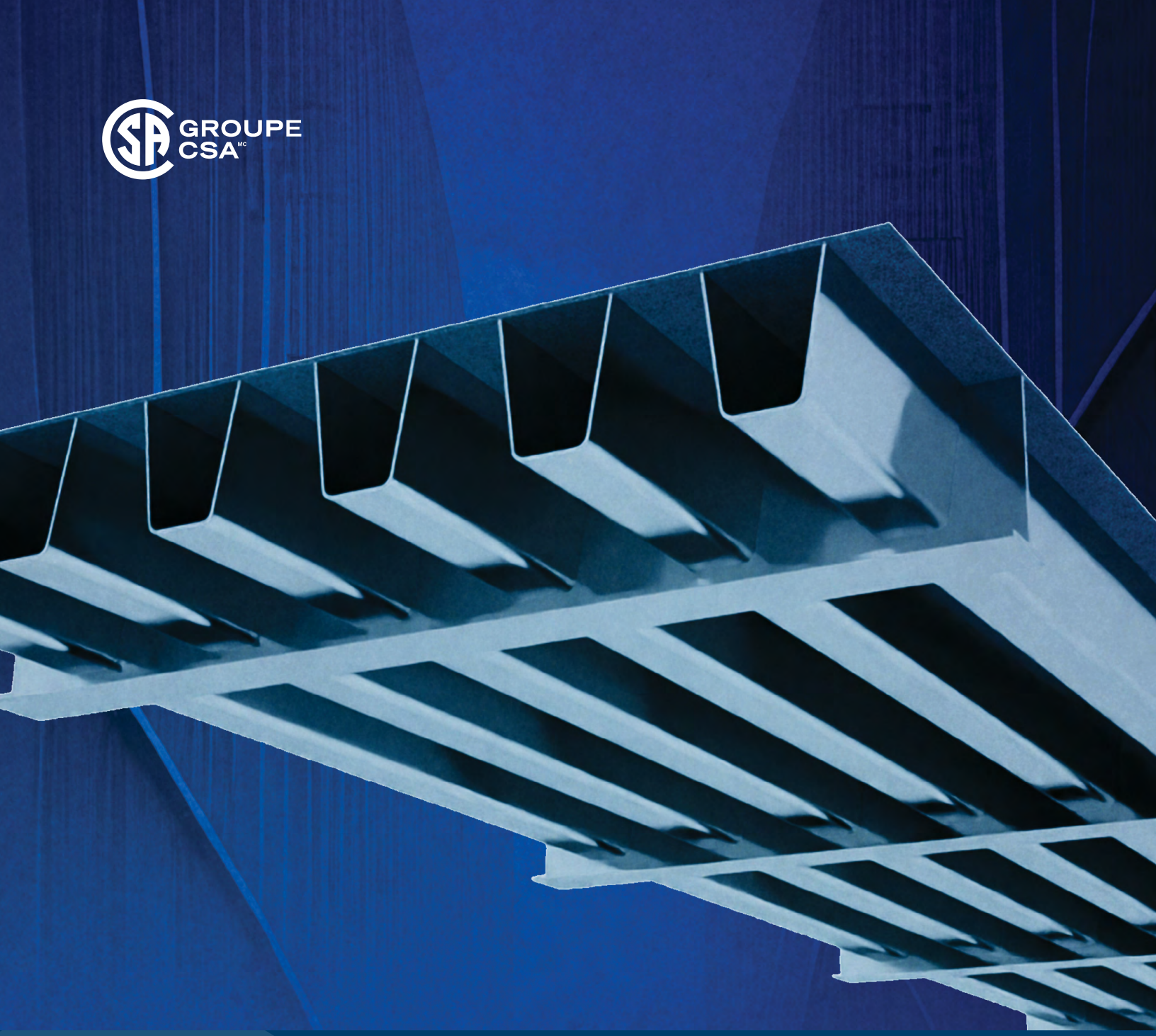


RECHERCHE SUR LES NORMES

Conception de tabliers de pont orthotropes en acier

novembre 2023

Auteurs

Abdullah Abdelbadie, Université de Waterloo

Scott Walbridge, Ph. D., Ing. (Alberta), Université de Waterloo

Spencer Arbuckle, M. Ing. Université de Waterloo

Matthew Sjaarda, Ph. D., Ing., Université de Waterloo

Comité consultatif du projet

Bruno Massicotte, Ph. D., Ing., Polytechnique Montréal

Carlos Villate, Ing., Morrison Hershfield

Chris Blankson, M. Sc., C. Eng., Ing., AECOM

Éric Lévesque, Ing., M. Sc., Canam-ponts

Gilbert Grondin, Ph. D., AECOM

Hellen Christodoulou, Ph. D., Ing., B.C.L., LL. B., MBA, CISC-ICCA

Jack Tarrell, M. Ing., Ing., C. Eng. MICE, Kiewit Engineering Group

Robbie Fraser, M. Sc., Ing., Harbourside Engineering Consultants

Sheldon Hart, Ing., Cherubini Bridges and Structures

Sylvie Boulanger, Ing., Ph. D., MTB Consulting (présidente du comité)

Jennifer Teague, Ph. D., Groupe CSA

Mark Braiter, B. Ing., MBA, Groupe CSA (chargé de projet)

Remerciements

Les auteurs de ce rapport aimeraient remercier le programme de bourses de Mitacs pour le soutien financier accordé à cette recherche, ainsi que le comité consultatif du projet et les autres membres des sous-comités techniques (SCT) 5 et 10 de CSA S6, qui ont contribué à cette étude en fournissant des conseils. Nous remercions également les ministères des Transports de l'Ontario et de l'Alberta pour les données de l'enquête sur le poids des camions et des essieux qu'ils nous ont communiquées.

Soutien financier

Le soutien financier pour la recherche présentée dans ce rapport a été fourni en partie par le programme de bourses de Mitacs.

Clause de non-responsabilité
Cette étude a été réalisée par l'Université de Waterloo et est la propriété de l'Association canadienne de normalisation et de l'Université de Waterloo. Elle vise à fournir des renseignements de nature générale sur le sujet traité. Les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs. L'Université de Waterloo et l'Association canadienne de normalisation ne sauraient être tenues responsables des pertes ou des dommages qui pourraient résulter de la confiance accordée au contenu de cette publication ou de son utilisation.

Table des matières

Sommaire 5

1 Introduction 7

2 Analyse documentaire 8

2.1 Contexte 8

2.2 Connaissances générales sur la conception de TOA 8

2.3 Rendement de la couche de roulement 10

2.4 Performance à la fatigue des joints de TOA soudés entre la nervure et le tablier 10

2.4.1 Géométrie de la soudure 11

2.4.2 Géométrie du tablier 12

2.4.3 Position transversale du chargement 13

2.4.4 Méthodes d'analyse de la fatigue 13

2.4.5 Mécanique linéaire élastique de la rupture 15

3 Sondage sur l'expérience professionnelle 15

3.1 Contexte 15

3.2 Questions du sondage 15

3.3 Réponses au sondage 16

3.4 Résumé des résultats du sondage 19

4 Méthodes d'analyse structurelle 19

4.1 Analyse de déflexion 19

4.2 Analyse en 2D des lignes d'influence 20

4.3 Analyse par éléments finis en 3D 21

4.4 Analyse en fonction de différentes portées 23

4.5 Analyse de fatigue 23

4.5.1 Analyse de la contrainte au point chaud 23

4.5.2 Cas de chargement 24

4.5.3 Conditions limites 25

4.5.4 Étude du chargement transversal 27

5 Résultats et discussion 27
5.1 Résultats de l'analyse de déflexion 27
5.1.1 Analyse par éléments finis en 3D 28
5.1.2 Analyse en 2D des lignes d'influence 28
5.2 Résultats de l'analyse de fatigue 28
5.2.1 Comparaison des plages de contraintes pour les modèles canadien et américain 28
5.2.2 Étude de chargement transversal 30
6 Analyse des données relatives au poids brut du véhicule et au poids de l'essieu tandem 31
7 Conclusions 33
8 Recommandations pour la norme CSA S6:25 35
9 Besoins futurs en matière de recherche 36
Références 38
Annexe 1 – Organigramme proposé pour la conception de TOA 42

Sommaire

Les tabliers de pont orthotropes sont des systèmes de tabliers en acier efficaces et légers, généralement fabriqués en soudant des « nervures » sur la face inférieure d'une plaque d'acier plate. Les avantages potentiels des systèmes de tabliers orthotropes en acier (TOA) sont convaincants. Par exemple, au début des années 1990, le tablier en béton du pont Champlain de Montréal, qui se détériorait, a été remplacé par un TOA dont le poids était inférieur de 25 % à celui du tablier d'origine.

Lors du dernier cycle de révision du code (2019), les spécifications relatives à la conception de tabliers de pont orthotropes de la norme CSA S6:19, *Code canadien de conception des ponts routiers*, ont été remplacées par des références à la norme *LRFD Bridge Design Specifications* de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) pour tenir compte de l'état actuel des connaissances et répondre aux besoins des dispositions de la norme CSA S6 jusqu'à ce que des lignes directrices plus spécifiques au Canada puissent être élaborées.

Par conséquent, l'article 10.16 de la norme CSA S6:19 exige que la conception des TOA réponde aux exigences de l'article 9.8.3 des spécifications de l'AASHTO, tout en utilisant les charges et les coefficients de la norme CSA S6:19 pour l'état limite en service, l'état limite de fatigue et l'état limite ultime. En raison des différences entre les coefficients et les charges appliqués, dans certains cas, l'utilisation de cette approche n'est pas seulement difficile, mais peut ne pas être appropriée du point de vue de la sécurité structurelle ou du point de vue économique. Par exemple, pour la conception vis-à-vis de la fatigue, il n'est pas évident de savoir lors de l'analyse quand passer des spécifications de l'AASHTO à celles de l'Association canadienne de normalisation (CSA) pour tenir compte des différences dans le trafic routier canadien. De même, l'approche actuelle peut pénaliser de manière excessive les ponts canadiens parce qu'elle exige l'utilisation des limites de déflexion de l'AASHTO en conjonction avec le modèle de camion canadien qui est plus lourd. Ces questions soulèvent des préoccupations qui peuvent décourager les concepteurs au Canada d'utiliser des solutions de tablier orthotrope pour les nouveaux projets.

Ce rapport résume les résultats d'une étude qui a examiné ces questions et présente des recommandations de révision de la norme CSA S6 pour le cycle de codes de 2025. Les principaux résultats de cette recherche comprennent une analyse documentaire, une enquête auprès de l'industrie, l'application des spécifications existantes en termes de conception à un échantillon de système de tablier, une brève étude des données canadiennes sur le poids des camions dans deux provinces ainsi que des recommandations sur les dispositions révisées à inclure dans l'édition 2025 de la norme CSA S6.

Les spécialistes de l'industrie, y compris les membres du comité consultatif du projet, qui ont une expérience préalable dans la conception de tabliers orthotropes, ont indiqué que les coûts de fabrication élevés, les problèmes à long terme de la couche de roulement et la fissuration de fatigue sont les facteurs les plus courants qui dissuadent les concepteurs d'envisager les TOA comme une alternative en termes de conception. De plus, les spécialistes ont identifié plusieurs difficultés rencontrées lors de la conception et de la construction de ces tabliers, notamment la garantie d'un niveau de pénétration adéquat pour des soudures sans soufflage entre la nervure et la plaque de tablier, la difficulté de choisir les dimensions appropriées du tablier, la confusion entre les spécifications respectives de la CSA et de l'AASHTO ainsi que le respect des limites de déflexion imposées. Les concepteurs et les constructeurs qui ont participé à l'enquête ont également partagé leurs conseils sur les meilleures pratiques pour concevoir des solutions de TOA optimales du point de vue du coût et du rendement.

Des analyses de déflexion et de fatigue ont également été réalisées dans le cadre de cette étude. Les analyses de déflexion d'un échantillon de système de tablier ont montré que la déflexion bidirectionnelle est supérieure d'environ 40 % à la déflexion unidirectionnelle. Ces analyses ont également confirmé que l'approche actuelle aboutit à des tabliers plus lourds pour les ponts canadiens, car elle nécessite l'application des limites de déflexion de l'AASHTO en conjonction avec le modèle de camion canadien plus lourd. Toutefois, cette exigence peut être justifiée, étant donné la présence apparente de camions plus lourds dans les données disponibles sur le trafic routier canadien. Une analyse de fatigue a été réalisée en utilisant la conception de niveau 3 de l'AASHTO pour le même échantillon de système de tablier. Elle a consisté à appliquer la méthode de la contrainte au point chaud à l'aide d'une analyse par éléments finis (EF). Une comparaison des contraintes au niveau de la bordure du cordon de soudure en appliquant les coefficients de charge et ceux relatifs aux modèles de camion de la CSA et de l'AASHTO a montré que le modèle de camion canadien ainsi que les coefficients de charge entraînent des contraintes qui sont supérieures de 55 % et de 35 % respectivement pour l'évaluation de la durée de vie en fatigue finie et infinie. Cet exercice a permis de mettre en lumière des cas où le concepteur ne sait pas toujours quand il doit utiliser les coefficients ou les spécifications de la norme CSA S6 ou de celles du code de l'AASHTO. Des lacunes dans la procédure de l'AASHTO, comme les instructions spécifiques sur la manière d'effectuer l'analyse des contraintes à l'encoche de la racine de la soudure entre la nervure et la plaque de tablier, ont également été identifiées, et des solutions ont été proposées dans la mesure du possible. Ce rapport se termine par des propositions de révision de la norme CSA S6 et par des recherches futures visant à améliorer cette norme au-delà de sa version pour 2025.



« Les TOA sont des systèmes de tabliers efficaces et légers qui se prêtent bien aux applications où la minimisation de la charge permanente (c.-à-d. le poids propre) est importante. »

1 Introduction

Les tabliers orthotropes en acier (TOA) sont des systèmes structurels constitués d'une fine plaque d'acier supportée par des poutres de plancher, généralement perpendiculaires au sens de la circulation, avec des nervures longitudinales, souvent en forme de U, qui rigidifient la plaque de tablier. En raison de leur configuration, les TOA présentent des propriétés différentes dans les directions transversale et longitudinale. Les TOA sont des systèmes de tabliers efficaces et légers qui se prêtent bien aux applications où la minimisation de la charge permanente (c.-à-d. le poids propre) est importante. En outre, s'ils sont bien conçus, ils nécessitent peu d'entretien pendant toute la durée de vie de la structure et sont donc appropriés pour les applications où l'accès au tablier est difficile. En tant que produit fabriqué en usine, les TOA sont susceptibles d'être produits avec un contrôle de qualité plus strict. Les configurations des tabliers comportent un minimum de joints, ce qui réduit le risque de fuites et l'exposition de la superstructure aux sels de déglaçage, offrant ainsi des avantages du point de vue de la durabilité. Enfin, les TOA permettent la modularisation et sont donc susceptibles de jouer un rôle important dans la construction rapide [1] et dans le remplacement du tablier avec un minimum de perturbations (p. ex., pendant les fermetures nocturnes) pour la réhabilitation des ponts existants.

L'article 10.16 de la norme CSA S6:19, *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* [2], exige que la conception des TOA réponde aux exigences de l'article 9.8.3 de la norme LRFD Bridge Design Specifications [3] de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), tout en utilisant les charges et les coefficients de la norme CSA S6:19 pour l'état limite en service, l'état limite de fatigue et l'état limite ultime. En raison des différences entre les coefficients et les charges appliqués, dans certains cas, l'utilisation de cette approche n'est pas seulement difficile, mais peut ne pas être appropriée du point de vue de la sécurité structurelle ou du point de vue économique. Par exemple, pour la conception vis-à-vis de la fatigue, il n'est pas évident de savoir lors de l'analyse quand passer des spécifications de l'AASHTO à celles de l'Association canadienne de normalisation (CSA) pour tenir compte des différences dans le trafic routier canadien. De même, l'approche actuelle peut pénaliser excessivement les ponts canadiens parce qu'elle exige l'utilisation des limites de déflexion de l'AASHTO en conjonction avec le modèle de camion canadien plus lourd. Ces problèmes peuvent décourager les concepteurs canadiens d'utiliser des tabliers orthotropes pour les nouveaux projets de construction de ponts ou pour les projets de réhabilitation de structures de ponts existants.

C'est pourquoi une étude a été entreprise avec les objectifs suivants :

- Examiner l'état des connaissances sur la conception de TOA en mettant l'accent sur le chargement, les méthodes d'analyse et la performance à la fatigue de la soudure entre la nervure et la plaque de tablier ;

- Effectuer des analyses structurelles préliminaires pour tester la mise en œuvre de l'approche conceptuelle de la norme CSA S6:19 et déterminer les problèmes à résoudre ;
- Produire un rapport comprenant un résumé des résultats, des recommandations pour la norme CSA S6:25 et des secteurs d'amélioration pour les recherches futures et les prochaines éditions de la norme CSA S6.

Ce rapport présente les principaux aspects des études menées pour atteindre ces objectifs. La section 2 examine l'état des connaissances dans le domaine de la recherche sur les TOA, en se concentrant sur les deux problèmes principaux qui influencent la durabilité et le succès de ces systèmes structurels : la fatigue et la couche de roulement. La section 3 résume les résultats d'une enquête menée auprès de spécialistes de l'industrie, qui comprend l'identification des défis de conception spécifiques auxquels sont confrontés les spécialistes, ainsi que les expériences passées et les meilleures pratiques pour la conception de solutions de TOA optimales du point de vue du coût et du rendement. La section 4 décrit les méthodes d'analyse structurelle utilisées pour étudier la déflexion et la performance à la fatigue d'un échantillon de tablier. La section 5 présente les résultats des analyses effectuées à l'aide des méthodes décrites à la section 4. La section 6 présente une étude des poids bruts des véhicules et des essieux tandem disponibles en Ontario et en Alberta. Le rapport se termine par un résumé des changements proposés pour l'édition 2025 de la norme CSA S6 et par des recommandations pour des recherches futures.

