu'il serait possible de produire avec les presses à extruder implantées au Québec au moment de la rédaction de ce rapport.

Fort de ces analyses, on a conçu un tablier de pont à quatre poutres non extrudable dans la province. On a proposé une conception innovante qui s'éloigne des standards de l'acier puisque les extrusions permettent des solutions plus complexes et plus travaillées. Une des solutions permettrait de développer l'action composite totale, et le tablier de pont pourrait être fabriquable en usine et assemblable en chantier de manière rapide.

Durant ces recherches, la norme CAN/CSA S6-2014 a été utilisée. Le chapitre de la norme portant sur les ouvrages en aluminium n'ayant été publié qu'en 2011 (par le biais d'un supplément à la version 2006 de la norme), certaines valeurs spécifiées dans celle-ci sont vraisemblablement prudentes, puisque basées sur un historique de données limitées. C'est en particulier le cas des paramètres de calcul pour les fractions de charge de camion, qui sont calquées sur les valeurs spécifiées pour les platelages en madrier

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

de bois. Au vu des analyses effectuées, on a alors trouvé une valeur pour la fraction de charge de camion en flexion pour notre platelage en aluminium de 0,635 (soit un D_T de 3,81 m). Cette valeur est donnée à titre informatif, mais semble prouver qu'une analyse plus approfondie sur le calcul des fractions de charge de camion pour les platelages en aluminium devrait être entamée.

Puisque le nouveau concept prévoit que le platelage participe à la résistance en flexion, on s'est ensuite intéressé à la définition d'une aire effective, inférieure à l'aire tributaire, pour prendre en compte le décalage en cisaillement dans le platelage dû à la rigidité de la poutre. On met ainsi en exergue les problématiques liées à une telle analyse, et en particulier celle de l'impossibilité, à notre connaissance, dans le logiciel d'éléments finis, de calculer un moment de flexion dans une section. On propose néanmoins une méthode approximative qui devra être reprise et approuvée avant d'être utilisée.

Après ces considérations techniques, on a effectué une analyse des coûts de production du nouveau concept de platelage en aluminium. Les coûts de production, que l'on a estimés, sont 2,6 fois plus importants pour le platelage en aluminium par rapport à une dalle de béton armé. On a alors constaté que la conception de tablier que l'on a proposé avec quatre poutres concentre 83% de sa masse dans le platelage et seulement 17% pour les poutres qui doivent pourtant apporter la résistance globale de l'ouvrage. Il nous est donc paru pertinent de tester un tablier de pont avec six poutres dont seulement 63% de la masse est comprise dans le platelage. La nouvelle conception a été dimensionnée en fatigue pour répondre aux exigences de la norme.

Au cours de ce rapport, on a tenté de mettre en exergue les parties indûment sécuritaires de la norme CAN/CSA S6-2014 pour que l'on puisse les réviser afin de concevoir un tablier de pont optimisé et prudent utilisant l'aluminium. Ce travail peut être considéré comme une analyse préliminaire d'un concept de tablier de pont tout aluminium qui devra être poursuivie et testée.

RÉFÉRENCES

- AlumaBridge. (2017). http://www.alumabridge.com/products_alumabridge.htm. Consulté le 06 07, 2017
- Alutrec. (2016). <http://www.alutrec.com/fr/>. Consulté le 10 20, 2016
- Annan, C.-D. (2016). Notes de cours : GCI-7090 Dynamique des structures. Université Laval.
- Arrien, P. (1995). *Remplacement d'un tablier de pont par un tablier en aluminium*. M.Sc.. Québec: Université Laval.
- Azo Materials. (2017).
http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1554#_What_is_Extrusion?
Consulté le 03 21, 2017, sur <http://www.azom.com>.
- Bahuaud et Boivin. (1969). *Cours : fatigue des matériaux*. INSA Lyon.
- Beaulieu & Internoscia. (2015). *Chantier Infrastructures et Ouvrages d'art : Mission technique sur les ponts en aluminium*. Tampa Bay, Floride: Rapport.
- Beaulieu & Internoscia. (2015). *Rapport de visites et de rencontres en Suède, en Hollande et aux États-Unis*. Rapport.
- Beaulieu, D. (2016). *Calcul des ponts et passerelles en aluminium selon la norme CAN/CSA S6-2014 - Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Montréal: Cours. Réseau des ingénieurs du Québec.
- CAN/CSA S6-2014. (2014). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Association canadienne de normalisation.
- Chen. (2007, May/June). Proposed Effective Width Criteria for Composite Bridge Girders. *Journal of bridge engineering*, pp. 325-338.
- Cheung et Chan. (1978, 02 15). Finite strip evaluation of effective flange width of bridge girders. *Technological and Development Branch, Department of Public Works Canada*, 174-185.
- Chiewanichakorn, M. (2004, Decembre). Effective flange width definition for steel-concrete composite bridge girder. *Journal of structural engineering*, 2016-2031.
- Coughlin, R., & Walbridge, S. (2012, May/June). Fatigue Testing and Analysis of Aluminum Welds under In-Service Highway Bridge Loading Conditions. *Journal of Bridge Engineering*, 409-419.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

- CQRDA. (s.d.). *L'extrusion de l'aluminium*. Consulté le 04 20, 2017, sur http://www.cqrda.ca/wp-content/uploads/2013/07/Feuillard30_Extrusion.pdf.
- Delaboure, M. (2016). <http://www.cours-et-exercices.com/2016/05/cours-de-courroies-transmission-de.html>. Cours. Consulté le 09 28, 2016
- Dhatt, Touzot, & Lefrançois. (2005). *Méthode des éléments finis*. Lavoisier.
- Éditeur officiel du Québec. (2016). *Règlement sur le permis spécial de circulation*.
- ETS. (2014). *Matériaux à haute résistance mécaniques et leurs procédés de fabrication*. École de technologie supérieure. Cours.
- Faucher, R. (1995). *Utilisation des produits d'aluminium pour la réhabilitation de ponts dans le contexte canadien*. M.Sc.. Québec: Université Laval.
- Fortin, D. (2001). *Étude expérimentale du comportement des assemblages boulonnés antiglisement en aluminium dans le contexte canadien*. Université Laval.
- Gouvernement du Québec. (2015). *Stratégie Québécoise de développement de l'Aluminium 2015-2025*.
- Groupe Canam inc. (2016). <http://www.canambridges.com/fr/produits/goodco-z-tech/appareils-dappui>. Consulté le 12 03, 2016
- Guillot, M. (2013). *Introduction à la conception de produits et infrastructures en aluminium*. Québec: Réseau des Ingénieurs de Québec. Cours.
- Huayuan Welder. (2016). https://cdhy.en.alibaba.com/product/60297027959-200670286/Digital_Control_IGBT_MIG_MAG_tractor_for_welding_machine.html. Consulté le 05 08, 2017
- International L&W. (2012). <http://www.fr.internationallw.com/portfolio-view/extrusion-daluminium/>. Consulté le 04 21, 2016
- Kaufman, J. G. (2006). *Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep, and Fatigue Data at High and Low Temperatures*. The Aluminum Association and ASM International.
- Leclerc, J. (2017). Étude des effets de variation thermique sur le comportement structural d'un tablier à platelage d'aluminium sur poutres d'acier, à action composite.
- Leprince, F. (2015). *Étude de la résistance à la fatigue de connexions soudées d'un pont à poutres hybrides en acier haute performance dans le contexte canadien*. Université Laval, M.Sc..
- Maitournam, H. (2017). <http://www.dfr.ensta.fr/Cours/?sigle=MS203>. Consulté le 01 25, 2017