2 Analyse documentaire

2.1 Contexte

Les TOA sont utilisés à l'échelle mondiale depuis le milieu des années 1900 en raison des avantages qu'ils offrent, tels que leur légèreté et leur durabilité [1]. Toutefois, la poursuite de la mise en œuvre des TOA a été entravée par des expériences négatives, notamment en ce qui concerne la défaillance prématurée des couches de roulement et les dommages causés par la fatigue, qui se produisent souvent au niveau des soudures entre la nervure et le tablier, ainsi que les détails complexes liés à la fatigue autour des connexions entre les poutres de plancher et les nervures, dont les causes nécessitent un examen plus approfondi.

La fissuration de fatigue des tabliers, généralement au niveau des soudures, se produit parce que les nervures sont souvent reliées à la plaque de tablier par une soudure à pénétration partielle du joint (PPJ) unilatérale. Du point de vue de la fabrication, cette technique de soudage présente des avantages par rapport aux soudures à pénétration complète, mais ses performances ne sont pas aussi bonnes sous chargement dynamique (c.-à-d. cyclique), car la racine de la soudure est essentiellement une encoche nette ou une concentration de contraintes. L'analyse des contraintes aux endroits critiques de la soudure ainsi que la conception et la fabrication par rapport aux détails complexes en lien avec la fatigue autour des connexions entre les poutres de plancher et les nervures pourraient également constituer un défi. La performance à la fatigue des soudures dans les TOA est donc une préoccupation courante [6-23].

2.2 Connaissances générales sur la conception de TOA

Il est possible de trouver une multitude d'informations basées sur la recherche et l'expérience de l'industrie dans les lignes directrices existant sur la conception de TOA, comme le manuel produit par la Federal Highway Administration (FHWA) des États-Unis [1]. Le manuel comprend une étude des projets de TOA avec des détails comme les dimensions des plaques de tablier et des nervures, qui pourraient être utiles pour le dimensionnement préliminaire avant les vérifications de la conception détaillée. Les marges typiques de ces dimensions pourraient être résumées comme suit et sont indiquées dans le schéma de la figure 1 :

- Espacement des poutres de plancher : 3 à 6 m (A)
- Épaisseur du tablier : 12 à 16 mm (B)
- Profondeur de la nervure : 203 à 356 mm (C)
- Largeur de la nervure supérieure : 292 à 387 mm (D)
- Épaisseur de la nervure : 6 à 11 mm (E)
- Largeur de la nervure inférieure : 165 mm (F)
- Espacement entre les axes de la nervure : 600 mm (G)
- Soudures à PPJ entre les nervures et la plaque de tablier : pénétration de 70 à 80 % (H)

Une autre variable importante dans la conception de TOA est la forme des raidisseurs/nervures. Diverses formes (p. ex., trapézoïdales, en U, en V, en T, plates) ont été utilisées [1]. Le manuel de la FHWA propose un organigramme suggérant une séquence pour la vérification de la conception qui comprend les étapes suivantes [1] :

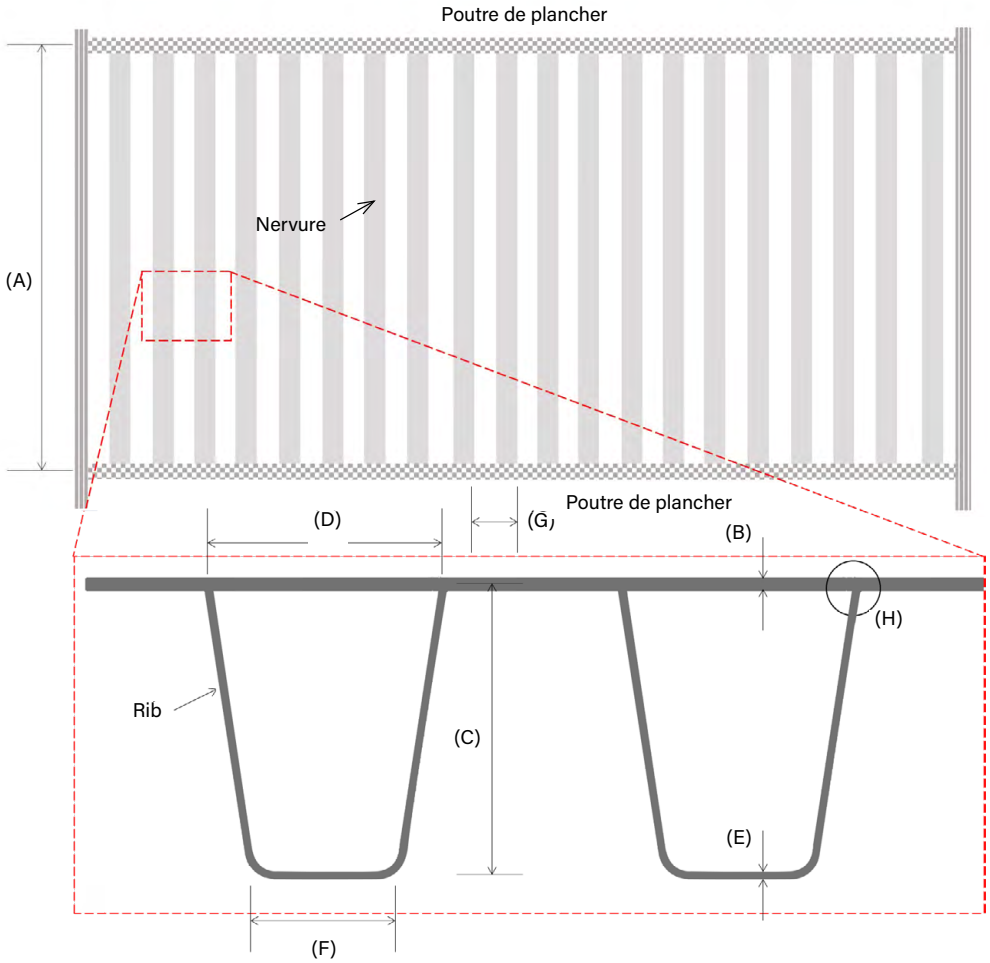
1. Calcul de la résistance ;
2. Vérification de la déflexion (service) ;
3. Analyse de constructibilité ;
4. Vérification à la fatigue.

Pour la vérification à la fatigue, les trois niveaux de conception définis par l'AASHTO [3] sont examinés dans [1], et les situations justifiant leur application sont identifiées comme suit :

- Le niveau 1 est la vérification du rendement par des essais ;
- Le niveau 2 est une analyse simplifiée en 1D ou 2D ;
- Le niveau 3 est l'analyse en 3D.

Dans certaines situations, chaque niveau de conception peut être approprié, tout dépendant le contrôle de conception effectué et la disponibilité des données

Figure 1 : Schéma d'un tablier orthotrope avec les principales dimensions indiquées. Espacement des poutres de plancher (A) ; épaisseur du tablier dans [1] (B) ; profondeur de la nervure (C) ; largeur de la nervure supérieure (D) ; épaisseur de la nervure (E) ; largeur de la nervure inférieure (F) ; espacement entre les axes des nervures (G) ; soudures à PPJ entre les nervures et la plaque de tablier (H).



d'essai. L'annexe 1 présente une version simplifiée de l'organigramme de conception dans [1], avec des lignes directrices suggérées pour le dimensionnement comme étape préliminaire.

2.3 Rendement de la couche de roulement

La durée de vie d'une couche de roulement de TOA pourrait être de cinq ans ou moins si des précautions ne sont pas prises lors de la conception du tablier et de l'application de la couche de roulement. La plupart des propriétaires d'infrastructures trouveraient cette durée de vie trop courte. L'adéquation de la couche de roulement est liée à sa force de liaison, à sa ductilité, à sa résistance à la fatigue, à sa durabilité, à son imperméabilité et à sa capacité à résister aux produits chimiques comme les sels de déglaçage [4]. L'épaisseur typique d'une couche de roulement varie entre 25 et 50 mm, car elle doit être suffisamment fine pour tirer parti des propriétés de légèreté des TOA, tout en étant suffisamment épaisse pour couvrir les éventuelles irrégularités géométriques de la surface de la plaque de tablier [4]. Le rendement de la couche de roulement dépend de son épaisseur, de la force de liaison, de la déflexion du tablier, des conditions d'exposition à l'environnement, des propriétés du matériau (p. ex., la résistance à l'abrasion) et de l'entretien [4]. Une déflexion excessive introduit des contraintes de cisaillement répétées le long de la ligne de liaison de la couche de roulement ainsi que des contraintes de fatigue par traction dans la région de la couche de roulement située au-dessus des nervures [4]. Dans les régions froides soumises à de fortes fluctuations de température, comme le pont du fleuve Yukon en Alaska, on a constaté que les couches de roulement conventionnelles se dégradaient prématurément en raison des contraintes thermiques supplémentaires [5]. On suggère dans [5] que la performance à la fatigue de la couche de roulement peut être optimisée en accroissant le rapport de module entre la couche de roulement et l'acier, en augmentant l'épaisseur de la plaque de tablier et en réduisant l'espacement entre les poutres de plancher et les nervures.

Les types de couches de roulement les plus couramment utilisés en Amérique du Nord sont [6] :

- les systèmes de revêtement bitumineux ;
- les systèmes de revêtement en béton ;
- les systèmes de revêtement en polymère.

Les différents types de couches de roulement subissent des contraintes variées en fonction de leurs propriétés thermiques et de leur effet sur la rigidité du tablier, qui influent sur la longévité. En général, l'utilisation de systèmes moins sensibles aux changements de température et l'augmentation de la rigidité du tablier réduisent la propension à la fissuration. On a constaté que les revêtements bitumineux se comportaient bien sur des systèmes de TOA relativement rigides. Cependant, leur sensibilité à la température signifie qu'ils ont tendance à se ramollir à haute température et à durcir à basse température, ce qui les rend particulièrement sensibles à la fissuration par traction et à la formation d'ornières [6]. Les revêtements en béton sont plus lourds que les revêtements bitumineux, mais ils présentent moins de risques de décollement si des goujons de cisaillement sont utilisés, et ils pourraient accroître la rigidité du tablier, ce qui réduirait les contraintes globales de charge utile générées dans le tablier [6]. Les revêtements en polymère constituent une alternative plus légère et plus fine, mais ils n'ont aucune influence sur la rigidité du tablier. Le décollement de la couche de roulement par rapport au tablier est le problème de rendement le plus fréquemment signalé pour les revêtements en polymère [6].

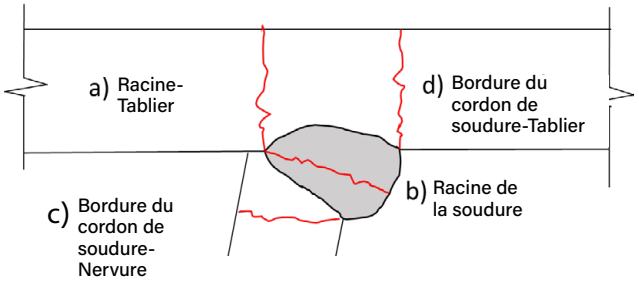
2.4 Performance à la fatigue des joints de TOA soudés entre la nervure et le tablier

Les joints soudés entre la nervure et le tablier des TOA sont susceptibles de se fissurer sous l'effet de la fatigue. Quatre types de fissures de fatigue sont susceptibles de se produire dans ces joints, y compris [7] à [10] :

- Fissure à la racine de la soudure qui se propage à travers le tablier (fissure entre la racine et le tablier) ;
- Fissure à la racine de la soudure qui se propage à travers la gorge de la soudure (fissure à la racine de la soudure) ;
- Fissure qui se propage de la bordure du cordon de soudure à la nervure à travers la paroi de la nervure (fissure entre la bordure du cordon de soudure) ;
- Fissure qui se propage de la bordure du cordon de soudure à la plaque de tablier à travers cette dernière (fissure entre la bordure du cordon de soudure et le tablier).

Ces quatre types de fissures typiques sont illustrés à la figure 2.

Figure 2 : Illustration des différents types de fissures de soudure



Les essais de fatigue des TOA sont généralement réalisés dans le cadre de l'un de ces trois types d'expériences :

1. Spécimen d'essai à soudure simple ;
2. Spécimen d'essai simple fermé ou avec nervure en U ;
3. Spécimen d'essai à grande échelle contenant plusieurs nervures.

Le choix du type d'expérience influence le mode de défaillance par fatigue observé. Le mode de défaillance le plus courant pour les spécimens d'essai à soudure simple est la fissure entre la racine et le tablier (type a) [8] à [10], tandis que les essais de fatigue sur les nervures en U simples ont été signalés dans le cas d'une fissure de la bordure du cordon de soudure qui se propage à travers la plaque de tablier (type d) [7], [14], [15]. Des essais à grande échelle sur les TOA ont révélé les deux types de fissures de fatigue en fonction de la méthode de chargement [16] à [18]. Les essais sur une soudure simple permettent d'évaluer l'impact du processus de soudage sur le comportement à la fatigue, mais ne permettent pas de reproduire le comportement des systèmes structurels du TOA. Les expériences sur les nervures en U simples permettent de saisir le comportement intégral des TOA, mais le mode de défaillance le plus souvent signalé (fissure de la bordure du cordon de soudure) diffère de la fissuration à la racine, plus couramment observée, qui a été signalée sur des ponts réels [7], [20]. Les essais à grande échelle offrent la représentation la plus précise du comportement à la fatigue que l'on peut attendre d'un pont réel, au prix de la complexité et du coût de fabrication. La majorité des essais à grande échelle [7], [16], [18] ont fait état d'une plus grande propension aux fissures à la racine. Toutefois, certaines expériences ont permis d'observer des fissures entre la bordure du cordon de soudure et le tablier (type d) [17]. Les essais à grande échelle présentent également l'avantage de créer les conditions réelles de trajets de charge redondants présents dans les systèmes de TOA. Ainsi, lorsque le ramollissement d'une nervure à cause de la fissuration se produit, les essais à grande échelle ont une certaine capacité à ralentir la croissance de la fissure par la redistribution des contraintes, ce qui ne sera pas observé dans un essai à petite échelle.

Le tableau 1 énumère les trois types d'expériences, le type de défaillance par fatigue le plus courant observé et leur pertinence pour évaluer les joints soudés entre la nervure et le tablier dans les TOA.

Les facteurs qui influencent la performance à la fatigue des joints de TOA entre la nervure et le tablier comprennent notamment :

- la géométrie de la soudure ;
- la géométrie du tablier ;
- la position transversale de la charge à la roue ;
- la qualité de la soudure.

La recherche sur l'influence de chacun de ces facteurs est brièvement résumée dans les sections 2.4.1 à 2.4.5.

2.4.1 Géométrie de la soudure

La soudure à PPJ utilisée dans le joint situé entre la nervure et le tablier est le paramètre le plus influent sur la performance à la fatigue des TOA, son amélioration étant généralement constatée à mesure que le niveau de pénétration de la soudure (NPS) augmente (p. ex., [1,] [7], [11], [13], [14], [16], [17], [19]). L'amélioration proportionnelle de la performance à la fatigue avec l'augmentation du NPS n'est observée que jusqu'à 75 à 80 % de pénétration, après quoi la durée de vie en fatigue d'un TOA restera la même ou diminuera légèrement. De plus, l'augmentation du NPS au-delà de 80 % accroît le risque de défauts de soudure au cours de la fabrication, tels qu'une pénétration trop importante et une percée dans la soudure, qui peuvent toutes deux affaiblir gravement la résistance à la fatigue de l'assemblage soudé.

D'autres aspects de la géométrie de la soudure pourraient également affecter la durée de vie en fatigue des TOA, comme le profil de la soudure [20] et la présence de fissures à chaud [21]. Les fissures à chaud

Tableau 1 : Types d'essais de fatigue pour les soudures entre les nervures et le tablier des TOA

Méthode d'essai de fatigue	Mode de défaillance observé le plus courant	Adéquation
Spécimens d'essai à soudure simple	Entre la racine et le tablier (type *a*) [8] à [10]	Convient pour évaluer l'impact du processus de soudage sur le comportement à la fatigue, mais ne permet pas de reproduire le comportement des systèmes structurels des TOA.
Spécimen d'essai simple avec nervure en U	Entre la bordure du cordon de soudure et le tablier (type *d*) [7], [14], [15]	Met en évidence le comportement intégral des TOA, mais le mode de défaillance diverge de la fissuration à la racine, plus communément observée sur les ponts réels.
Spécimen d'essai à grande échelle	Entre la racine et le tablier (type *a*) et entre la bordure du cordon de soudure et le tablier (type *d*) en fonction de la méthode de chargement [16] à [18].	Représente le plus précisément le comportement à la fatigue des ponts réels, mais est beaucoup plus complexe et coûteux.

sont des fissures de retrait qui se produisent pendant le processus de soudage lorsque le métal de soudure liquide est insuffisant pour remplir les espaces dans le métal de soudure en cours de solidification. Ces types de fissures ont été signalés comme étant la cause principale des fissures de fatigue étendues dans 66 des 408 panneaux de tablier du pont Bronx-Whitestone [21]. Les fissures à chaud réduisent les contraintes de compression résiduelles dans la soudure, ce qui augmente la probabilité de défaillance causée par la fatigue [21]. Lorsqu'elles sont découvertes rapidement, il est possible de réparer facilement les fissures à chaud, ce qui souligne l'importance d'une inspection minutieuse pour détecter ce défaut. Le choix d'un métal d'apport et d'une procédure de soudage approprié pourrait également réduire le risque de fissures à chaud.

Une étude a comparé trois profils de soudure différents à l'aide d'une analyse numérique et a suggéré que la taille de la racine devait être strictement contrôlée [20]. Une soudure traditionnelle à simple face, une soudure surdimensionnée et une soudure à double face ont été examinées. L'étude a conclu que le rendement de la soudure à double face (qui serait plus difficile à mettre en œuvre dans la pratique pour la fabrication des TOA) était nettement supérieur à celui de la soudure traditionnelle. Les auteurs ont également démontré que l'augmentation de la taille de la passe de soudure intérieure répartit les contraintes d'une manière profitable à la durée de vie en fatigue et déplace la défaillance causée par la fatigue vers la bordure du cordon de soudure plutôt que vers la racine. La comparaison des profils de soudure a également montré que la soudure traditionnelle avait un meilleur rendement que la soudure surdimensionnée. Il convient de noter que l'étude n'a pas examiné les effets du NPS.

2.4.2 Géométrie du tablier

La géométrie du tablier permet de répartir les contraintes des charges à la roue sur les soudures, ce qui influe considérablement sur le comportement à la fatigue des TOA. L'augmentation de l'épaisseur de la plaque de tablier est le moyen le plus efficace d'améliorer la performance à la fatigue, car les formes de dommage causées par la fatigue les plus fréquemment signalées sont des fissures se propageant à partir de la bordure du cordon ou de la racine de la soudure à travers la plaque de tablier [9], [20]. L'augmentation de l'épaisseur de la plaque de tablier à 16 mm pourrait améliorer la performance à la fatigue. En revanche, une épaisseur de nervure plus importante n'a qu'un effet limité sur la performance à la fatigue [9], [22], mais l'utilisation de nervures globalement plus grandes pourrait être bénéfique [9]. Une étude a également montré que le précambrage des tabliers améliorait la performance à la fatigue [23].

2.4.3 Position transversale du chargement

Deux études numériques ont examiné l'effet de la position transversale de la charge sur les contraintes entourant la soudure du joint entre la nervure et le tablier [14], [17]. L'une d'elles a évalué la nature des contraintes au niveau des nervures, des membranes et des plaques de tablier entourant la soudure. La charge a été placée au niveau de 30 positions transversales différentes entre la soudure en question et les deux nervures adjacentes. Les résultats ont montré que les contraintes s'exerçant sur la plaque de tablier et la membrane étaient maximisées lorsque la charge se trouvait au-dessus de la soudure, tandis que les contraintes au niveau des nervures étaient maximisées lorsque la charge se trouvait sur la nervure adjacente [14]. La deuxième étude a examiné trois scénarios : la charge centrée sur la paroi de la nervure loin de la soudure analysée (cas 1), la charge centrée sur la paroi de la nervure au-dessus du joint (cas 2) et la charge centrée sur la nervure (cas 3). Les résultats ont montré que les cas 1 et 2 avaient la plus forte probabilité de provoquer des fissures qui se propagent dans la plaque de tablier, tandis que le cas 3 avait une plus forte probabilité de provoquer une fissure à la racine de la soudure. La contrainte globale la plus élevée au niveau de la soudure apparaissait dans le cas 1, suivi des cas 2 et 3 [17].

2.4.4 Méthodes d'analyse de la fatigue

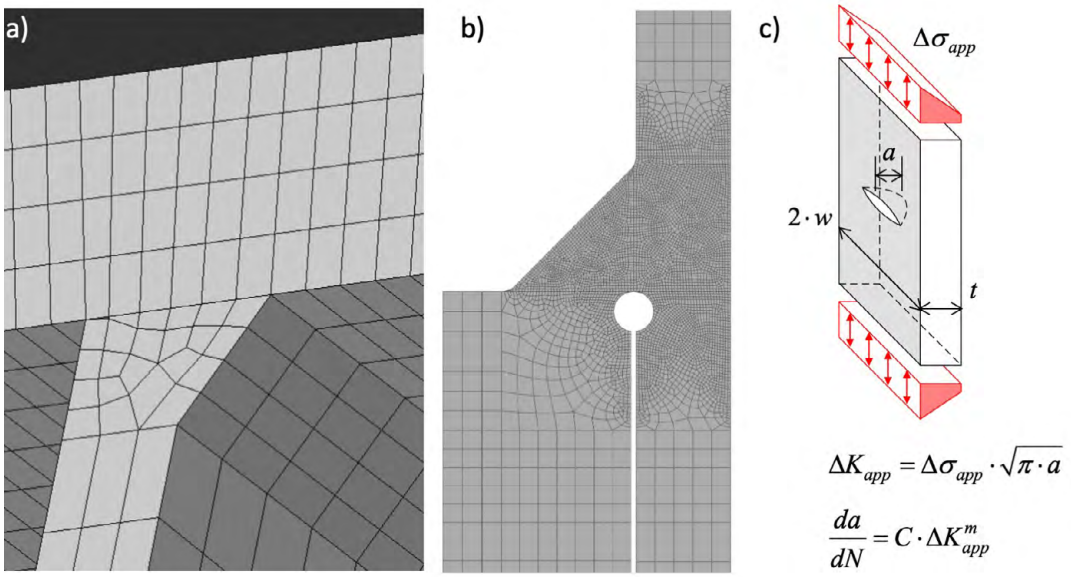
L'analyse par éléments finis (EF) est un outil puissant qui pourrait être exploité pour fournir des prévisions de la durée de vie en fatigue à l'aide de différentes techniques, chacune ayant ses avantages et ses limites. Il est possible de prédire la performance à la fatigue des TOA à l'aide des approches suivantes :

1. Méthode de la contrainte au point chaud ;
2. Méthode de la contrainte à l'encoche ;
3. Mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER).

Les trois approches sont illustrées à la figure 3.

Les méthodes des contraintes au point chaud et à l'encoche sont utilisées pour déterminer les contraintes locales spécifiques à l'emplacement critique de la fatigue ou à proximité, et utilisent ensuite des courbes empiriques établies à partir d'essais pour déterminer la durée de vie en fatigue basée sur la marge de contrainte calculée (en référence aux courbes S-N ou de « résistance sous contrainte »). La MLER ne nécessite pas de courbes empiriques, la durée de vie en fatigue étant directement calculée en évaluant la vitesse de propagation des fissures par la mécanique de la rupture [24].

Figure 3 : Caractéristiques de modélisation de trois méthodes d'évaluation de la fatigue : a) contrainte au point chaud, b) contrainte à l'encoche, c) mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER).



La méthode de la contrainte au point chaud utilisée pour évaluer la fatigue des soudures est examinée dans plusieurs lignes directrices et codes internationaux traitant de conception, notamment ceux de l'Institut international de la soudure (IIW) [24], du Comité européen de normalisation (CEN) [25] et de la Japanese Society of Steel Construction. Traditionnellement, la méthode de la contrainte au point chaud a été utilisée pour évaluer la durée de vie en fatigue des détails de soudure pour lesquels la bordure du cordon est l'emplacement critique de la fissure. Les recherches ont montré que la méthode de la contrainte à l'encoche est également une approche viable pour analyser les soudures d'angle des joints nervure-tablier du TOA, donnant souvent des estimations prudentes de la durée de vie en fatigue par rapport à la méthode de la contrainte au point chaud lors de l'analyse de la bordure du cordon de soudure. La MLER est un outil polyvalent de prévision de la durée de vie en fatigue, mais elle est fortement influencée par les caractéristiques supposées des fissures, notamment la direction, la taille et le mode de propagation. Cela signifie que la mise en œuvre de la MLER nécessite plus d'expertise et produit des résultats qui sont susceptibles d'être très sensibles aux hypothèses concernant les paramètres d'entrée. La MLER est également limitée dans la mesure où elle ne prend en compte que la phase de propagation des fissures de la durée de vie en fatigue totale. Toutefois, des études antérieures ont montré que ce n'est pas un problème important pour l'évaluation des structures soudées pour lesquelles de petits défauts initiaux découlant de la fabrication sont inévitables.

2.4.4.1 Méthode de la contrainte au point chaud

Dans le contexte de l'analyse par éléments finis, la contrainte au niveau de la soudure qui est pertinente pour évaluer la fatigue se produit généralement à la racine ou à la bordure du cordon de soudure, qui sont des zones périphériques sensibles au maillage. Cela signifie que la contrainte en ces points tendra vers l'infini à mesure que le maillage devient plus petit, ce qui pose un problème pour déterminer une contrainte caractéristique. La méthode de la contrainte au point chaud permet de surmonter cette difficulté en extrapolant la contrainte à partir de points de référence proches de la zone d'intérêt pour obtenir la contrainte nominale. La méthode est généralement utilisée pour évaluer la contrainte structurelle associée à une soudure d'angle ou à pénétration complète. Des études ont montré que cette technique perd de sa précision lorsqu'elle est utilisée pour prédire la contrainte à la racine de la soudure [1], [10], [20], qui est la forme la plus signalée de dommages de fatigue survenant dans les TOA de ponts existants. Cela s'explique par le fait que la racine de la soudure représente souvent un changement de géométrie plus marqué que la bordure du cordon de soudure et, dans le cas d'un manque de pénétration de la soudure, la racine de la soudure pourrait présenter un important défaut préexistant de type fissure à la fin du processus de fabrication (dont la taille pourrait varier considérablement), avant même que le chargement de fatigue ne débute. Il convient de noter que la méthode de la contrainte au point chaud n'est pas limitée aux applications basées sur les éléments finis et qu'il est également possible de l'utiliser expérimentalement pour prédire la contrainte au niveau de la soudure d'un TOA en extrapolant les déformations mesurées à partir de points de référence proches [13]. L'AASHTO recommande cette méthode pour l'analyse de fatigue de la bordure du cordon de soudure des joints nervure-tablier des TOA en l'absence de données expérimentales pour une géométrie similaire du TOA considéré [3].

2.4.4.2 Méthode de la contrainte à l'encoche

La méthode de la contrainte à l'encoche fournit une autre solution pour obtenir la contrainte au niveau de la soudure dans une zone d'intérêt sensible au maillage. Elle est plus polyvalente que la méthode de la contrainte au point chaud dans la mesure où son application n'a pas été limitée aux détails de fatigue semblables à ceux des bordures du cordon de soudure. Des chercheurs ont utilisé la méthode de la contrainte à l'encoche pour analyser les contraintes à la fois à la racine de la soudure et à la bordure du cordon des joints nervure-tablier des TOA [17], [26]. Un rayon efficace de 1 mm pour la racine de l'encoche a permis d'obtenir des résultats cohérents. La méthode de la contrainte à l'encoche nécessite un maillage très fin, ce qui rend la modélisation des panneaux de tablier entiers excessivement coûteuse du point de vue du temps de calcul, à moins que des modèles partiels créatifs ou des stratégies de sous-modélisation ne soient utilisés.

2.4.5 Mécanique linéaire élastique de la rupture

L'approche en MLER permet de prédire la durée de vie en fatigue en calculant la vitesse de propagation des fissures par cycle de chargement grâce à la loi de croissance des fissures de Paris-Erdogan. Cette méthode nécessite la connaissance des constantes de croissance des fissures C et m, ce qu'il est possible d'obtenir dans la documentation ou par des essais. L'augmentation de la taille des fissures est proportionnelle à la variation du facteur d'intensité de contrainte (FIC), ΔK_{app}. Le FIC se calcule à partir de la taille de la fissure, de la contrainte appliquée et de la géométrie de la pièce. En théorie, l'approche de la MLER pourrait être appliquée sans analyse par éléments finis, mais elle y est souvent associée pour analyser des géométries complexes, telles que celles présentes dans les TOA. Le calcul de la variation du FIC dépend fortement du mode de fissuration, qui sera un de ces trois types : mode I – ouverture et fermeture des fissures ; mode II – cisaillement dans le plan ou mode III – cisaillement hors du plan. À des fins pratiques, on suppose souvent que le chargement en mode I prédomine, et les effets de phase sont prudemment ignorés. Cette approche a été utilisée pour comprendre le comportement de propagation et fournir des prévisions pratiques de la durée de vie en fatigue des TOA pour les fissures de la plaque entre la racine et le tablier (type a) [27], ainsi que pour les fissures de la plaque entre la bordure du cordon et le tablier (type d) [28] et les fissures de soudure à la racine (type b) [29] (voir la figure 2).

3 Sondage sur l'expérience professionnelle

3.1 Contexte

Un sondage a été réalisé auprès de spécialistes de divers secteurs industriels pour mieux comprendre les défis associés à la conception de TOA et mieux cerner les obstacles qui empêchent une utilisation accrue des TOA sur un plus large éventail de types de projets.

Le sondage a été distribué au comité consultatif du projet, aux membres du sous-comité technique de la section 10 de la norme CSA S6, ainsi qu'aux membres et aux personnes-ressources de l'Institut canadien de la construction en acier. Le nombre exact de personnes ayant reçu le sondage n'a pas pu être suivi avec précision, étant donné l'approche de distribution (bouche-à-oreille) qui a été adoptée pour maximiser le nombre de réponses. Au total, cinq personnes ayant une expérience de travail avec les TOA ont répondu au sondage. Parmi ceux-ci, quatre participants étaient des concepteurs de ponts/experts-conseils travaillant au Canada et un était un fabricant canadien de structures métalliques possédant de l'expérience dans la fabrication de TOA pour des projets récents. En ce qui concerne l'expérience relative aux TOA au Canada, la plupart des participants n'ont travaillé que sur des projets de réhabilitation.

3.2 Questions du sondage

Le sondage comportait les questions suivantes :

Q1 : *Quels ont été les facteurs décisifs communs à l'utilisation des TOA pour les projets auxquels vous avez participé ?*

Q2 : *Veuillez décrire les facteurs qui, à votre connaissance, ont contribué à ce que les TOA ne soient pas la solution privilégiée pour d'autres projets antérieurs.*

Q3 : *Le cas échéant, veuillez décrire les difficultés rencontrées lors de l'application des spécifications existantes en matière de conception de TOA.*

Q4 : *Veuillez nous faire part de vos commentaires sur la manière dont les spécifications existantes en matière de conception de TOA, et en particulier celles de la norme CSA S6, pourraient être améliorées.*

Q5 : *Veuillez décrire les aspects spécifiques du processus de conception des TOA pour lesquels vous auriez pu bénéficier de conseils ou d'exemples de conception plus détaillés (le cas échéant).*

Q6 : *Veuillez énumérer les projets de TOA sur lesquels vous avez travaillé au Canada.*

Q7 : *Veuillez énumérer les projets de TOA sur lesquels vous avez travaillé à l'extérieur du Canada.*

3.3 Réponses au sondage

Les réponses au sondage ont été recueillies au moyen de réponses écrites et d'entrevues. Les commentaires des participants pour chaque question sont résumés dans les paragraphes suivants.

Q1 : Quels ont été les facteurs décisifs communs à l'utilisation des TOA pour les projets auxquels vous avez participé ?

- Globalement, les TOA n'ont été envisagés que sur des ponts de très grande portée, où le poids du tablier est important et pourrait avoir un impact considérable sur le coût de la construction et sur le poids des éléments de la superstructure. Sinon, ils sont aussi parfois utilisés pour les ponts à bascule où, là encore, la réduction de poids vaut l'augmentation du coût de fabrication.
- Les TOA permettent de réduire le poids des tours et des fondations.
- Pour un nouveau pont, il n'est souvent conseillé d'utiliser un TOA que s'il n'y a pas d'autre solution. Les problèmes d'entretien à long terme liés à l'asphaltage et à la fatigue sont trop importants. Pour la réhabilitation, il est souvent plus judicieux de réduire le poids (c.-à-d. que cela vaut la peine de prendre le risque d'avoir des problèmes d'entretien à long terme pour éviter le coût de remplacement du pont).
- Un TOA a été utilisé pour un pont existant qui nécessitait un remplacement du tablier et un élargissement pour répondre aux besoins fonctionnels de la route. Les poutres laminées existantes étaient en bon état et ont été conservées. Le TOA est un système léger qui a permis d'élargir le tablier avec les poutres laminées existantes, ce qui n'aurait pas été possible avec un tablier plus lourd.

Q2 : Veuillez décrire les facteurs qui, à votre connaissance, ont contribué à ce que les TOA ne soient pas la solution privilégiée pour d'autres projets antérieurs.