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

- Maljaars. (2006). Fatigue of Aluminium Bridge Decks. (I. A. Engineering, Éd.) *Structural Engineering International*, 16(4), pp. 305-311.
- Maljaars, Soetens, & Kluijver, D. (2008). Structural Design of Aluminium Bridge Decks for Existing Traffic Bridges. (I. A. Engineering, Éd.) *IABSE Congress Report*, 584-585.
- Méthot, J.-C. (2008). *Développement structural d'une remorque ultralégère en aluminium*. M.Sc.. Québec: Université Laval.
- MTMDet. (2016). Liste des prix suggérés 2016 – Construction et réparation.
- MTMDet. (2016). *Manuel de conception des structures*.
- Nippon Light Metal Compagny. (2011, Avril 20).
http://www.nikkeikin.com/news/whatsnew/post_23.html. Consulté le 02 12, 2016
- Parenteau, C. (2010). *Développement d'un nouveau concept de remorque ultralégère en aluminium : étude statique et dynamique*. M.Sc.. Québec: Université Laval.
- Pastor, M.-L. (2008). *Contribution à l'étude en fatigue de structures en aluminium renforcées par patchs composites*.
- Pexal Tecalum. (2014).
http://www.pexaltec alum.ca/fr/entreprise/technologie_extrusion_aluminium.
Consulté le 03 21, 2016, sur <http://www.pexaltec alum.ca>.
- Rio Tinto. (2011).
https://www.rtapublicsales.riotinto.com/Fr/OurGlobalNetwork/Americas/Pages/ExtrusionBillet_alloysSeries.aspx. Consulté le 12 02, 2016
- Roche Ingénieurs-conseil. (2008). *Positionnement de l'aluminium dans la construction des ponts au Canada : répertoire, problématique et stratégie*. Montréal: Association de l'aluminium du Canada.
- Roy, C. (1999). *Evaluation du potentiel d'utilisation de l'aluminium dans les ouvrages d'art*. M.Sc.. Québec: Université Laval.
- Singh, Gandhi, & Shergill. (2012, December). Comparative Study Of Friction Stir And Tig Welding For Aluminium 6063-T6. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1, Issue 10.
- SQDA. (2015). www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/par-secteur-dactivite/metallurgie/aluminium/page/strategies. Consulté le 10 10, 2016
- SubsTech. (2012, 07 28).
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=aluminum_extrusion. Consulté le 04 04, 2017, sur www.substech.com.

**NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE
EN CHANTIER**

The International Aluminium Institute. (2012). *<http://bauxite.world-aluminium.org/refining/energy-efficiency.html>*. Consulté le 10 10, 2016

UQAC. (2017). *<http://www.uqac.ca/servtss/arvida.htm>*. Consulté le 06 13, 2017

Viami International Inc et The Technology Strategies Group. (2013). *Étude de marché sur les possibilités de l'aluminium*. Rapport. Montréal: Association de l'aluminium du Canada.

ANNEXE 1 RAPPORT DE LA VISITE DE L'USINE ALUTREC

Projet

Devis R777.1 Nouveau concept de pont à caisson en aluminium à portée simple assemblable en chantier

Participants

Mario Fafard, Yousef Imani, Franck Tchitembo Goma, Jean-Baptiste Burgelin

Introduction

Dans le cadre du projet « *Nouveau concept de pont à caisson en aluminium à portée simple assemblable en chantier* », une visite de l'usine de remorque routière Alutrec a été faite. En effet, leurs remorques hautes performances 100% aluminium sont une source d'inspiration pour la réalisation du présent projet de recherche. Certaines problématiques sont en effet communes aux ponts et aux remorques en particulier d'un point de vue statique.

Le principal atout des remorques en aluminium est leur faible masse par rapport à une remorque conventionnelle permettant d'augmenter la charge transportable sur celle-ci. On peut aussi citer le faible coût d'entretien de ce matériau comme un avantage conséquent pour le client.

La production de la société Alutrec se divise en deux catégories distinctes : les remorques dites conventionnelles formées de deux poutres en I particulières et d'un plancher en extrusion d'aluminium, et les remorques appelées Capacity possédant un caisson pour remplacer les poutres en I.

Ce concept de remorque à caisson permet d'entrevoir des solutions pour des ponts de portées courtes fabriqués en usine. La compréhension du processus de fabrication en usine de la remorque Capacity semble primordiale car probablement qu'une approche semblable sera nécessaire pour fabriquer un pont en aluminium en usine.

Organisation de l'usine

Nous avons visité l'usine actuelle située à Saint-Agathe-de-Lotbinière qui est utilisée pour la fabrication de remorques conventionnelles en aluminium. La chaîne de production commence par un poste de fabrication des poutres en I. Ces poutres sont constituées de deux extrusions rivetées entre elles (voir figure A1.1). Elles sont ensuite cintrées pour que le plancher de la remorque soit horizontal lorsque celui-ci est chargé ; cette cambrure est uniquement esthétique afin d'avoir une remorque droite lorsque chargée. Pour le domaine des ponts on devra déterminer si cette cambrure sera faite ou non.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER



Figure A1.1 : Âme rivetée des poutres en I

En parallèle de la création des poutres en I, un atelier de soudage manuel des différentes pièces utilisées pour l'assemblage final a été mis en place. Cette étape de préparation est nécessaire pour respecter le temps défini pour chaque étape. L'entreprise cherche à robotiser cette activité pour obtenir un gain de temps conséquent.

Le reste de la production constitue l'assemblage de la remorque. Elle est subdivisée en plusieurs postes généraux : le soudage des extrusions entre elles pour créer le plancher de la remorque, on procède ensuite à l'assemblage des poutres en I sur le plancher par soudage MIG. Enfin, l'assemblage des essieux et des éléments non structuraux est fait.

Au vu de cette description, on comprend que le plancher et les poutres travaillent avec action composite. Cette action n'est pas développée pour les remorques acier bois et constitue une des caractéristiques fondamentales d'Alutrec.

À titre d'information, Alutrec déménagera sa production de remorques dans une nouvelle usine à Laurier Station, pour la fabrication industrielle et automatisée de la remorque Capacity de même que pour la fabrication de ses remorques dites conventionnelles.

Présentation de la remorque conventionnelle

Cette remorque conventionnelle (figure A1.2) est assez simple dans son concept et est en service depuis 19 ans. Aucun signe de fatigue n'a été noté ni dans les zones rivetées ni dans celles soudées. Cette remorque s'inspire des traditionnelles remorques avec des poutres, des longerons, des traverses et un plancher extrudé.