- La fabrication des TOA est très coûteuse (par rapport aux tabliers en béton). Peu de fabricants en Amérique du Nord savent le faire (beaucoup prétendent savoir comment, mais la véritable expérience peut s'avérer moindre, et il est facile de se tromper).
- Le revêtement des TOA pose souvent problème. Il n'est pas possible d'ajouter simplement de l'asphalte (comme c'est le cas pour de nombreux tabliers de pont en béton), et le poids supplémentaire d'un revêtement épais réduit le faible poids du TOA. Le pont Lions Gate, qui présente de nombreux problèmes de revêtement, en est un exemple.
- Les TOA sont coûteux comparativement à un tablier en béton armé ou précontraint. La durée de vie en fatigue est faible à moins d'avoir une plaque de tablier épaisse (16 à 20 mm selon le trafic), le transport des pièces du tablier est coûteux et le soudage des raccords sur le chantier pourrait être douteux, donc litigieux et coûteux à corriger.
- Les problèmes à long terme sont la fatigue et les problèmes d'asphaltage (l'asphaltage des tabliers est très difficile à remplacer et se détériore souvent prématurément, ce qui entraîne toutes sortes de problèmes pour le propriétaire et les utilisateurs).
- Un répondant a indiqué être parfois consulté lors de la phase préliminaire de la conception pour l'estimation des coûts. Le coût est un obstacle courant. Les concepteurs manquent d'expérience et de confiance lorsqu'ils discutent des options préliminaires.
- Les préoccupations concernant la performance à la fatigue, les exigences d'entretien, le coût d'investissement et le manque de confort avec le système sont les principaux problèmes.

Q3 : Le cas échéant, veuillez décrire les difficultés rencontrées lors de l'application des spécifications existantes en matière de conception de TOA.

- Un destinataire a déclaré : « Je n'ai examiné que la réhabilitation des TOA nord-américains, où les dispositions spécifiques de l'AASHTO ne sont pas applicables ou nécessitent une analyse à partir des premiers principes. Par conséquent, je ne peux pas vraiment faire de commentaires sur ce point. »
- La tolérance sur les soudures entre la nervure et le tablier pourrait représenter un défi. L'exigence typique est une pénétration de 80 % avec une marge de tolérance, mais avec une nervure typique de 8 mm d'épaisseur, il peut être difficile de se situer dans cette marge.
- Les spécifications de la CSA dépendent fortement de celles de l'AASHTO.

Q4 : Veuillez nous faire part de vos commentaires sur la manière dont les spécifications existantes en matière de conception de TOA, et en particulier celles de la norme CSA S6, pourraient être améliorées.

- La norme CSA S6 pourrait être rédigée avec ses propres spécifications (et non seulement faire référence à celles de l'AASHTO).
- Les spécifications de l'AASHTO sont divisées de manière confuse entre les sections 6.14.3 et 9.8.3.
- Un diagramme clair supplémentaire expliquant le déroulement de la conception serait utile.
- L'Europe et le Japon ont de bons codes pour les TOA. Cela vaudrait la peine de les consulter. En général, l'Eurocode semble traiter les panneaux raidisseurs/raidis d'une manière plus générale. Tous les TOA n'utilisent pas des auges à ballast ; certains utilisent des raidisseurs de plaque, ce qui ne devrait pas être différent d'un élément de plaque raidie (voir EN 1993-1-5, sections 4.4 et 4.5).
- Les TOA sont délicats et ne devraient être utilisés que par des concepteurs et des propriétaires bien informés. Les niveaux de pénétration de la soudure et l'assurance qualité/le contrôle qualité des soudures sont essentiels. De plus, des orientations/clarifications supplémentaires concernant l'asphaltage seraient bénéfiques.
- La norme CSA S6 pourrait introduire des détails plus cohérents (p. ex., un profil de nervure standard, un espacement, etc.).

Q5 : Veuillez décrire les aspects spécifiques du processus de conception des TOA pour lesquels vous auriez pu bénéficier de conseils ou d'exemples de conception plus détaillés (le cas échéant).

- La norme EN 1993-1-5 donne des règles pour les éléments raidis et les traite de manière plus générique. Il s'agit d'une disposition plus logique du code, mais qui pourrait être une source de confusion pour d'autres parties de la section 10 de la norme CSA S6 (p. ex., les poutres en caisson, les éléments raidis longitudinalement, etc.).
- Les diagrammes de l'Eurocode pour le flambement d'un panneau raidi sont utiles.
- Il serait utile de guider les concepteurs dans le choix de découpes sous les auges à ballast (comme les spécifications de l'Eurocode) ou sous des auges à fond rond entièrement soudées traversant les découpes. Cela dépend de la rigidité du diaphragme/de la poutre de plancher.
- Il serait utile d'effectuer une comparaison de fatigue entre l'espacement des diaphragmes de type japonais (environ 2 m, même avec des raidisseurs fermés) et l'espacement canadien plus courant d'environ 4 m.

Q6 : Veuillez énumérer les projets de TOA sur lesquels vous avez travaillé au Canada.

- Le tableau 2 présente une liste des projets sur lesquels les participants ont déclaré avoir travaillé au Canada.

Tableau 2 : Projets de TOA au Canada sur lesquels les personnes sondées ont travaillé

Projets réalisés au Canada	
Projet	**Lieu**
Pont Lions Gate	Vancouver, Colombie-Britannique
Pont MacKay	Halifax, Nouvelle-Écosse
Pont MacDonald	Halifax, Nouvelle-Écosse
Pont Harbour de Saint John	Saint-Jean, Nouveau-Brunswick
Appel d'offres pour le nouveau pont Champlain	Montréal, Québec
Avant-projet de conception pour le remplacement du pont d'étagement sur West Georgia Street (Georgia Viaduct)	Vancouver, Colombie-Britannique
Pont Red Willow River	Près de Beaverlodge, Alberta

Q7 : Veuillez énumérer les projets de TOA sur lesquels vous avez travaillé à l'extérieur du Canada.

- Le tableau 3 présente une liste des projets sur lesquels les participants ont déclaré avoir travaillé à l'extérieur du Canada.

Autres sujets abordés par les participants au sondage :

- Réhabilitation : les TOA sont couramment utilisés pour les projets de réhabilitation ou d'élargissement de ponts existants et lorsque la durée des travaux ou la perturbation de la circulation sont des facteurs importants.
- Construction neuve : les TOA ne sont généralement la solution préférée que pour les ponts suspendus de très grande portée (c.-à-d. coûts critiques du poids propre et des fondations) et les ponts mobiles (p. ex., ponts levants, ponts à bascule et ponts tournants). Un participant a fait part de ses réflexions sur les perspectives de développement des systèmes de TOA pour les ponts à poutres de moyenne portée. Compte tenu des problèmes de durabilité rencontrés avec les tabliers en béton, les avantages potentiels sont intéressants si les problèmes de durabilité des TOA pouvaient être résolus. Pour que cela fonctionne, il serait important de concevoir une action composite entre le tablier et les poutres, mais cela ajouterait également de la complexité à la conception.
- Les fabricants expérimentés reconnaissent que la constructibilité d'un TOA a un impact plus important sur le coût de fabrication que la réduction des matériaux. L'idée d'un « juste milieu » pour l'épaisseur de la plaque de tablier dans le but de minimiser les coûts de fabrication a été évoquée au cours de plusieurs discussions.
- Une note moyenne de 3,5 sur 5 a été obtenue lorsqu'on a demandé aux participants d'évaluer la clarté des spécifications actuelles relatives à la conception de TOA dans la norme CSA S6.

Dans l'ensemble, les défis et les considérations que les participants ont rencontrés en travaillant avec les TOA sont les suivants :

- Le coût d'investissement relativement élevé lié à la fabrication des tabliers pose problème.
- Les dispositions actuelles ne font pas la distinction entre les éléments de compression locaux et mondiaux.
- Il est essentiel de déterminer l'épaisseur appropriée pour la plaque de tablier au cours de la phase de conception.
- Le respect des limites de déflexion différentielle entre les nervures adjacentes peut constituer un défi.

Tableau 3 : Projets de TOA à l'extérieur du Canada sur lesquels les personnes sondées ont travaillé

Projets réalisés à l'extérieur du Canada	
Projet	**Lieu**
Pont Queen Elizabeth II	Angleterre
Pont Erskine	Écosse
Pont Severn	Pays de Galles
Pont West Gate	Australie
Pont Osman Gazi	Turquie
Pont 1915 Çanakkale	Turquie
Premier et deuxième ponts du Bosphore	Turquie
Pont à bascule	Arabie saoudite
Pont Humber (uniquement pour les réparations)	Angleterre

- Après exploitation, des fissures longitudinales dans la couche de roulement ont nécessité des réparations fréquentes.
- L'alignement entre les panneaux le long des joints soudés transversaux peut constituer un défi.
- L'humidité qui pénètre dans les extrémités des nervures (raccords) peut poser problème.
- La géométrie des ponts peut parfois nécessiter un espacement inégal des nervures ou l'ajout de nervures ouvertes à certains endroits.
- Les fabricants peuvent éprouver des difficultés avec les soudures à PPJ (c.-à-d. atteindre le niveau de pénétration souhaité, éviter les percées). La pénétration actuellement requise n'est pas fondée sur des études, et l'inspection adéquate ou cohérente des soudures à pénétration partielle peut s'avérer difficile.

3.4 Résumé des résultats du sondage

Le sondage et les discussions avec les spécialistes qu'il a suscitées ont fourni des informations précieuses sur les défis associés à la conception de TOA et sur les obstacles à leur utilisation accrue dans un plus large éventail de types de projets. Les commentaires des participants suggèrent que certaines modifications immédiates des spécifications de conception de TOA de la norme CSA S6, qui renvoient à de nombreux articles différents du code de l'AASHTO, pourraient améliorer la clarté pour les concepteurs. Cela pourrait se faire en fournissant, par exemple, un organigramme de conception qui énumère tous les articles du code de l'AASHTO pertinents et qui suggère quand ceux-ci doivent être référencés. Sinon, tous les articles nécessaires pourraient être ajoutés de manière cohérente à la norme CSA S6 au lieu de faire référence au code de l'AASHTO.

Deux autres sujets fréquemment évoqués par les participants sont la performance à la fatigue et la durabilité des couches de roulement, qui constituent une préoccupation majeure pour les concepteurs et les propriétaires de ponts. Davantage de conseils sur la conception et les meilleures pratiques pourraient être inclus dans la norme CSA S6. Enfin, les participants ont noté que les TOA sont une option intéressante pour les ponts dont le poids est critique (p. ex., les ponts de très grande portée et les ponts mobiles), mais les éventuels problèmes de durabilité à long terme causés par la fatigue et l'usure du revêtement, combinés à des coûts d'investissement relativement élevés, peuvent suggérer que les TOA ne devraient pas être utilisés lorsque les avantages ne dépassent pas les inconvénients. Les coûts d'investissement élevés proviennent en grande partie du coût de la main-d'œuvre affectée à la fabrication.

4 Méthodes d'analyse structurelle

Dans cette section, les méthodes utilisées pour mettre en œuvre les procédures de conception actuelles de la norme CSA S6:19 (en faisant référence à l'AASHTO le cas échéant) sont décrites pour évaluer la déflexion et la fatigue d'un système de TOA typique. Les résultats de l'analyse sont présentés à la section 5.

4.1 Analyse de déflexion

Selon la norme CSA S6:19, la conception de TOA doit répondre aux exigences de l'AASHTO en matière de déflexion. Cependant, les modèles de camion de la norme CSA S6 et du code de l'AASHTO diffèrent à la fois en termes de poids total et de répartition par essieu, comme le montre la figure 4. Les limites de déflexion restreignent la déflexion du tablier et la déflexion relative extrême entre les nervures adjacentes. Plus précisément, l'article 2.5.2.6 du code de l'AASHTO limite la déformation de la plaque de tablier causée par la charge du véhicule à la portée divisée par 300, la déformation des nervures provoquée par la charge du véhicule à la portée divisée par 1000 et la déformation entre les nervures sous la charge du véhicule à 0,1 po (2,54 mm).

Le logiciel SAP2000 v17 a été utilisé pour effectuer une analyse longitudinale simple (2D) dans le but de déterminer les positions des essieux qui entraîneraient des déflexions maximales pour les modèles de camion de la CSA et de l'AASHTO. En général, une analyse en 2D est insuffisante pour saisir les déflexions maximales en raison du comportement bidirectionnel des tabliers et de l'exigence d'évaluer la déflexion relative entre les nervures. Par conséquent, un modèle par éléments finis en 3D d'un tablier existant a également été construit à l'aide du logiciel Abaqus 2018. Les dimensions

critiques sont indiquées dans la figure 5. Des analyses pour différentes portées de tablier ont également été effectuées à l'aide du modèle en 2D pour comparer la déflexion causée par chaque camion sur un large échantillon de portées de tablier possibles.

On estime que l'un des principaux objectifs des limites de déflexion de l'AASHTO est d'assurer une durabilité adéquate de la couche de roulement. L'une des questions soulevées par les spécialistes lors du sondage auprès des entreprises est de savoir si les dispositions actuelles pénalisent inutilement les ponts canadiens, étant donné qu'elles exigent que les limites de déflexion de l'AASHTO soient respectées pour le modèle de camion canadien plus lourd. Un objectif important de cette analyse était de quantifier l'importance de cette pénalité comme point de départ d'une discussion plus approfondie.

4.2 Analyse en 2D des lignes d'influence

Pour l'analyse en 2D de la ligne d'influence, les éléments de structure ont été modélisés à l'aide du logiciel SAP2000 en prenant le même moment d'inertie que le tablier. L'option de la section de conception du logiciel SAP2000 a été choisie pour obtenir le moment d'inertie.

Des conditions de soutien simples ont été modélisées et les propriétés nominales de l'acier ont été supposées, y compris un module d'élasticité E = 200 GPa, qui est la valeur spécifiée pour l'acier dans la norme CSA S6 :19 [2]. Les positions des charges qui ont entraîné une déflexion maximale pour les deux camions sont indiquées à la figure 6.

Figure 4a : Dimensions et charges du modèle de camion – CSA S6 [2].

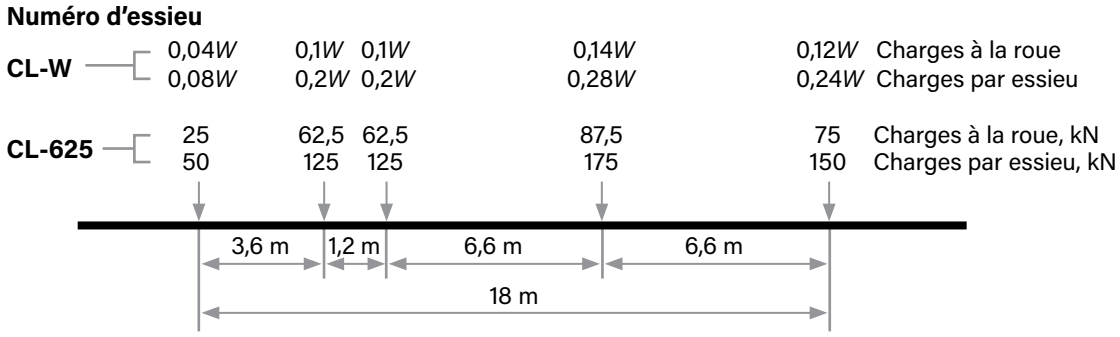


Figure 4b : Dimensions et charges du modèle de camion – AASHTO.

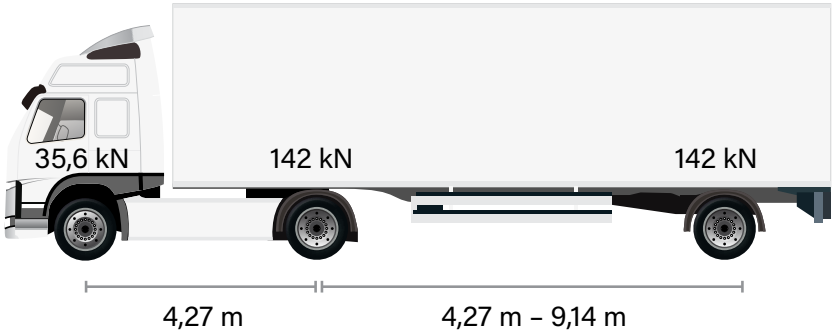
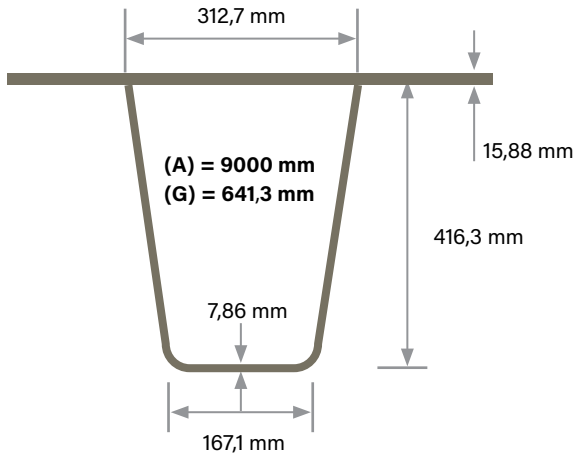


Figure 5 : Dimensions transversales du tablier modélisé.



4.3 Analyse par éléments finis en 3D

La procédure de modélisation utilisée dans cette étude est conforme aux spécifications de l'article 4.6.3.2 du code de l'AASHTO [3] pour une analyse en 3D affinée, comprenant les hypothèses suivantes :

- Propriétés des matériaux élastiques linéaires ;
- Théorie de la faible déflexion ;
- Sections planes demeurant planes ;
- Négligence des contraintes résiduelles et des imperfections ;
- Idéalisation de la géométrie des soudures (les soudures ont toutefois été négligées lors de l'analyse de déflexion).

Une analyse élastique du premier ordre a été réalisée. On a de nouveau supposé que l'acier avait un module d'élasticité E = 200 GPa sans hypothèse de déformation. Une charge de pression a été appliquée sur une zone de contact d'un modèle de pneu de 254 mm x 508 mm pour le camion américain et de 250 mm x 600 mm pour le camion canadien, conformément aux normes respectives. Les positions des charges ont été obtenues à partir de l'analyse en 2D des lignes d'influence.

Selon l'AASHTO, la specification du maillage pour l'analyse de deflexion exige un maillage suffisamment fin pour obtenir une charge de pression avec une precision raisonnable. Pour ce faire, on a applique une taille de maillage de ($t_{tablier}$)/4 pour le tablier, tout en utilisant un maillage plus grossier de 2 ($t_{nervures}$) pour les nervures (ou t = epaisseur). Un hexaedre a 8 noeuds integration reduite (element lineaire continu C3D8R) a ete utilise.)

Seule une partie du tablier a été modélisée pour des raisons d'efficacité computationnelle conformément à l'article 4.6.2.6 du code de l'AASHTO, qui autorise l'utilisation d'une largeur de semelle effective pour les tabliers avec un rapport d'aspect de panneau, L / B < 5 (note : L = 9 m et B = 12,345 m dans ce cas, figure 7). La largeur de semelle effective, b_e, a été calculée à 2,565 m. La portion modélisée résultante du tablier est montrée sur un croquis d'un panneau entier à la figure 7.

Les extrémités du tablier existant ont été simplement soutenues, tandis que les côtés découpés pour la géométrie réduite ont été limités à la translation latérale (U_x) et à la rotation (θ_z) autour de l'axe longitudinal, comme le montrent les figures 8 et 9, où U fait référence à la translation et θ fait référence à la rotation et l'indice désigne l'axe pertinent, comme indiqué à la figure 8 (Y = vertical, Z = longitudinal, et X = latéral). La contrainte a été appliquée à la plaque de tablier entre les nervures, et les nervures étaient soutenues en bas à leurs extrémités. La déflexion maximale et la déflexion relative extrême entre les nervures ont été enregistrées.

Figure 6 : Vue latérale du tablier montrant la position des charges qui maximise la déflexion pour le modèle de camion canadien à gauche et le modèle de camion américain à droit.

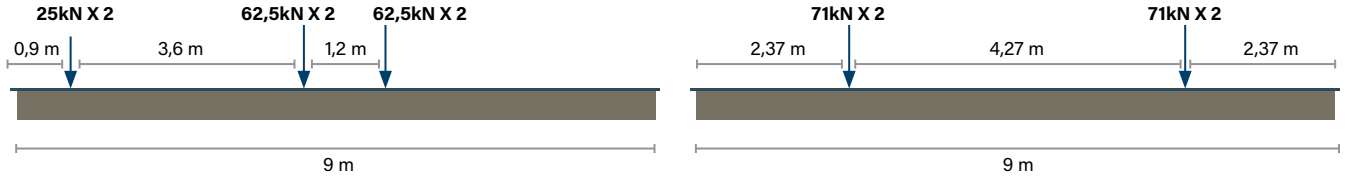


Figure 7a : Vue de dessus montrant l'ensemble du tablier et le modèle de géométrie réduite, illustrant la position des charges à l a roue canadiennes qui maximisent les déflexions.

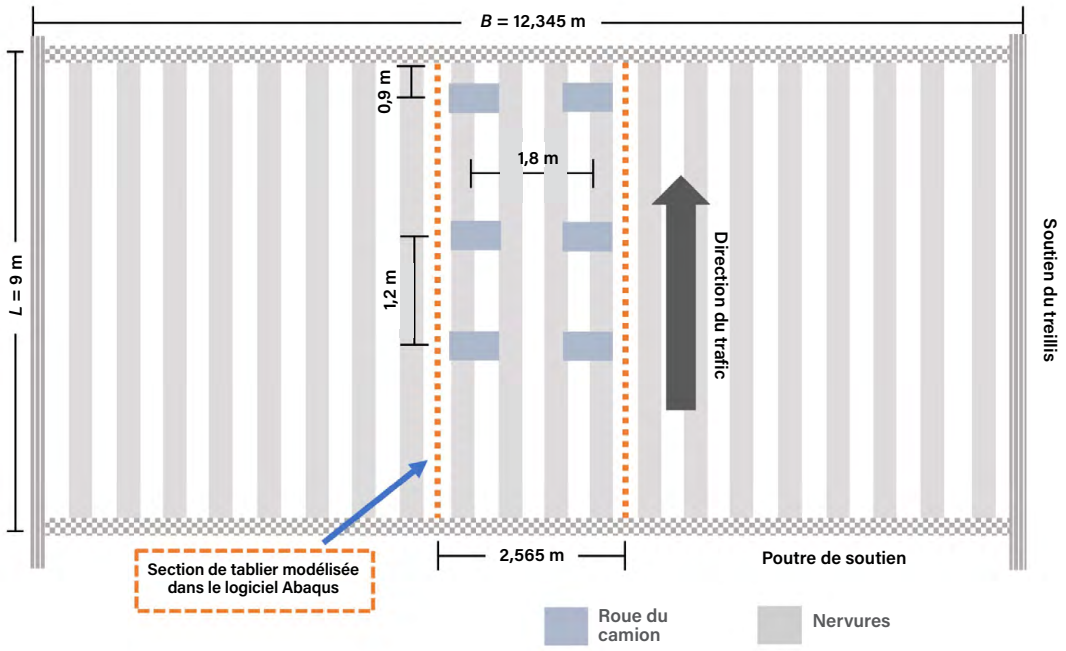


Figure 7b : Vue de dessus montrant l'ensemble du tablier et le modèle de géométrie réduite, illustrant la position des charges à la roue américaines qui maximisent les déflexions.

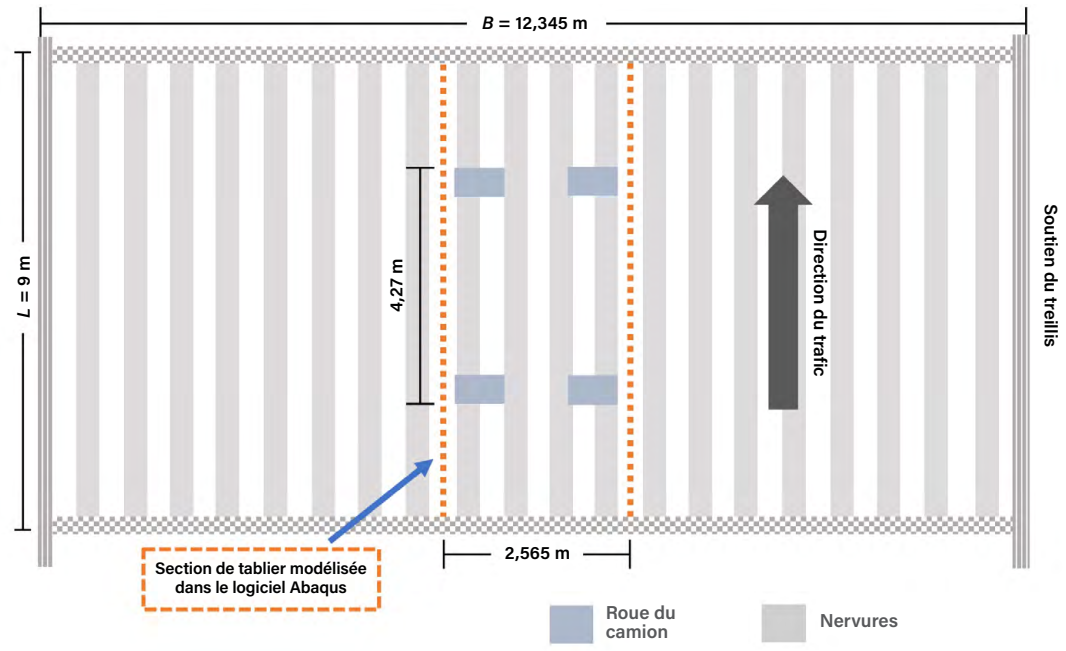


Figure 8 : Vue isométrique du tablier modélisé avec les conditions limites (CL) indiquées.

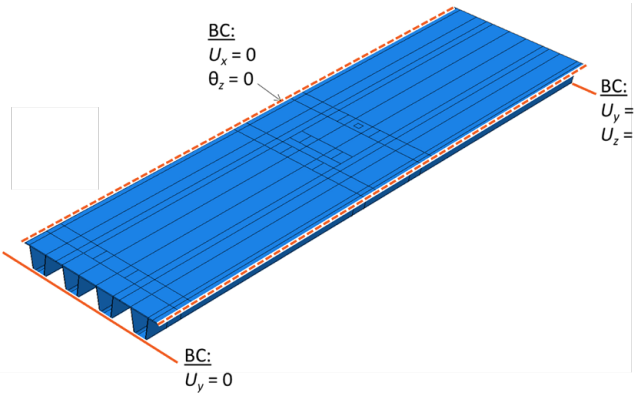
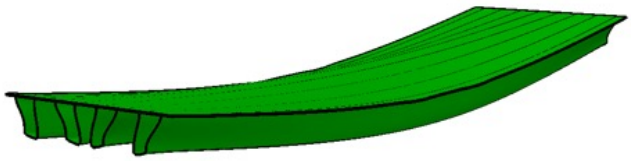


Figure 9 : Forme déformée du tablier sous la charge de trafic.



4.4 Analyse en fonction de différentes portées

Pour étudier les effets de la portée sur la comparaison des déflexions obtenues en utilisant les spécifications de la CSA et de l'AASHTO, l'analyse en 2D a été répétée avec des portées de 3 m, 9 m et 27 m. Les portées modélisées ont été soumises aux charges des modèles de camion de la CSA et de l'AASHTO pour obtenir les résultats de la déflexion maximale à l'aide d'une analyse de charge mobile. Bien que l'applicabilité de l'analyse de la portée de 27 m aux TOA puisse être remise en question, l'objectif de cette étude était de modéliser des cas où la longueur des panneaux est plus longue et plus courte que les longueurs des modèles de camion, pour couvrir toute la gamme des situations possibles qui pourraient se présenter.

La figure 10 montre les positions des charges qui entraînent la déflexion longitudinale maximale pour les différentes portées, avec le camion canadien à gauche et le camion américain à droite. Dans la figure, un support à rouleau et un support à pivot sont désignés respectivement par un cercle et un triangle.

4.5 Analyse de fatigue

L'analyse de fatigue a été réalisée sur le même système de tablier que celui modélisé dans l'analyse de déflexion, avec une géométrie réduite et l'ajout de soudures entre la nervure et le tablier. Pour cette analyse, un maillage plus fin a été utilisé pour déterminer les contraintes locales dans la région de la soudure.

4.5.1 Analyse de la contrainte au point chaud

Une analyse approfondie décrite à l'article 4.6.3.2 du code de l'AASHTO (niveau 3 de conception) a été utilisée pour déterminer les contraintes locales au niveau de la soudure de liaison entre la nervure et la plaque de tablier. Une analyse approfondie est généralement requise pour évaluer la fatigue à l'aide de la méthode de la contrainte au point chaud. La contrainte caractéristique pertinente se produit généralement à la racine ou à la bordure du cordon de la soudure, qui sont des régions périphériques sensibles au maillage, ce qui signifie que la contrainte à ces emplacements tendra vers l'infini à mesure que le maillage devient plus fin. La méthode de la contrainte au point chaud permet de surmonter cette difficulté en extrapolant la contrainte à partir de trois points situés à des distances de 0,4 · *t*, 0,9 · *t* et 1,4 · *t* près de la zone d'intérêt, où t est l'épaisseur de la plaque de tablier, comme l'illustre la figure 11.

La formule suivante est utilisée pour calculer la contrainte au point chaud, σhs, conformément à l'IIW [24] :

$$\sigma_{hs} = 2.52 \cdot \sigma_{0.4 \cdot t} - 2.24 \cdot \sigma_{0.9 \cdot t} + 0.72 \cdot \sigma_{1.4 \cdot t}$$

où t est l'épaisseur de la plaque de tablier et $\sigma_{0,4t}$, $\sigma_{0,9t}$, et $\sigma_{0,4t}$ sont les contraintes aux points de référence.

Les mêmes hypothèses générales de modélisation utilisées dans l'analyse de déflexion ont été utilisées dans l'analyse de fatigue, à l'exception des points suivants :

- Un maillage plus fin a été utilisé pour évaluer les contraintes locales au niveau des soudures ;
- Un « demi-modèle » de l'analyse de déflexion a été utilisé pour renforcer la symétrie ;
- L'application des charges à la roue était basée sur les exigences de fatigue du code de l'AASHTO et de la norme CSA S6:19.

Figure 10 : Positions des charges de l'analyse de portée pour les camions de la norme CSA S6 (à gauche) et du code de l'AASHTO (à droite).

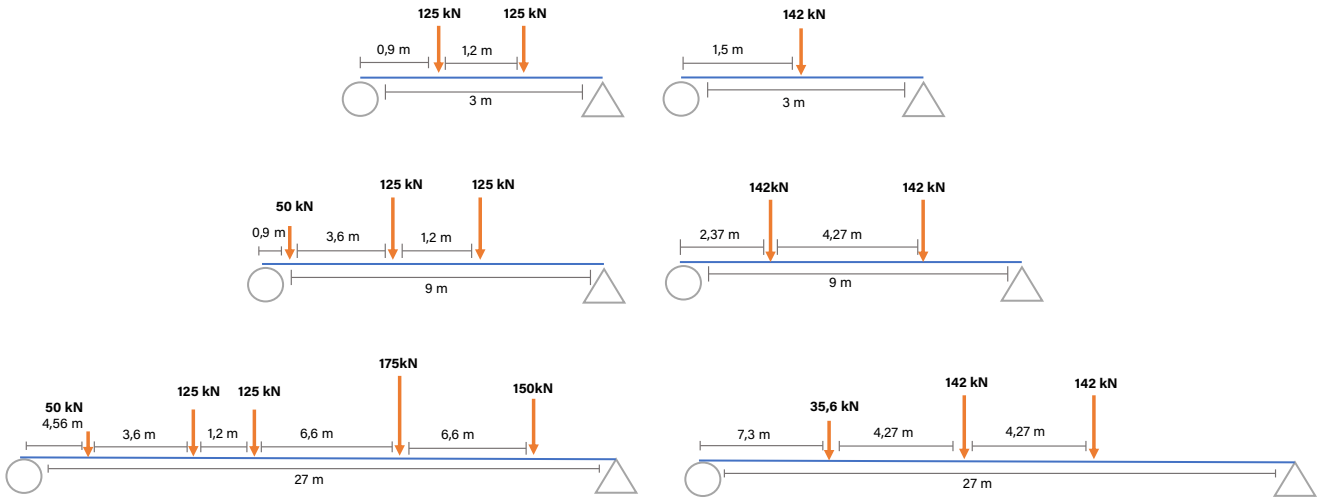


Figure 11 : Illustration de la contrainte au point chaud montrant les points d'extrapolation.

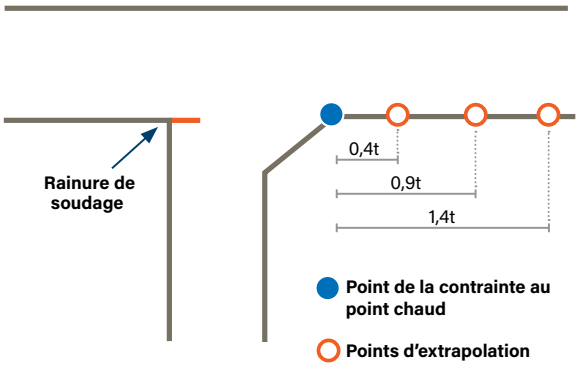
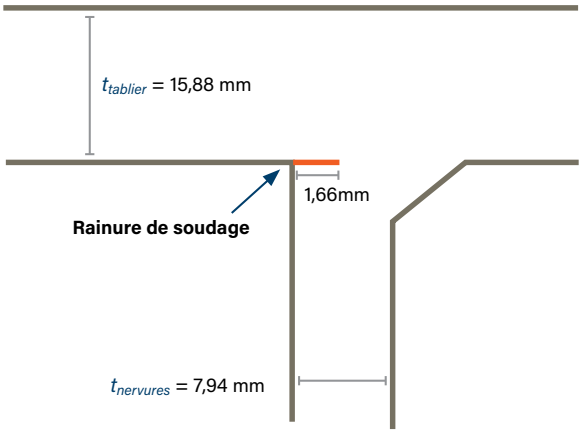


Figure 12 : Dimensions supposées de la soudure entre la nervure et le tablier ($t_{tablier}$ = épaisseur du tablier, $t_{nervures}$ = épaisseur de la nervure).



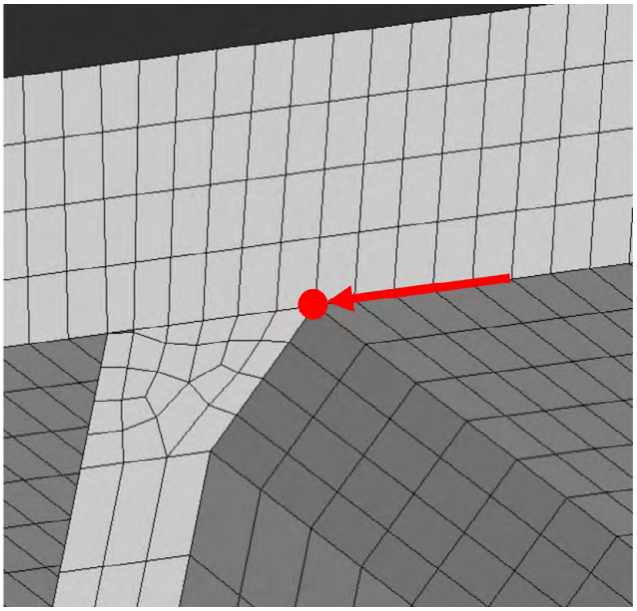
La soudure modélisée était une soudure à PPJ avec une pénétration de 80 %, comme le montre la figure 12.