Les remorques présentées ici ont une longueur de 53 pieds (16 mètres environ) et une portée non soutenue d'environ 43 pieds (13 mètres).

Certains choix ont été faits pour sa réalisation et en particulier la présence de nombreux rivets. Ces rivets sont en acier inoxydable permettant d'éviter la corrosion galvanique. Ils ont été choisis au départ pour la facilité qu'ils représentent lors de la fabrication, pour

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

le contrôle et l'entretien. Les outils de contrôle des soudures sont en effet beaucoup plus dispendieux et complexes. Dix-neuf ans après la mise en vente de la première remorque, les rivets n'ont pas subi de déformation particulière et n'ont donc pas eu besoin d'être changés.

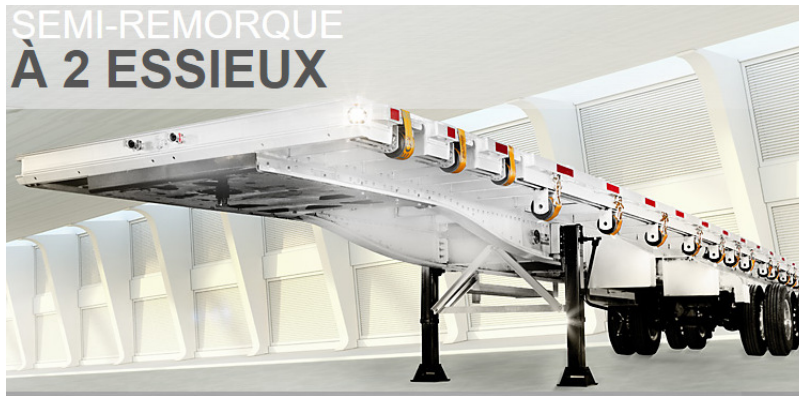


Figure A1.2 : Semi-remorque à 2 essieux : type poutre en I et plancher extrudé

Présentation de la remorque « Capacity » (à caisson)

Dans l'usine une remorque Capacity (à caisson) était en train d'être assemblée (figure A1.3). Il est à noter que la conception de cette remorque a été faite pour une automatisation des tâches et non pas pour un assemblage manuel comme c'était le cas lors de la visite.



Figure A1.3 : Remorque Capacity d'Alutrec

Les extrusions pour cette remorque sont transversales et mesurent environ 6 cm de hauteur et 23 cm de largeur (figure A1.4). Une étude sur une remorque avec extrusions longitudinales est en cours, mais elle demande des longueurs de soudures d'environ 15 mètres qui sont une contrainte pour l'instant trop importante pour l'entreprise. Les soudures MIG sont partiellement automatisées : des panneaux de 8 extrusions sont d'abord soudés avec l'aide d'un banc de soudage réduisant les défauts, puis les

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

panneaux sont assemblés entre eux à la main. Ce processus est long et sera accéléré largement dans la nouvelle usine.

L'utilisation du soudage par friction-malaxage (FSW) est envisagée, mais représente un investissement très important avec ses propres contraintes. Il n'est toutefois pas exclu que le FSW soit utilisé pour cette production dans les années à venir.



Figure A1.4 : Extrusions d'aluminium de la remorque Capacity soudage MIG

Le caisson a aujourd'hui une courbure préétablie. Le pliage de ses éléments constitutifs est sous-traité à une entreprise tierce. On voit ci-dessous (figure A1.5) la partie centrale du caisson qui mesure environ 80 cm de profondeur et qui est soudé au MIG sur le plancher. La forme du caisson devrait être encore optimisée pour répartir et uniformiser au maximum les contraintes sous les cas de chargement limites.



Figure A1.5 : Vue du caisson de la remorque Capacity

La partie avant du caisson dit « gooseneck » est celle qui a demandé le plus d'étude car des problèmes de fissuration sont apparus (fissure entre deux cordons de soudures parallèles). L'ajout de rivets a permis de régler ce problème. Deux raidisseurs se

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

trouvent dans cette partie sinon le reste du caisson est parfaitement vide (voir figure A1.6).



Figure A1.6 : Vue du « gooseneck » de la remorque capacity

La partie avant de la remorque est constituée d'extrusions plus hautes et renforcées par une plaque d'acier (figure A1.7). Une membrane polymérique résistante à changer tous les 10 ans est installée entre les deux matériaux pour éviter la corrosion galvanique. Cette partie est celle qui constitue l'attache avec le dispositif tractant et ne rentre donc pas en compte de cette manière dans le domaine des ponts. Il faut toutefois retenir que l'assemblage d'extrusions de différentes tailles par soudage MIG ne constitue pas un souci majeur.



Figure A1.7 : Vue du soudage entre des extrusions transversales et longitudinales de hauteurs différentes

Conclusion

Cette visite a permis d'appréhender la construction en usine d'un assemblage de dimension similaire à un pont d'une portée d'environ 15 mètres fait à partir d'extrusions d'aluminium et d'un caisson en aluminium. La réussite de la compagnie Alutrec et de sa remorque Capacity est de bon augure pour le développement d'un pont de même type.

Nous avons noté également que l'utilisation de rivets avec protection contre la corrosion galvanique, est pour Alutrec une solution viable pour l'assemblage de composants en aluminium entre eux. D'après le propriétaire de l'entreprise, aucun problème de fatigue, de corrosion ou de fissuration n'a été rapporté après 19 ans.

Nous avons aussi pu constater qu'il est possible de fabriquer des remorques tout aluminium hormis certaines parties (essieux et système de soutien lorsque la remorque n'est pas attachée au camion). Il s'agit d'avoir des gens qualifiés pour faire un travail de qualité surtout au niveau des soudures.

Dans ce dernier cas, Alutrec a fabriqué un banc de soudage « automatisé » des extrusions entre elles, limitant ainsi l'intervention humaine.

Alutrec envisage le soudage par friction malaxage, mais le coût d'investissement initial étant élevé, cette solution est remise à plus tard. Ils ont déjà testé de type d'assemblage avec le CNRC.

Il est aussi possible de mettre en place un système automatisé de production et de contrôle de qualité. L'usine de Laurier Station utilisera des robots et des stations de travail qui réduiront énormément le temps d'assemblage. Selon le propriétaire, c'est un élément clé pour la réduction de coûts de ses remorques.

ANNEXE 2 Démonstration du calcul des fractions de charge de camion en flexion par ratio de charges

On voudrait démontrer ici que la fraction de charge de camion de la poutre i en flexion vaut :

$$F_{Ti} = \frac{M_{fi}}{M_{fmax}} = \frac{(R_{i\ tot1} + R_{i\ tot2})}{R_{tot}} \quad (6)$$

avec :

F_{Ti} : la fraction de charge de camion en flexion de la poutre I ;

$R_{i\ tot1} + R_{i\ tot2}$: la somme des réactions aux appuis de la poutre I ;

R_{tot} : la charge totale appliquée sur le pont ;

M_{fi} : le moment fléchissant maximal de la poutre I ;

M_{fmax} : le moment fléchissant maximal appliqué sur le pont.

Puisqu'il y a plusieurs poutres on ne peut pas appliquer la théorie des poutres car les charges se répartissent dans deux directions. On doit donc appliquer la méthode du grillage ou celle des éléments finis. On montrera ici cinq exemples d'un pont factice où le platelage est une dalle d'aluminium de 20 mm de haut. On choisit un maillage pour le tablier régulier avec des éléments de 10×10 mm de côté. On peut donc pour chaque travée calculer le moment en suivant la formule :

$$M_f = \sum_e \sigma_e \times y_e \quad (7)$$

avec :

M_f : le moment fléchissant ;

y_e : la distance du centre de gravité de l'élément e à l'axe neutre de la section ;

σ_e : la contrainte normale à la section de l'élément e.

Exemple 1

Dans un premier temps, on place une charge de 5000 N sur une poutre de 2000 mm de portée faisant partie d'un tablier de pont à 4 poutres comme sur la figure A2.1. La charge est placée à 510 mm d'un des bords comme sur la figure A2.3. On donne les dimensions de la section à la figure A2.2. Le maillage est fait de telle sorte que chaque élément soit un cube de 10 mm de large. Pour ce qui concerne les appuis, ils sont au

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

nombre de huit (quatre poutres possédant chacune deux extrémités). Sept d'entre eux bloquent uniquement le déplacement vertical, et le huitième bloquent les trois possibilités de déplacement. On obtient ainsi un système isostatique

Le platelage est plein et en aluminium. Ceci est irréaliste, mais permet de réaliser facilement les calculs à la main et permet l'intégration des contraintes sur une section grâce à un tableur.

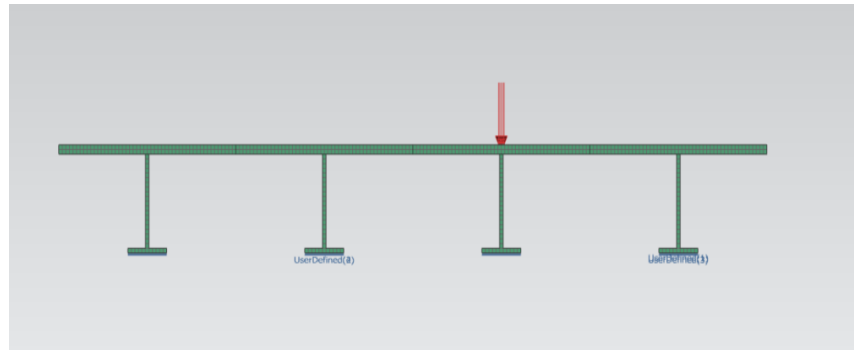


Figure A2.1 Vue de côté du tablier tout aluminium de 2000 mm de portée avec application de la charge au droit de la poutre 3

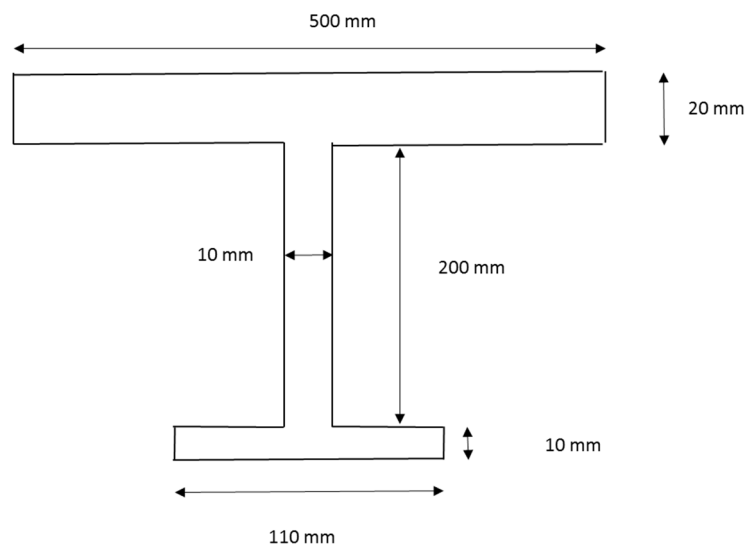


Figure A2.2 Plan de la section du tablier tout aluminium de l'exemple 1

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER



Figure A2.3 Vue du dessus du tablier tout aluminium de 2000 mm de portée avec application de la charge au droit de la poutre 3

On compare ici les résultats du ratio des réactions aux appuis et du ratio des moments de flexion dans chaque section de tablier.

Pour calculer le moment dans une section de tablier, on part des contraintes axiales (contraintes XX ici). Pour chaque élément, on multiplie la valeur de la contrainte par l'aire de l'élément (100 mm^2 ici), ce qui donne une force. On multiplie la force par la distance à l'axe neutre (qui est à 185,15 mm du dessous de la poutre ici). On obtient alors le moment engendré par l'élément sur la section. Pour obtenir le moment de flexion global dans la section, on somme les moments de tous les éléments de la section de tablier.

Pour obtenir le moment global, on somme les moments de flexion dans les différentes sections de tablier. Pour ce qui a trait aux réactions d'appuis, on somme les réactions des deux appuis pour chaque poutre afin d'obtenir la réaction totale. Pour la section sous la charge (moment de flexion maximal), on obtient les résultats du tableau A2.1.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Tableau A2.1 Comparaison des ratios des moments et des ratios des réactions d'appuis pour l'exemple 1

Numéro Poutre	1	2	3	4	Somme
Moment fléchissant (Nm)	-28,2	179,3	1596,3	124,9	1872,3
Ratio Moment	-1,5%	9,6%	85,3%	6,7%	1
Réaction appuis (N)	-123,7	538,6	4289,7	295,4	5000,03
Ratio Appuis	-2,5%	10,8%	85,8%	5,9%	1
Différence entre les ratios	1,0%	-1,2%	-0,5%	0,8%	

On remarque que la différence entre les ratios de moment et les ratios des réactions aux appuis est inférieure à 2%. On peut considérer pour cet exemple que les fractions de charge de camion en flexion peuvent être données par les ratios des réactions d'appuis avec la charge totale (c'est-à-dire la somme des réactions d'appuis).

Exemple 2

Dans un second exemple, on reprend le tablier de l'exemple 1, mais on excentre la charge de la poutre comme sur la figure A2.4, et on la place à un tiers de la portée comme sur la figure A2.5.