L'épaisseur de l'élément dans la nervure était $t_{nervures}$ / 2, tandis que la taille du maillage pour le tablier était $t_{tablier}$ / 4, comme illustré à la figure 13. La taille du maillage dans la soudure variait entre $t_{nervures}$ / 2 et $t_{tablier}$ / 4. La taille du maillage dans la zone de soudure est aussi importante que la taille du maillage dans la zone d'extrapolation où la méthode de la contrainte au point chaud est appliquée.

4.5.2 Cas de chargement

Conformément à l'article 10.16.4 de la norme CSA S6, la zone de contact des pneus de 508 mm x 254 mm prescrite par l'AASHTO a été utilisée pour les cas américain et canadien. Le code de l'AASHTO prescrit un camion américain différent pour l'analyse de fatigue de celui utilisé pour l'analyse de déflexion, comme le montre la figure 14. Cela est important, car le premier est environ 30 % plus long et répartit le même poids

Figure 13 : Maillage d'une soudure entre la nervure et le tablier avec un point rouge représentant la bordure du cordon de la soudure où la contrainte est extrapolée pour calculer la contrainte au point chaud.



sur cinq essieux au lieu de trois. Comme indiqué, les spécifications de la CSA exigent l'utilisation de la zone de contact du pneu américain pour l'analyse de fatigue et indiquent que les utilisateurs ne doivent prendre en compte que les forces locales résultant des essieux tandem de 125 kN .

Les limites du modèle et les empreintes des pneus pour l'analyse de fatigue sont présentées à la figure 15.

4.5.3 Conditions limites

Les figures 16 à 18 détaillent les conditions limites du modèle par éléments finis utilisé dans l'analyse de fatigue, y compris les conditions limites sur la ligne d'appui (figure 16), ainsi que les lignes de symétrie longitudinale (figure 17) et transversale (figure 18). Dans ces figures, les limites sont indiquées par des lignes pointillées.

La figure 19 montre la forme déformée du tablier sous la charge prescrite.

Figure 14 : Dimensions du modèle de camion de l'AASHTO pour l'état limite de fatigue pour les TOA (en haut) et dimensions du modèle de camion pour l'état limite en service/ultime (en bas).

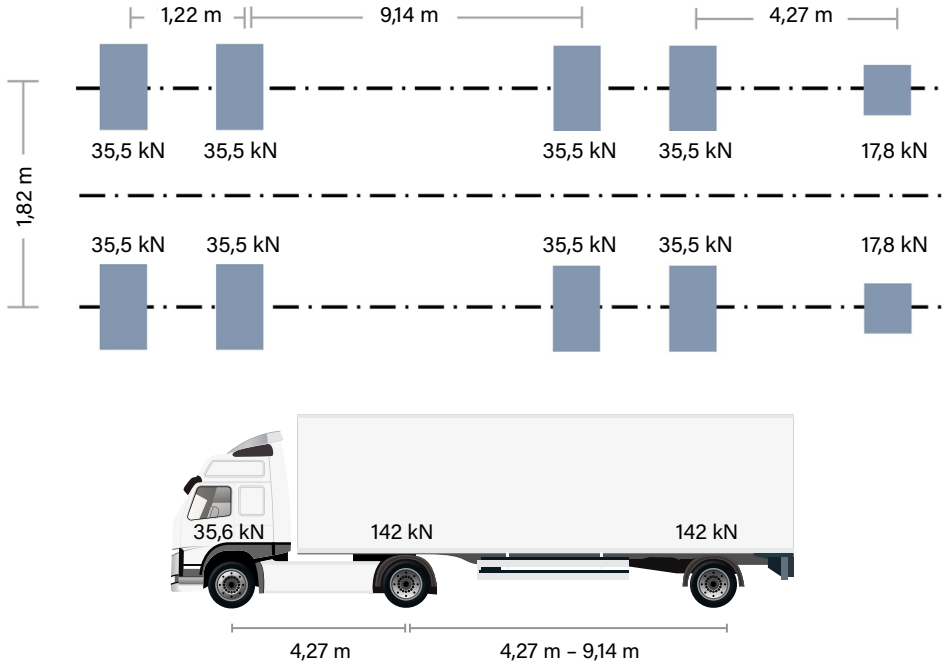


Figure 15 : Vue de dessus du tablier montrant le modèle à géométrie réduite, l'emplacement des soudures et l'emplacement des roues du camion utilisé dans l'analyse de fatigue.

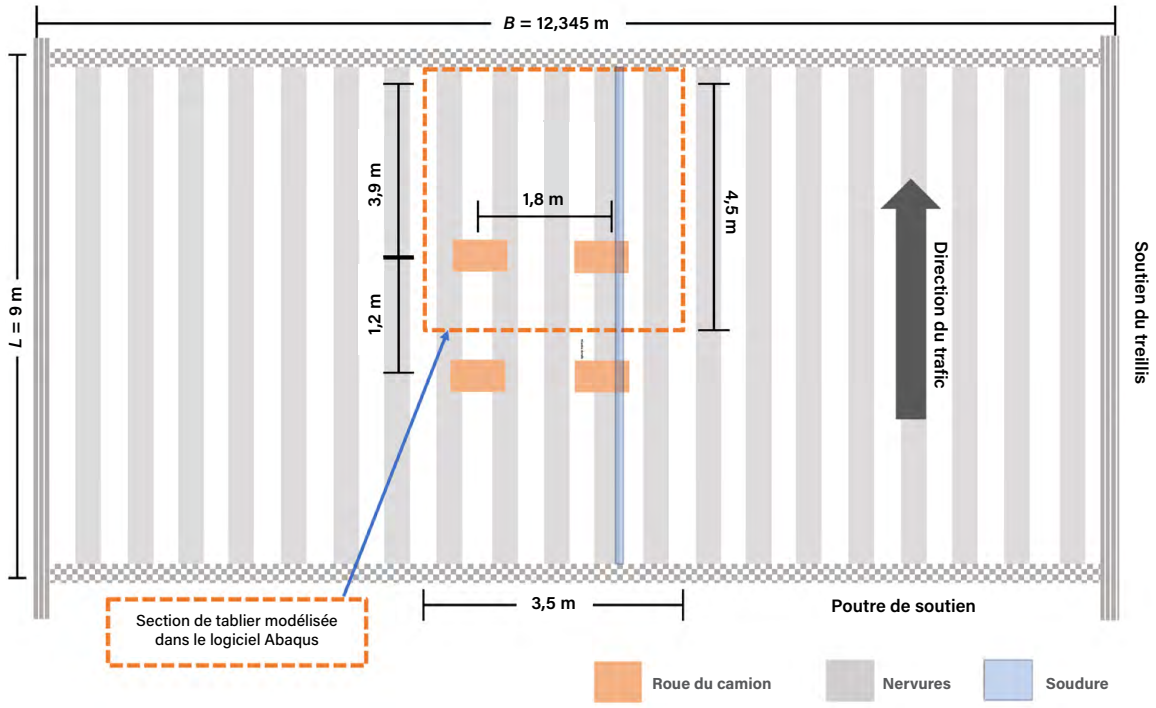


Figure 16 : Vue isométrique du tablier modélisé – Condition limite (CL) 1 : $U_x = U_y = U_z = 0$.

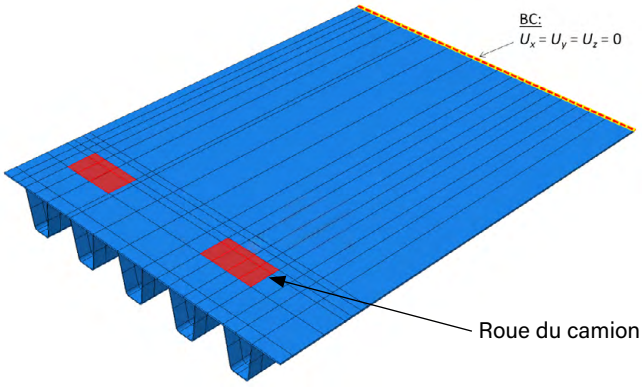


Figure 17 : Vue isométrique du tablier modélisé – Condition limite (CL) 2 : $U_x = 0$, $\theta_z = 0$.

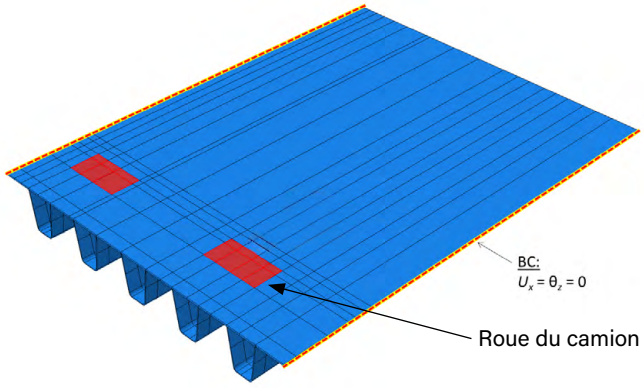


Figure 18 : Vue isométrique du tablier modélisé – Condition limite (CL) 3 : $U_z = 0$, $\theta_x = 0$.

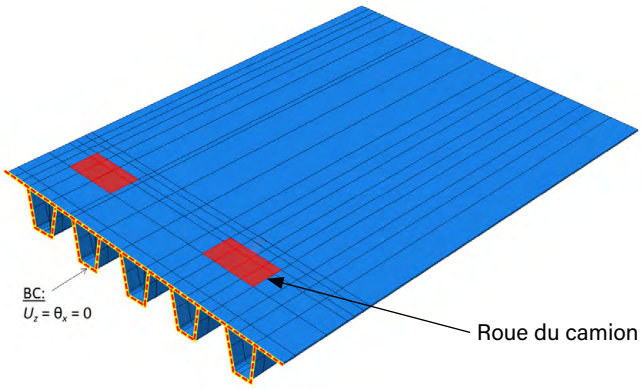
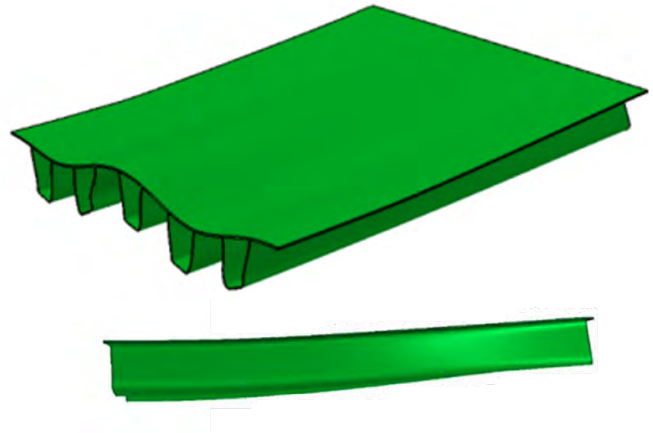


Figure 19 : Vue isométrique (en haut) et vue latérale (en bas) de la forme déformée du tablier.



4.5.4 Étude du chargement transversal

Les fissures de fatigue de la soudure pourraient se produire soit à la racine, soit à la bordure du cordon, en fonction de la géométrie inhérente du tablier et de la position transversale de la charge à la roue. Pour le démontrer, une autre étude de fatigue a été effectuée sur le tablier en évaluant les contraintes à la bordure du cordon et à la racine de la soudure après avoir placé la charge à la roue à trois emplacements : 1) centrée au-dessus de la nervure, 2) centrée entre les nervures et 3) centrée sur l'une des soudures entre la plaque et la nervure. Ces trois cas sont illustrés à la figure 20.

Selon les recommandations de l'IIW [24], la méthode de la contrainte au point chaud ne doit pas être utilisée pour analyser la racine de la soudure et ne doit être utilisée que pour analyser la bordure du cordon de la soudure. Les courbes de fatigue utilisées pour analyser la bordure du cordon sont les courbes FAT 100 [24]. Cependant, deux études [13], [48] présentent des exemples d'utilisation de cette méthode pour analyser avec succès la racine et la bordure du cordon. L'objectif de l'enquête menée pour ce rapport était de déterminer le scénario de chargement qui maximise la contrainte à la bordure du cordon et celui qui maximise la contrainte au niveau de la racine. Pour l'étude du chargement transversal, toutes les autres hypothèses de modélisation sont restées inchangées, avec seulement la position des zones de charge à la roue variant transversalement d'une analyse à l'autre.

5 Résultats et discussion

5.1 Résultats de l'analyse de déflexion

5.1.1 Analyse par éléments finis en 3D

Le tableau 4 présente la déflexion relative extrême entre les nervures en fonction des scénarios des camions de la norme CSA S6 et du code de l'AASHTO. Les résultats indiquent que la limite de déflexion spécifiée par l'AASHTO (2,54 mm) est légèrement dépassée avec les deux camions. En comparant les résultats canadiens et américains, on obtient une déflexion de 3,37 mm avec le camion canadien, soit 9 % de plus que le camion américain (3,10 mm).

Les résultats de la déflexion maximale du tablier sont comparés dans le tableau 5. La limite de déflexion du tablier était L / 300, soit 30 mm pour une portée L = 9 m. Le panneau de tablier étudié répond à cette exigence dans tous les cas. À titre de comparaison, les résultats de l'analyse par éléments finis en 3D (Abaqus) sont également présentés avec les résultats obtenus à l'aide du modèle SAP2000 en 2D. Cette comparaison montre que les déflexions obtenues à l'aide du modèle en 3D sont 36 à 40 % plus élevées que celles obtenues à l'aide du modèle en 2D. Bien que la prudence soit de mise lorsqu'il s'agit de généraliser les résultats de l'analyse d'un seul système de tablier, ceux-ci soulignent l'importance d'utiliser un modèle en 3D pour prédire avec précision les déflexions, étant donné le comportement bidirectionnel

Figure 20a : Scénario de chargement du cas 1 avec la charge centrée au-dessus de la nervure.

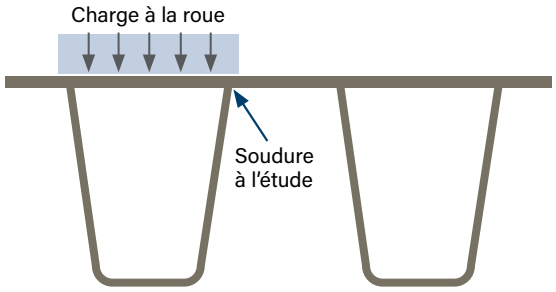


Figure 20b : Scénario de chargement du cas 2 avec la charge centrée entre les nervures.

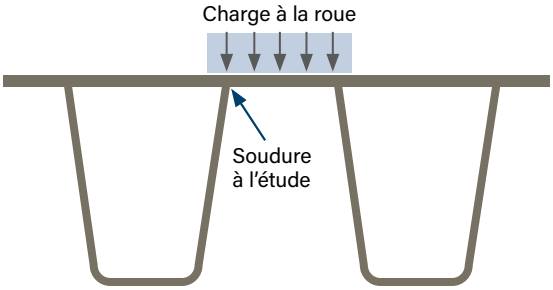
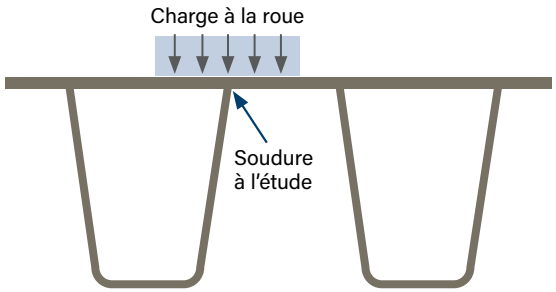


Figure 20c : Scénario de chargement du cas 3 avec la charge centrée au-dessus de la soudure.



complexe de ces systèmes de tabliers ainsi que les déflexions locales complexes possibles aux points d'appui et d'introduction de la charge.

Si l'on compare les résultats canadiens et américains obtenus à l'aide du modèle par éléments finis en 3D, la déflexion du camion canadien est supérieure de 22 %. Les résultats du modèle SAP2000 en 2D sont similaires, montrant une différence de 25 % dans la déflexion, ce qui confirme qu'en raison de la nature élastique de l'analyse, le modèle SAP2000 en 2D est suffisant pour étudier les différences relatives dans la déflexion obtenue en utilisant les modèles de camion de la norme CSA S6 et du code de l'AASHTO pour un plus grand échantillon de portées.

5.1.2 Analyse en 2D des lignes d'influence

Pour étendre les résultats à une plus large gamme de géométries de système de tablier, le modèle SAP2000 en 2D a été utilisé pour une étude simple où la portée du panneau a varié entre 3 et 27 m. Le tableau 6 montre que la différence entre les déflexions canadiennes et américaines varie de 25 à 54 %. Il convient de noter que, pour cet exercice, les valeurs absolues de la déflexion importent moins que les différences, car le tablier n'a pas été reconçu pour chaque portée. Fait intéressant, la différence est plus importante pour les portées les plus longues et les plus courtes. La déflexion maximale pour la portée de 3 m est causée par la charge à l'essieu unique de 142 kN à mi-portée pour le camion américain et par les deux charges à l'essieu de 125 kN pour le camion canadien. Pour la portée la plus longue (27 m), tous les essieux des deux camions doivent être pris en compte. Par conséquent, la répartition du poids par essieu et le poids brut du véhicule (PBV) jouent un rôle important dans l'analyse de déflexion. Les résultats montrent que le camion canadien provoque des déflexions plus importantes pour les trois portées, la différence la plus importante étant de 54 % pour la portée la plus longue.