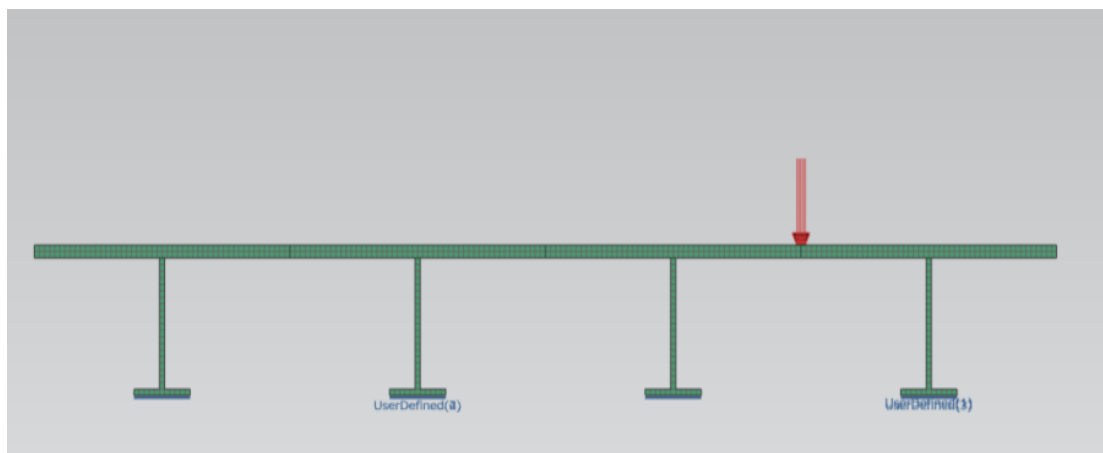


Figure A2.4 Vue de côté du tablier tout aluminium de l'exemple 1 avec application de la charge excentrée

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

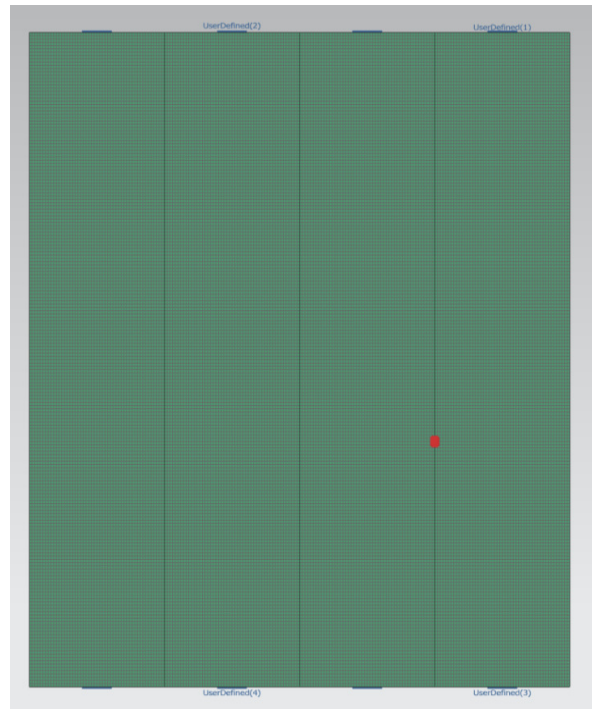


Figure A2.5 Vue du dessus du tablier tout aluminium de l'exemple 1 avec application de la charge excentrée

On réitère le même procédé que l'exemple précédent. Les résultats sont donnés dans le tableau A2.2.

Tableau A2.2 Comparaison des ratios des moments et des ratios des réactions d'appuis pour l'exemple 2

Numéro Poutre	1	2	3	4	Somme
Moment fléchissant (Nm)	- 19,67	-33,4	1274,8	1016,45	2238,2
Ratio Moment	- 0,9%	-1,5%	57,0%	45,4%	1
Réaction appuis (N)	-21,5	-219,8	2997,0	2244,3	5000
Ratio Appuis	- 0,4%	-4,4%	59,9%	44,9%	1
Différence entre les ratios	- 0,4%	2,9%	-3,0%	0,5%	

Dans cet exemple aussi, les valeurs entre les ratios de moment et les ratios aux appuis sont très proche (la différence est inférieure à 3%).

Exemple 3

Dans cet exemple, la portée est de 5 mètres. On a placé douze charges de 2000 N chacune. Les charges sont espacées de 1000 mm longitudinalement et de 300 mm transversalement (arbitraire) et symétriques par rapport à la mi-portée. Le placement transversal global est lui aussi arbitraire (figure A2.6).

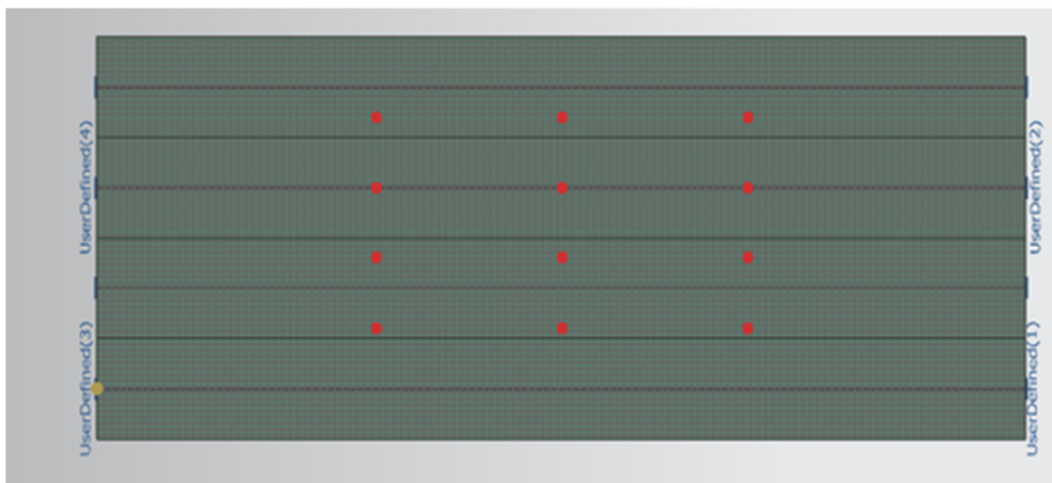


Figure A2.6 Vue du dessus du tablier tout aluminium de 5000 mm de portée avec 12 charges de 2000 N

On réitère le même procédé que l'exemple précédent. Les résultats sont donnés dans le tableau A2.3.

Tableau A2.3 Comparaison des ratios des moments et des ratios des réactions d'appuis pour l'exemple 3

Numéro Poutre	1	2	3	4	Somme
Moment fléchissant (Nm)	-5332	-6809	-6238	-3489	-21867
Ratio Moment	24,4%	31,1%	28,5%	16,0%	1
Réaction appuis (N)	5685,	7723,80	7072,1	3518,2	24000,0
Ratio Appuis	23,7%	32,2%	29,5%	14,7%	1
Différence entre les ratios	0,7%	-1,0%	-0,9%	1,3%	

Les valeurs entre les ratios de moment et les ratios aux appuis sont encore une fois très proche (la différence est inférieure à 1,3%). La multiplicité des charges ne semble pas avoir d'impact sur la différence entre les ratios des appuis et des moments.

Exemple 4

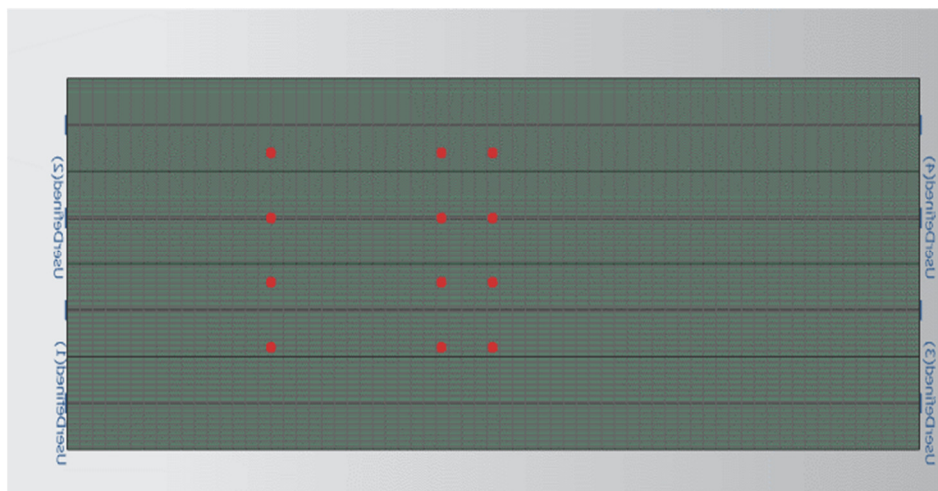


Figure A2.7 Vue du dessus du tablier tout aluminium de 5000 mm de portée avec 4 charges de 500 N et 8 charges de 3000 N

Pour le pont de l'exemple 3 on applique trois rangées de 4 charges. Les charges les plus à gauche de la figure A2.7. sont à mi-portée et ont une valeur de 500 N chacune. Les huit autres charges ont une valeur de 3000 N. Les placements longitudinal et transversal sont aléatoires. La section avec le moment maximal est celle sous les charges du milieu.

Les résultats sont donnés dans le tableau A2.4.

Tableau A2.4 Comparaison des ratios des moments et des ratios des réactions d'appuis pour l'exemple 4

Numéro Poutre	1	2	3	4	Somme
Moment fléchissant (Nm)	-3808	-7215	-7854	-5910	-24786,9
Ratio Moment	15,4%	29,1%	31,7%	23,8%	1
Réaction appuis (N)	3755,0	7717,0	8419,0	6100,0	25991,0
Ratio Appuis	14,4%	29,7%	32,4%	23,5%	1
Différence entre les ratios	0,9%	-0,6%	-0,7%	0,4%	

Les valeurs entre les ratios de moment et les ratios aux appuis sont semblables, l'écart maximum entre le ratio maximal est de 0,9%. Pour un cas quelconque comme celui

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

présenté dans cette section, il y a bien une égalité entre les ratios des moments et des réactions aux appuis.

Exemple 5

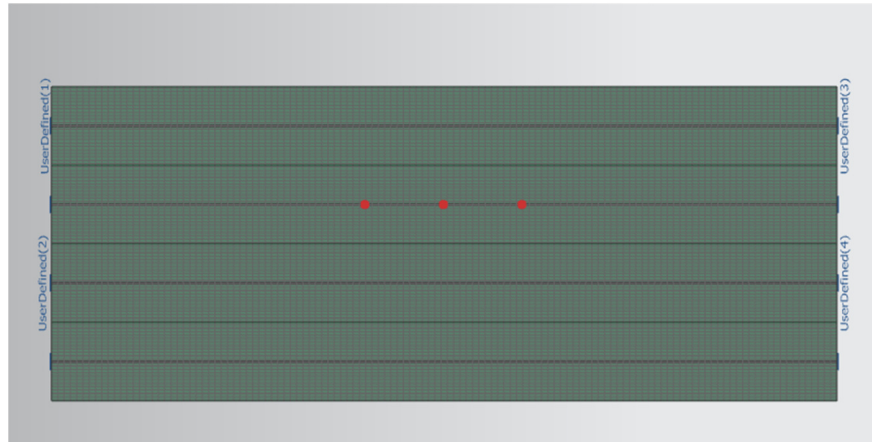


Figure A2.8 Vue du dessus du tablier tout aluminium de 5000 mm de portée avec 3 charges de 5000 N

Pour le pont de l'exemple 3, on a appliqué trois charges de 5000 N chacune espacée de 500 mm et positionnées au droit de la troisième poutre (figure A2.8).

Pour cet exemple, on obtient les résultats présentés dans le tableau A2.5.

Tableau A2.5 Comparaison des ratios des moments et des ratios des réactions d'appuis pour l'exemple 5

Numéro Poutre	1	2	3	4	Somme
Moment fléchissant (Nm)	-546	-3805	-7344	-4478	-16173,5
Ratio Moment	3,4%	23,5%	45,4%	27,7%	1
Réaction appuis (N)	53,6	4687,9	5482,4	4776,1	15000,00
Ratio Appuis	0,4%	31,3%	36,5%	31,8%	1
Différence entre les ratios	3,0%	-7,7%	8,9%	-4,2%	

Contrairement aux quatre exemples précédents, les écarts entre les valeurs des ratios des réactions aux appuis et des moments fléchissants atteignent des valeurs de 8,9%.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

Jusqu'à présent, l'écart maximal entre les deux méthodes était de 3%. Le modèle testé est pourtant le même que pour les cas précédents.

La différence entre les deux méthodes de calcul est toutefois inférieure à 10%.

Conclusion

Ces différents exemples ne constituent pas une preuve que les ratios des réactions d'appuis d'une poutre par rapport à la somme totale des réactions d'appuis sont les mêmes que ceux du moment fléchissant maximal d'une travée par rapport à la somme des moments maximaux.

Toutefois, dans les quatre premiers exemples présentés dans cette annexe, les valeurs des ratios calculés avec les deux différentes méthodes sont les mêmes avec une marge d'erreur de 3%. Dans le dernier exemple, l'écart est plus important (8,9%), mais reste inférieur à 10%.

Néanmoins, le cas avec un camion CL-625 sur un pont de 15 mètres de portée se rapproche du cas de l'exemple 4 où les écarts des résultats des deux méthodes sont inférieurs à 1%. On considère donc que la méthode employée dans le chapitre 5 avec les réactions d'appuis est correcte, mais cela devra être vérifié lors d'une étude plus approfondie sur les fractions de charge de camion pour les ponts avec platelage d'aluminium.

ANNEXE 3 ANALYSE DES COÛTS POUR LA PRODUCTION DES PLATELAGES EN ALUMINIUM PAR VIAMI INTERNATIONAL INC. ET THE TECHNOLOGY STRATEGIES GROUP EN 2013

On présente ici le paragraphe chiffrant le coût d'un platelage en aluminium par Viami International inc. et The Technology Strategies Group en 2013.

Coûts des tabliers de pont [Section 5.3]

Les coûts des tabliers de pont dépendent de nombreux facteurs, notamment le type, la taille et la conception exacte du tablier, la distance des fournisseurs et du site final, l'emplacement et les coûts connexes de la main-d'oeuvre, de l'énergie, etc. du fabricant, ainsi que le nombre de tabliers de pont produit à la fois ou durant une certaine période. Le prix d'un tablier de pont donné par un sous-traitant de Sapa était d'environ 139 \$ à 149 \$ le pied carré hors du site de fabrication pour le système de 8 pouces. Ce prix comprend le tablier fabriqué en atelier. Notre analyse du système de tablier de pont comprend le coût du métal, les profilés, le coût de fabrication du tablier, le coût du revêtement antiusure/anticorrosion, ainsi que le coût des joints de dilatation et des dispositifs de drainage. Notre analyse des coûts associés à la production d'un tablier de pont est présentée au tableau 3. Elle révèle qu'il devrait être possible d'arriver à la même gamme de prix que pour les tabliers de pont en acier orthotropes (Orthotropic Steel Decks - OSD).