5.2 Résultats de l'analyse de fatigue

5.2.1 Comparaison des plages de contraintes pour les modèles canadien et américain

Étant donné que les courbes de résistance pour les différentes catégories de détails de fatigue dans la norme CSA S6 et le code de l'AASHTO sont identiques, tout écart entre les prévisions de durée de vie en fatigue faites à l'aide de ces deux références découlerait des différences dans le calcul des contraintes ou dans les plages de contraintes. Les résultats de la comparaison effectuée à l'aide de l'échantillon du système de TOA sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 4 : Déflexion relative extrême entre les nervures causée par les charges des camions canadien et américain

	Charge du camion canadien	Charge du camion américain	CAN/É.-U.
Entre les nervures Δ (mm)	3,37	3,10	109 %

Tableau 5 : Déflexion maximale du tablier sous l'effet des charges des camions canadien et américain, d'après une analyse en 2D et en 3D

	Charge du camion canadien	Charge du camion américain	CAN/É.-U.
Maximum Δ (2D, mm)	11,77	9,43	125 %
Maximum Δ (3D, mm)	16,05	13,20	122 %
2D/3D	136 %	140 %	

Tableau 6 : Résultats de l'analyse de la déflexion longitudinale pour différentes portées

	Maximum Δ (2D, mm)		
Portée	**Camion canadien**	**Camion américain**	**CAN/É.-U.**
3 m	0,341	0,244	140 %
9 m	11,77	9,43	125 %
27 m	516,2	334,7	154 %

Tableau 7 : Résultats de la comparaison de fatigue

Contrainte au point chaud au niveau de la bordure du cordon de soudure (MPa)			
Cas de charge	**σ-bordure du cordon non pondérée (MPa)**	**σ-bordure du cordon pondérée (MPa) – Finie**	**σ-bordure du cordon pondérée (MPa) – Inifinie**
CAN	29,0	23,4	18,9
É.-U.	16,4	15,0	14,0
CAN/É.-U.	177 %	155 %	135 %

Étant donné que l'essieu tandem canadien est nettement plus lourd (250 kN contre 141 kN) et que les configurations de charge des pneus sont similaires, il n'est pas surprenant que le rapport des contraintes non pondérées soit également élevé (177 %). Pour convertir les contraintes non pondérées en contraintes pondérées qui sont nécessaires à la conception, des coefficients doivent être appliqués pour estimer la durée de vie finie ou infinie (c.-à-d. une estimation utilisant la partie inclinée de la courbe S-N pour les routes à faible débit ou la limite de fatigue pour les routes à débit plus élevé). Ces coefficients sont résumés dans le tableau 8, où un coefficient de charge (charge) modifie proportionnellement la charge non pondérée et donc la plage de contrainte, un coefficient de charge dynamique (dynamique) modifie la plage de contrainte non pondérée pour tenir compte des effets dynamiques (impact), un coefficient de réduction (réduction) est appliqué à la plage de contrainte pour tenir compte des différences entre le modèle de camion et le trafic réel (p. ex., lien avec l'équivalence de dommage dans l'estimation de la durée de vie finie ou avec les charges extrêmes pour l'estimation de la durée de vie infinie), et des coefficients de TOA (TOA) modifient spécifiquement la plage de contrainte pour la conception des TOA. La contrainte pondérée est obtenue en multipliant la contrainte non pondérée par chaque coefficient successivement dans la colonne correspondante du tableau 8. Les contraintes au point chaud pondérées qui en résultent sont indiquées dans le tableau 7.

Tableau 8 : Coefficients de charge de fatigue dans la norme CSA S6 et le code de l'AASHTO

Durée de vie finie en fatigue		
Type de coefficient	**CSA**	**AASHTO**
Charge	1,0	0,8
Dynamique	1,3	1,15
Réduction	0,62	—

Durée de vie infinie en fatigue		
Type de coefficient	**CSA**	**AASHTO**
Charge	1,3	1,15
TOA	—	1,3
Réduction	0,5	0,571

Le tableau 7 montre que les coefficients de charge canadiens donnent des plages de contraintes pondérées (conception) plus élevées que les coefficients de charge américains, la plage de contrainte pour la conception canadienne étant supérieure de 55 % pour l'estimation de la durée de vie finie et de 35 % pour l'estimation de la durée de vie infinie. Il est difficile d'évaluer la pertinence de cette différence sans avoir accès aux bases de données des caractéristiques réelles actuelles du trafic au Canada et aux États-Unis, qui sont nécessaires pour déterminer si le trafic canadien est plus préjudiciable du point de vue de la fatigue. Comme le montre la figure 21, les données historiques et l'analyse suggèrent qu'il existe des écarts dans les spectres de PBV entre le Canada et les États-Unis, qui justifient la différence dans la plage de contrainte pour évaluer la fatigue [54].

Le résultat le plus important de cette comparaison a sans doute été le manque de clarté dans la mise en œuvre des dispositions de la norme CSA S6 sur la fatigue des TOA. L'une des raisons est que l'AASHTO présente les coefficients d'équivalence de dommage (0,8) et de décalage du seuil de durée de vie illimitée (1 / 1,75 = 0,571) comme des coefficients de charge, qui sont prescrits au chapitre 3, où sont décrits les charges et les coefficients de charge. À l'inverse, la norme CSA S6 présente ces coefficients (0,62 pour l'équivalence de dommage sur la durée de vie limitée et 1 / 2 = 0,5 pour la réduction appliquée à la limite de fatigue par rapport à la durée de vie longue) comme des corrections intégrées dans les fonctions d'état limite elles-mêmes.

En interprétant la norme CSA S6, un concepteur qui ne comprend pas bien l'objectif de ces coefficients pourrait facilement se méprendre et appliquer les coefficients américains au tandem de conception canadienne ou appliquer les coefficients d'ajustement américains en plus des coefficients canadiens, ce qui conduirait à des calculs lors de la conception soit dangereux, soit trop prudents.

5.2.2 Étude de chargement transversal

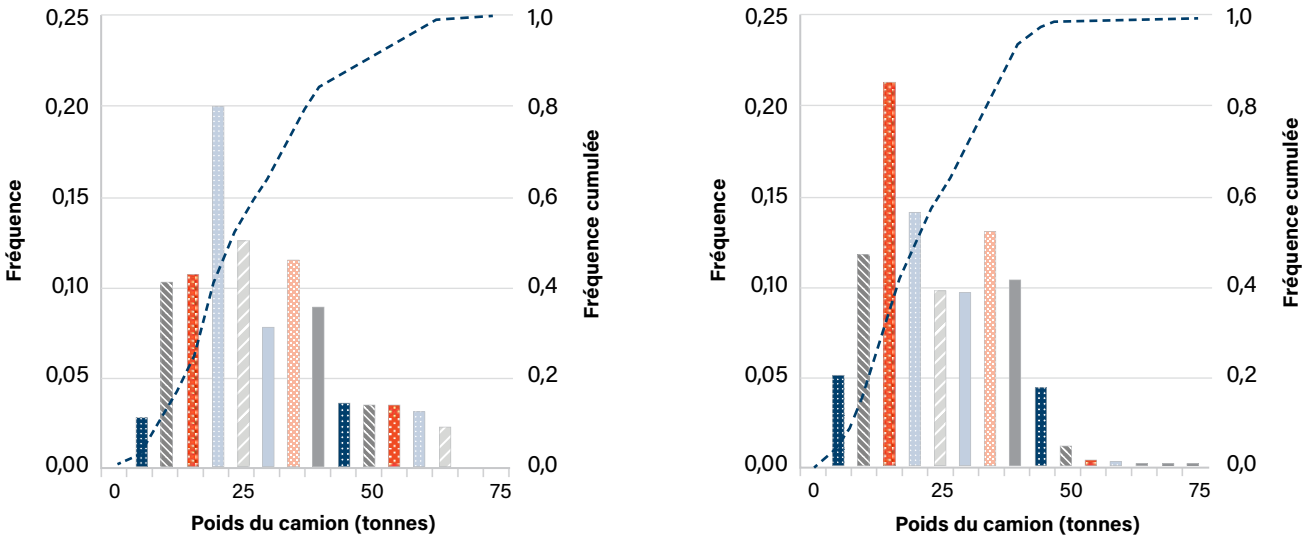
Le tableau 9 présente les résultats de l'étude de chargement transversal réalisée pour déterminer l'importance de l'emplacement de la ligne de roue sur la criticité de la bordure du cordon et de la racine de la soudure en termes de fatigue. Les résultats montrent que le cas 1 (figure 20a, charge centrée sur la nervure) entraîne une contrainte maximale au niveau de la bordure du cordon 84 % plus élevée que celle du cas 2 (figure 20b, charge centrée entre les nervures) et 5 % plus élevée que celle du cas 3 (figure 20c, charge centrée sur l'une des soudures entre la plaque de tablier et la nervure). Le cas 3 entraîne la contrainte la plus élevée à la racine, qui est supérieure de 42 % à celles des cas 1 et 2.

Seules des conclusions qualitatives peuvent être tirées des comparaisons entre les contraintes à la racine et à la bordure du cordon, car aucune courbe de fatigue n'a été recommandée pour la contrainte au point chaud au niveau de la racine de la soudure. La méthode de la contrainte à l'encoche est recommandée par l'AASHTO pour une telle comparaison, mais aucun modèle de courbe de contrainte à l'encoche n'est donné. Pour trouver un tel modèle de courbe, on pourrait se référer aux recommandations de l'IIW [24].

Table 9: Positions transversales variables d'une charge d'un modèle de camion canadien montrant les contraintes à la bordure du cordon et à la racine de la soudure

Contrainte au point chaud (MPa)			
	Cas 1	**Cas 2**	**Cas 3**
σ-bordure du cordon	30,5	16,3	29,0
σ-racine	21,7	21,8	31,0

Figure 21 : Comparaison des histogrammes du PBV pour l'Ontario (à gauche) et les États-Unis (à droite). Adapté de [54].



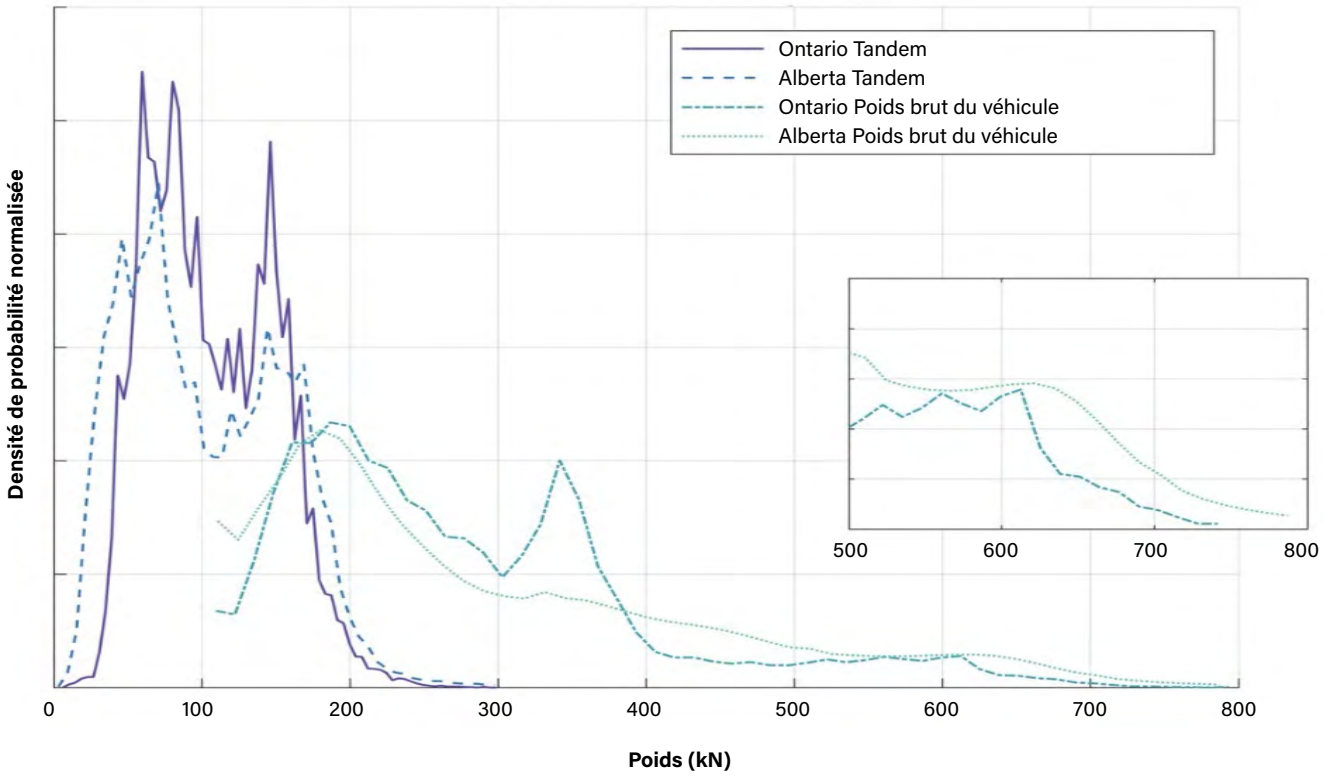
6 Analyse des données relatives au poids brut du véhicule et au poids de l'essieu tandem

Pour la vérification à la fatigue d'un système de TOA, la variation des contraintes de fatigue calculée correspond à celle causée par le passage d'un ensemble d'essieux tandem de 125 kN, espacés de 1,2 m (avec un espacement transversal de 1,8 m). Une comparaison des poids des essieux tandem entre les provinces serait intéressante dans ce contexte, étant donné que certaines provinces conçoivent les ponts en fonction d'un modèle de camion plus lourd, mais qu'actuellement, elles n'utilisent pas l'ensemble correspondant d'essieux tandem plus lourds pour la vérification locale des détails du tablier. Par exemple, l'Alberta utilise le camion CL-800 au lieu du camion CL-625 utilisé dans les autres provinces, et l'Ontario utilise un camion CL-625-ONT modifié. Deux bases de données de véhicules lourds, fournies par les ministères des Transports de chaque province, ont permis de comparer le PBV et le poids des essieux tandem, comme le montre la figure 22. Il convient de noter que la base de données de l'Alberta contient des données de pesée en mouvement recueillies de 2004 à 2022 à cinq endroits dans la province (plus de 62 millions de véhicules de plus de 10 tonnes), tandis que la base de données de l'Ontario provient d'un sondage réalisé en 2012 sur les véhicules arrêtés et pesés, et contient environ 40 000 véhicules de plus de 10 tonnes.

La figure 22 présente une comparaison du poids brut total des véhicules et du poids total des essieux tandem en Ontario et en Alberta. Les véhicules sont plus lourds en Alberta qu'en Ontario, comme la courbe plus haute et plus allongée l'indique au-delà de 600 kN. Les plafonds locaux correspondant aux véhicules vides et pleins sont plus évidents en Ontario, tandis que les véhicules pleins en Alberta se répartissent sur une plage de poids plus large.

D'après la figure 22, les poids des essieux tandem ne sont pas très différents entre les deux provinces. Cependant, le tableau 10 montre qu'en Alberta, les PBV sont plus importants dans les centiles élevés, bien que les PBV soient plus légers qu'en Ontario dans la médiane (50^{e} centile). Il faut faire attention lors de l'interprétation des extrêmes, car les données de l'Alberta proviennent de la pesée en mouvement, qui est plus sujette à la dispersion que les poids statiques du sondage de l'Ontario. Il convient également de noter que, pour ces calculs, les essieux de plus de 300 kN (plus du double de la limite légale) et de moins de 30 kN sont exclus

Figure 22 : Comparaison des histogrammes des PBV et des poids des essieux tandem en Ontario et en Alberta.



pour assurer une comparaison d'égal à égal dans la mesure du possible, et aussi parce que les charges à l'essieu supérieures à 300 kN peuvent être des mesures erronées dans certains cas.

Du point de vue de la fatigue, les centiles extrêmes peuvent ne pas être aussi importants qu'ils ne le seraient dans une vérification à l'état limite ultime. Un simple calcul utilisant les deux ensembles de données et une courbe de fatigue avec une pente m = 3 et aucune limite d'endurance indique que, lorsque les essieux sont mis à l'échelle pour donner un indice de dommage de 1,0 pour les essieux tandem en Ontario (en utilisant la somme de Miner), le dommage correspondant en Alberta est 15 % plus élevé à 1,15 (si le dommage est ajusté pour le même nombre de véhicules dans chaque province ; voir le tableau 11). La première rangée du tableau 11 montre les dommages de fatigue causés par deux essieux tandem de camion codés et de deux ensembles de données provinciales sur les essieux tandem, normalisés par l'indice de dommage des données provinciales de l'Ontario.

Le même calcul effectué en utilisant les PBV dans les deux bases de données révèle 36 % de dommages supplémentaires pour les véhicules en Alberta. Ce calcul simple est indépendant de la géométrie du pont et suppose un cycle de contrainte par véhicule égal au poids du véhicule à l'échelle. Le résultat indique que si les véhicules en Alberta sont globalement plus lourds et plus dommageables du point de vue de la fatigue, cela ne se reflète pas au même niveau dans les groupes d'essieux tandem. Cela suggère que le poids accru des véhicules albertains est probablement réparti sur un plus grand nombre d'essieux.