Tableau 3 : Coûts pour la production des tabliers de pont en aluminium

Poste de dépense	Coût (\$ par pied carré de tablier)	Source
Prix d'aluminium (MWT)	14.42	Platts Metals Week
Prime de billet/alliage	2.38	Platts Metals Week
Coût d'extrusion	19.60	Estimation de RTA, Viami/TSG
Revêtement antiusure	10.00 (7.00 – 12.00)	Sout-traitant de SAPA
Fabrication (FSW)	16.00 (10.00 – 20.00)	ESAB
Drainage, rivets, boulons, joints de dilatation	10.00 (8.00 – 15.00)	Estimation de Viami/TSG
Ingénierie, transport, outillage, etc.	20.00 (15.00 – 25.00)	Estimation de Viami/TSG
Frais généraux et profit	25.00 (10.00 – 35.00)	Viami/TSG
Coût livré au chantier	117.40 (86.40 – 136.40)	

Note : Tous les coûts sont en dollars canadiens en supposant la parité avec le dollar américain. Le coût d'installation n'est pas compris.

NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE EN CHANTIER

À plus long terme, nous pouvons supposer que ce prix changera et qu'il diminuera vraisemblablement, en fonction de nombreux facteurs actuellement difficiles à prévoir ou à estimer :

- Le prix de l'aluminium varie constamment et montre une volatilité plus élevée que l'acier et, surtout, que le béton. Comme une proportion considérable de producteurs d'aluminium ne réalisent pas de profit au prix actuel, on peut supposer que ce prix augmentera, c'est-à-dire que le prix de 14,42 \$ le pied carré de pont passera probablement à 18-20 \$ le pied carré (ou plus) à long terme.
- La prime des billettes d'extrusion dépendra de l'alliage utilisé, de la possibilité d'intégrer un contenu de recyclage, de la proximité du centre de coulée pour la société d'extrusion, du volume acheté d'un alliage et d'un diamètre spécifique, etc. Comme il s'agit d'une faible portion de toute façon, cela n'aura probablement pas beaucoup d'impact sur le prix total, et on ne peut prévoir aucun changement significatif de cette prime à plus long terme.
- Coût d'extrusion : Il pourrait certainement diminuer une fois que le volume augmentera. Encore une fois, le prix dépendra de l'alliage sélectionné, de la forme exacte, de la distance du fabricant, etc. La réduction potentielle pourrait compenser l'augmentation à long terme du prix de base du métal.
- Revêtement et fabrication : Avec une expérience accrue, on peut s'attendre à une réduction, qui dépendra du volume, de la configuration exacte, du lieu, etc.
- Ingénierie, coût de transport, outillage : Il s'agit de la principale dépense et elle sera très influencée par le volume.
- Frais généraux et profit : Ils baisseront (en pourcentage et en valeur absolue) avec l'augmentation du volume et du nombre de projets et de fournisseurs.

Par conséquent, il semble approprié d'évaluer que le prix à long terme baissera à environ 100 \$ le pied carré, mais la valeur exacte dépendra de tous les paramètres décrits ci-dessus. Le principal moteur de cette réduction du prix sera la croissance du volume du marché et la cohérence des exigences liées aux produits.

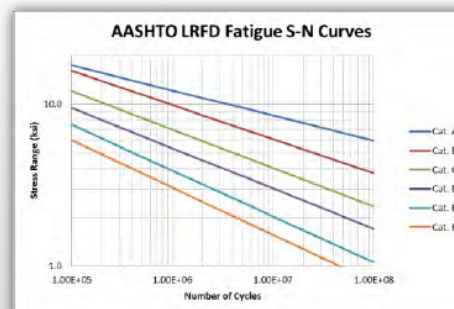
ANNEXE 4 FATIGUE POUR LE PLATELAGE ALUMABRIDGE GEN I

On présente ici les diapositives concernant le dimensionnement en fatigue du platelage AlumaBridge GEN I présenté en annexe du rapport : Chantier Infrastructures et Ouvrages d'art Mission technique sur les ponts en aluminium par Denis Beaulieu et Jacques Internoscia daté du 28 et 29 octobre 2015 (Beaulieu & Internoscia, 2015) et tiré de la présentation de George Patton sur le développement et la recherche sur un platelage orthotrope en aluminium de 5 pouces de hauteur.

Aluminum Orthotropic Deck Analysis

- Design for Infinite Fatigue Life
- Fatigue Sensitive Details
 - Base Metal: Cat. 'A'
 - FSW Joint (Stress Normal to Weld Axis): Cat. 'C'
 - Consistent with CJP Welds Ground Smooth
 - Conservative Approach Based on MIG Welding
 - Testing - FSW Joints → Greater Fatigue Resistance than Base Metal
- Conservative Design
 - Design Nominal Fatigue Resistance = $\frac{1}{2}$ x Constant Amplitude Fatigue Threshold

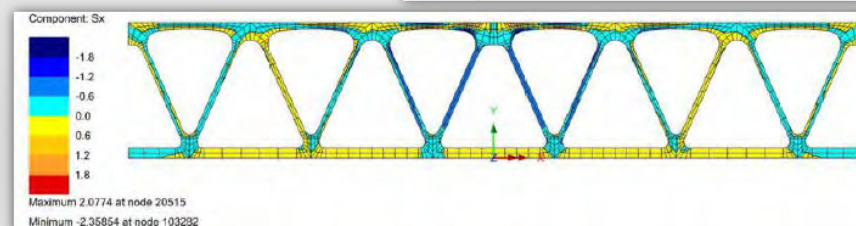
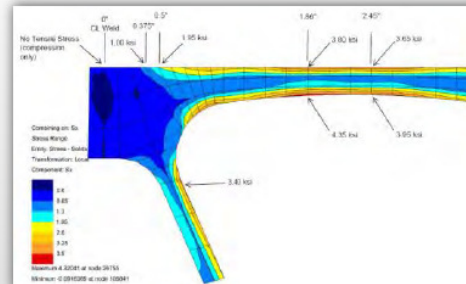
$$(\Delta F)_N = \frac{1}{2} (\Delta F)_{TH}$$



SYSTEM 3 - FATIGUE LIFE VALUES		
Variable	Category 'A'	Category 'C'
$(\Delta F)_{TH}$	9.5 ksi	4.0 ksi
Design $(\Delta F)_N = \frac{1}{2} (\Delta F)_{TH}$	4.75 ksi	2.0 ksi
$Y (\Delta F) \leq (\Delta F)_N$	4.35 ksi	1.95 ksi

Aluminum Orthotropic Deck Analysis

- System 3 – Fatigue
- 3D Solid Element FEA
- Stress Range from Moving Wheel Patch



ANNEXE 5 DÉTAIL DU COÛT DU BÉTON POUR LES TABLIERS À DALLE SUR POUTRE

15 | Ouvrages d'art

Les armatures additionnelles ajoutées lorsque les barres existantes à conserver sont amincies par la corrosion, ou pour relier une nouvelle dalle aux poutres, sont payées au prix unitaire des armatures.

Les treillis d'acier ne font l'objet d'aucun article au bordereau. Tous les frais engagés par l'entrepreneur pour la réalisation de ces ouvrages, y compris notamment les coûts de fourniture des treillis, de la protection par galvanisation lorsque cela est stipulé aux plans et devis, du fixage des armatures ainsi que de la mise en œuvre, sont inclus dans le prix unitaire des ouvrages pour lesquels des treillis sont requis.

Les jonctions mécaniques sont payées à l'unité. Le prix comprend le filetage des barres d'armature, la galvanisation, si requis, la mise en œuvre ainsi que toute dépense incidente.

15.4.4.4 Ancrages

À moins que les ancrages ne fassent l'objet d'un article au bordereau, tous les frais engagés par l'entrepreneur pour la réalisation de ces ouvrages, y compris notamment les coûts de la fourniture des tiges métalliques et du coulis cimentaire ou du produit d'ancrage chimique, du forage des trous, de la mise en œuvre, ainsi que de la réalisation des essais sur ancrages témoins lorsque ceux-ci sont spécifiés aux plans et devis, sont inclus dans le prix unitaire du béton des ouvrages pour lesquels des ancrages sont requis.

Si les ancrages font l'objet d'un article particulier au bordereau, ils sont payés à l'unité. Cet article exclut cependant les ancrages utilisés en remplacement des tirants servant à maintenir en place les coffrages et qui sont requis pour la mise en place du béton sur du béton existant; ces ancrages ne font l'objet d'aucun article au bordereau et tous les frais engagés par l'entrepreneur pour la réalisation de ces ouvrages sont inclus dans le prix des coffrages. Le prix couvre notamment la fourniture des tiges métalliques et du coulis cimentaire ou du produit d'ancrage chimique, le forage des trous, la mise en œuvre ainsi que la réalisation des essais sur ancrages témoins lorsque ceux-ci sont spécifiés aux plans et devis, et il inclut toute dépense incidente.

15.4.4.5 Béton

À moins d'une indication contraire au bordereau, le béton est payé au mètre cube et les quantités sont calculées suivant les dimensions

théoriques, excluant le volume intérieur des pièces évidées. Par contre, dans le cas d'une dalle sur poutres, la quantité de béton de la dalle est augmentée de la quantité de béton nécessaire à la construction des goussets. Le prix couvre notamment :

- la fourniture des fiches descriptives des mélanges, la fourniture des matériaux : les coffrages, s'ils ne font pas l'objet d'un article particulier au bordereau, les chantrains, les drains d'une culée galerie ainsi que la préparation des surfaces à conserver, la mise en œuvre, la cure du béton, les joints de construction, les joints d'articulation, les joints de contrôle, la correction, le nettoyage des surfaces et la finition du béton;
 - la réalisation de l'essai de convenue lorsque requis, y compris le coût de la réalisation des essais de caractérisation du béton. Si l'essai de convenue est réalisé en dehors de l'ouvrage à construire, le prix du béton est fixé à 900\$ du mètre cube et ce prix inclut le coût de la réalisation des essais de caractérisation du béton ainsi que toute dépense incidente. Un seul essai de convenue est payé par type de béton et seulement lorsque les résultats de l'essai sont conformes. Toute reprise est aux frais de l'entrepreneur;
 - lorsque requis, la réalisation des essais sur éprouvettes témoins;
 - la fourniture du géotextile, des drains, des plaques perforées et des planches asphaltiques de la dalle de transition;
 - la fourniture des plaques en acier ainsi que le néoprène des butoirs;
 - la fourniture du géotextile, de la garniture compressible, de la membrane autocollante pour joints d'un joint de dalle sur culée;
 - la fourniture des drains d'interface;
 - la fourniture ou le rallongement des barbacanes;
 - la fourniture de la membrane autocollante pour joints pour étancher les fissures sur les surfaces de béton à remblayer;
- ainsi que la mise en œuvre, et il inclut toute dépense incidente.

Si le béton des diaphragmes ne fait pas l'objet d'un article particulier au bordereau, ce béton est payé selon le prix du béton de dalle du bordereau.

**NOUVEAU CONCEPT DE TABLIER DE PONT TOUT ALUMINIUM A PORTEE SIMPLE ASSEMBLABLE
EN CHANTIER**

**ANNEXE 6 BROCHURE TECHNIQUE DES BOULONS « AVEUGLES »
HOLLO-BOLT DE LA COMPAGNIE LINDAPTER**

Type HB - Hollo-Bolt®

Code produit	Boulon	Epaisseur de serrage W mm	Couche extérieure ¹⁾ min t mm	Manchon		Collier			Couple Nm	Profil rectangulaire creux		Charges utiles ²⁾ (coefficient de sécurité 5:1)	
				Longueur L mm	Diamètre extérieur d mm	Hauteur H mm	Ø D mm	A/F mm		Matériau	Dimensions mm	Traction kN	Monocisaillé kN
HB08-1	M8x50	3 - 22	-	30							140x140x5,0	4,0	
HB08-2	M8x70	22 - 41	-	49	13,75	5	22	19	23	S275	150x150x6,3	4,0	5,0
HB08-3	M8x90	41 - 60	-	68							200x200x10,0	4,0	
HB10-1	M10x55	3 - 22	-	30							100x100x6,3	7,0	
HB10-2	M10x75	22 - 41	-	48	17,75	6	29	24	45	S275	140x140x5,0	6,0	
HB10-3	M10x90	41 - 60	-	67							140x140x8,0	8,5	10,0
											150x150x6,3	8,0	
											180x180x6,0	7,0	
											200x200x10,0	8,0	
HB12-1	M12x60	3 - 25	-	35							140x140x5,0	6,5	
HB12-2	M12x90	25 - 47	-	57	19,75	7	32	30	80	S275	140x140x8,0	10,5	
HB12-3	M12x110	47 - 69	-	79							150x150x6,3	10,0	15,0
											180x180x8,0	10,0	
											200x200x10,0	10,5	
HB16-1	M16x75	12 - 29	8	41,5							100x100x6,3	13,5	
HB16-2	M16x100	29 - 50	8	63	25,75	8	38	36	190	S275	100x100x10,0	18,5	
HB16-3	M16x120	50 - 71	8	84							140x140x5,0	8,0	
											140x140x6,3	15,0	
											140x140x8,0	20,0	30,0
											140x140x12,5	21,0	
											150x150x6,3	11,5	
											180x180x8,0	17,0	
											200x200x10,0	15,0	
HB20-1	M20x90	12 - 34	8	50							140x140x6,3	16,0	
HB20-2	M20x120	34 - 60	8	76	32,75	10	51	46	300	S275	140x140x8,0	23,0	
HB20-3	M20x150	60 - 86	8	102							140x140x10,0	25,0	
											140x140x12,5	35,0	40,0
											150x150x6,3	12,5	
											180x180x8,0	18,0	
											200x200x10,0	19,0	