Une dernière comparaison est faite entre les indices de dommage des essieux tandem pour chaque position et celui de la norme CSA S6. Ce dernier a été fixé à 0,62 multiplié par deux essieux tandem de 125 kN, soit un total de 155 kN. Le dommage causé par le passage de l'essieu tandem normé, mis à l'échelle selon le nombre de passages pour le comparer aux autres bases de données, équivaut à 2,05, soit une augmentation de 105 %. Tous les calculs supposent que les deux

Tableau 10 : Comparaison des PBV et des poids des essieux tandem en Ontario et en Alberta

Centile	Essieux tandem en Ontario (kN)	Essieux tandem en Alberta (kN)	PBV en Ontario** (kN)	PBV en Alberta (kN)
50	100,1	99,1 (1 % ↓)	248	238 (4 % ↓)
95	176,6	188,4 (7 % ↑)	558	618 (11 % ↑)
99	206,2	224,6 (9 % ↑)	649	722 (11 % ↑)
99,9	246,6	282,5 (15 % ↑)	745	898 (21 % ↑)

Remarque : *les données de l'Alberta proviennent d'une pesée en mouvement et sont donc sujettes à une plus grande dispersion. Les flèches ↓↑ indiquent le sens de la différence entre les résultats de l'Ontario et ceux de l'Alberta. **PBV = poids brut du véhicule.*

Tableau 11 : Dommages relatifs causés par les essieux tandem (en haut) et les camions (en bas) en Ontario et en Alberta

	CSA S6 0,52 x 250 kN	CSA S6 0,62 x 250 kN	Dommage des essieux tandem en Ontario	Dommage des essieux tandem en Alberta
Essieux tandem	1,21	2,04	1,00	1,15

	CSA S6 0,52 x 625 kN	CSA S6 0,52 x 800 kN	Dommage du PBV** en Ontario	Dommage du PBV en Alberta
Camions	0,94	1,98	1,00	1,36

Remarque : *tous les indices de dommage sont comparés à ceux de l'Ontario et ajustés en fonction du nombre d'essieux tandem par véhicule. **PBV = poids brut du véhicule.*

essieux sont additionnés. L'effet de l'espacement de 1,2 m pour l'essieu tandem de la CSA, comparé à l'espacement plus important observé dans les deux bases de données, comme le montre la figure 23, ajouterait encore plus de prudence.

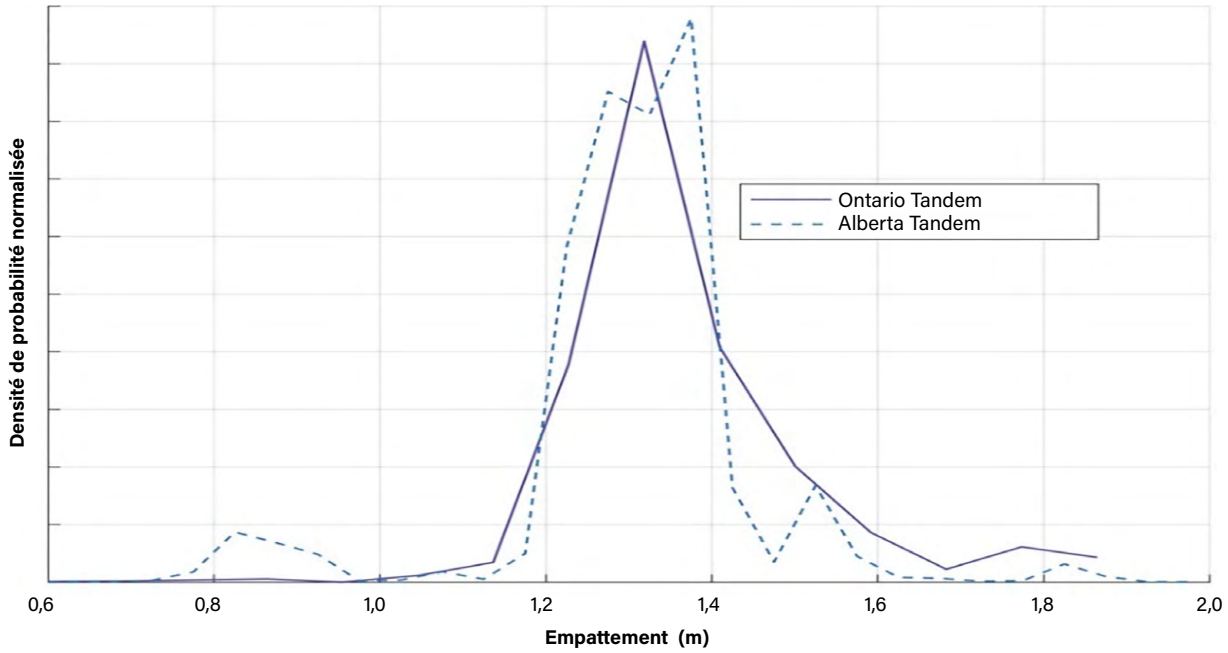
Le tableau 11 permet de conclure que la vérification actuelle à la fatigue selon la norme CSA S6 est prudente en exigeant un coefficient d'équivalence de dommage de 0,62 pour les tabliers et en échelonnant la contrainte pour évaluer la fatigue proportionnellement au poids du camion dans le calcul de l'état limite ultime. Toutefois, si l'on suppose que la vérification actuelle de la conception vis-à-vis de la fatigue est appropriée en Ontario et si l'on recherche une augmentation de 35,7 % des dommages causés par la fatigue par rapport au camion de la norme CSA S6, seule une augmentation de 625 à 692 ($= 1{,}357^{1/3} \cdot 625$) serait nécessaire. Cela signifie que quelque chose de plus léger que 800 kN (tel qu'un CL-700) pourrait être utilisé pour évaluer la fatigue en Alberta. De même, si une augmentation de 14,7 % des dommages causés par la fatigue était recherchée pour l'ensemble tandem de 125 kN de la norme CSA S6, il suffirait de passer de 125 à 131 ($= 1{,}147^{1/3} \cdot 125$). Bien que cela suggère qu'un tandem plus lourd soit nécessaire en Alberta, on pourrait faire valoir que le tandem de 125 kN n'est pas sous-estimé (il est inférieur de moins de 5 % à ce qu'il devrait être) et qu'il est donc acceptable de le conserver par souci de simplicité.

7 Conclusions

D'après les recherches présentées et discutées dans ce rapport, les conclusions suivantes peuvent être tirées.

- Bien qu'il existe un corpus considérable de connaissances sur le comportement à la fatigue des TOA, plusieurs lacunes subsistent, notamment en ce qui concerne les détails liés à la vérification de la racine de la soudure entre la nervure et le tablier. Surtout pour l'utilisation de la méthode de la contrainte à l'encoche et l'application d'une approche basée sur la performance pour évaluer les conséquences du non-respect des objectifs de pénétration lors de la réalisation de la soudure entre la nervure et le tablier.

Figure 23 : Comparaison des empattements des essieux tandem en Ontario et en Alberta.



- L'expérience du concepteur est inestimable pour la réussite de la conception d'un TOA. Il est essentiel de considérer les questions de durabilité et de constructibilité, en reconnaissant que les conceptions optimales ne sont généralement pas celles qui se contentent de minimiser les besoins en matériaux. Par exemple, des conceptions plus durables et plus économiques découlent souvent de l'utilisation d'une plaque de tablier plus épaisse pour réduire les déflexions et les coûts de fabrication.
- L'approche prescrite dans la norme CSA S6:19 aboutit à des déflexions calculées plus élevées pour les TOA que si le concepteur utilise uniquement le code de l'AASHTO. Cependant, cette différence peut être justifiée, étant donné les charges par camion et par essieu plus élevées qui pourraient être présentes dans le trafic canadien.
- L'approche prescrite dans la norme CSA S6:19 aboutit à des plages de contraintes de fatigue calculées pour les TOA plus élevées que si le concepteur utilise uniquement le code de l'AASHTO. Toutefois, cette différence peut également être justifiée, étant donné les caractéristiques plus sévères du parc de camions canadiens.
- La mise en œuvre de l'approche prescrite dans la norme CSA S6:19 pour la conception vis-à-vis de la fatigue des TOA pourrait entraîner des erreurs soit dangereuses, soit trop prudentes de la part des concepteurs qui ne connaissent pas les objectifs et les sources des différents coefficients requis (c.-à-d. les coefficients de charge, les coefficients d'équivalence de dommage et les tolérances de charge dynamique), en raison d'un manque de clarté concernant le moment où les différents coefficients s'appliquent.
- Les différences régionales de PBV extrêmes, qui pourraient conduire à la spécification de différents camions CL-W pour le calcul de l'état limite ultime, peuvent ne pas refléter avec précision les différences régionales dans les caractéristiques des dommages de l'ensemble du parc de camions. De plus, elles peuvent également dépasser les différences régionales au niveau des charges critiques sur les essieux tandem dans le calcul de l'état limite ultime et dans l'évaluation de la fatigue. De cette manière, s'il peut être souhaitable de prendre en compte les différences régionales (c.-à-d. interprovinciales) dans les caractéristiques de charge lors de la conception, lorsqu'il s'agit d'évaluer la fatigue d'éléments qui ont des lignes d'influence courtes comme les TOA, il peut être trop prudent de le faire en se basant uniquement sur une comparaison des PBV extrêmes pertinents pour le calcul de l'état limite ultime.

8 Recommandations pour la norme CSA S6:25

L'analyse documentaire, les résultats des sondages menés auprès de l'industrie, les résultats des analyses de déflexion et de fatigue, ainsi que d'autres contributions reçues dans le cadre de ce projet (p. ex., les contributions du comité consultatif du projet et des membres du comité de la norme CSA S6) ont permis de formuler les recommandations suivantes concernant les améliorations à apporter aux dispositions relatives aux TOA qui devraient être incorporées dans la norme CSA S6:25.

Recommandation 1. Les incohérences entre la norme CSA S6 et le code de l'AASHTO doivent être clarifiées.

Les incohérences entre la norme CSA S6 et les spécifications de conception du code de l'AASHTO devraient être clarifiées. Par exemple, les exigences en matière d'épaisseur minimale des plaques sont légèrement différentes d'une norme à l'autre. Comme ces exigences concernent principalement la durabilité contre la corrosion, l'épaisseur minimale spécifiée dans la norme CSA S6 (6 mm) est probablement plus appropriée pour les applications canadiennes. D'après les commentaires des fabricants, le choix de la plus petite épaisseur requise pour répondre aux exigences de résistance ne conduit pas toujours à la conception la plus économique, de sorte que cette exigence ne devrait pas être prohibitive si l'on veut s'assurer que des TOA économiques puissent être conçus au Canada.

Recommandation 2. Les limites de déflexion doivent être maintenues en dépit du modèle de camion plus lourd utilisé dans la norme CSA S6.

Bien que l'application des limites de déflexion spécifiées dans le code de l'AASHTO avec le modèle de camion utilisé dans la norme CSA S6 puisse conduire à exiger des systèmes de tabliers plus raides (10 à 50 % plus raides, en fonction de la portée et de l'exigence de déflexion correspondante), ces limites de déflexion devraient être maintenues. Cette recommandation se fonde sur le fait que les données publiques relatives au PBV pour les camions aux États-Unis et au Canada, ainsi que des données non publiées plus récentes non incluses dans le présent rapport, suggèrent qu'il existe une différence importante entre le poids des camions les plus lourds au Canada et aux États-Unis.

Comme les exigences de déflexion du code de l'AASHTO contribuent à assurer la durabilité de la couche de roulement du tablier, il n'y a peut-être pas lieu de les assouplir systématiquement. Toutefois, les recherches récentes sur la durabilité des couches de roulement sont insuffisantes, et de nouveaux systèmes de couches de roulement apparaissent. S'il est démontré que ces systèmes sont capables de supporter des déflexions cycliques plus importantes, un ensemble de limites de déflexion basées sur le rendement de la couche de roulement pourrait être mis au point à l'avenir.

Recommandation 3. La conception vis-à-vis de la fatigue des TOA dans la norme CSA S6 devrait utiliser l'empreinte des pneus canadiens.

Permettre d'utiliser l'empreinte des pneus canadiens considérée pour le calcul de l'état limite ultime (600 mm x 250 mm) plutôt que l'empreinte américaine afin d'évaluer la fatigue des TOA dans la norme CSA S6 pourrait présenter un avantage important, car cela permettrait de réaliser l'ensemble de la conception avec un seul modèle par éléments finis, en évitant le remaillage entre la vérification de la conception à l'état limite ultime et à l'état limite en service d'une part et la vérification de la conception à l'état limite de fatigue d'autre part.

Recommandation 4. La conception vis-à-vis de la fatigue devrait être basée sur la norme CSA S6, à l'exception de certains aspects de modélisation.

Pour plus de clarté en ce qui concerne le calcul des plages de contraintes dans l'évaluation de la fatigue, celle-ci devrait être effectuée conformément à la norme CSA S6, à l'exception des informations sur les aspects de modélisation (p. ex., le calcul de la largeur effective de la semelle) et les catégories de résistance des différents détails de fatigue, pour lesquels il convient de continuer de faire référence au code de l'AASHTO. Les catégories de détails en termes de fatigue du code de l'AASHTO (A, B, C, etc.) utilisent des courbes S-N similaires à celles des catégories de la norme CSA S6, tandis que la tolérance de charge dynamique, le coefficient d'équivalence de dommage et le coefficient de réduction pour l'estimation de la durée de vie infinie ont été établis sur la base des efforts de recherche et d'étalonnage canadiens et sont donc plus appropriés pour le trafic canadien.

Recommandation 5. La norme CSA S6:25 devrait ajouter la catégorie de détails de fatigue spéciale (C*).

L'AASHTO prévoit une catégorie de détails de fatigue spéciale (C*) pour les TOA pour lesquels la courbe S-N de résistance est définie à l'aide d'une fonction spéciale. La norme CSA S6 devrait intégrer cette fonction pour que ce détail de fatigue puisse être facilement traité à l'aide de la nouvelle approche de conception recommandée.

Recommandation 6. La catégorie de détails A devrait être utilisée pour la conception utilisant la méthode de la contrainte à l'encoche.

Pour la vérification à la fatigue de la racine de la soudure à PPJ de la plaque de tablier, l'AASHTO suggère d'utiliser la méthode de la contrainte à l'encoche, mais aucune courbe de résistance n'est définie. Une comparaison entre la courbe de calcul recommandée par l'IIW [24] et la catégorie de détails A de la norme CSA S6 montre que cette dernière est légèrement prudente. Il est donc recommandé d'utiliser la catégorie de détails A pour la méthode de la contrainte à l'encoche.

Recommandation 7. Une entrée est nécessaire dans le tableau 10.5 de la norme CSA S6 pour l'évaluation de la fatigue des TOA.

Dans le but d'utiliser la norme CSA S6 pour évaluer la fatigue des TOA, une nouvelle entrée est nécessaire dans le tableau 10.5, qui prescrit le nombre de cycles, N_d, par passage de camion pour la conception. Pour cette valeur, il est recommandé que la norme CSA S6 utilise la valeur correspondante dans le code de l'AASHTO, à savoir 5.0.

9 Besoins futurs en matière de recherche

Selon les recherches présentées et discutées dans ce rapport, les besoins futurs suivants en matière de recherche ont également été identifiés.

L'impact de la déflexion sur la durabilité de la couche de roulement doit faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Des recherches sur l'effet de la déflexion sur la durabilité de la couche de roulement sont justifiées, avec une attention particulière pour les nouveaux systèmes de couche de roulement et le climat canadien, ainsi que pour d'autres questions géographiques, comme l'effet du déneigement, des sels de déglaçage, etc.

Davantage de données sur le trafic sont nécessaires non seulement pour la recherche sur les TOA, mais aussi pour l'élaboration de futurs codes.

Une étude plus détaillée des données de pesée en mouvement disponibles dans diverses régions du Canada serait utile pour mieux comprendre les niveaux de sécurité offerts par le groupe d'essieux tandem actuellement utilisés pour évaluer la fatigue des TOA. À plus grande échelle, les mêmes questions pourraient être posées au sujet de la pratique actuelle consistant à mettre à l'échelle le modèle de camion pour la fatigue avec celui de l'état limite ultime. Cette recherche bénéficierait du soutien des ministères des Transports de tout le Canada.

De nouveaux systèmes de TOA pour les ponts de moyenne portée devraient être étudiés.

L'exploration du développement d'un nouveau système de TOA optimisé pour les ponts de moyenne portée serait bénéfique en tant que solution potentielle pour la construction rapide de ponts, les ponts d'urgence et la préfabrication de ponts à installer dans des endroits éloignés. Pour ce faire, il faudrait probablement que le système de TOA fonctionne en harmonie avec les poutres en acier pour parvenir à une conception économique.

Une approche basée sur le rendement pour l'évaluation du NPS serait bénéfique.

Il serait utile de poursuivre les recherches pour mieux comprendre l'impact du niveau de pénétration de la soudure sur la performance à la fatigue de la soudure entre la plaque de tablier et la nervure. Étant donné la difficulté d'obtenir un NPS précis et d'évaluer le NPS à l'aide de méthodes d'évaluation non destructives, une approche basée sur le rendement qui informe le concepteur du moment où un certain NPS est acceptable en termes de fatigue pourrait contribuer à améliorer la durabilité et aussi à réduire le coût de fabrication.

Cette recherche devrait être étendue à d'autres détails de fatigue dans les systèmes de TOA.

Il peut être justifié de procéder à un examen de l'état des connaissances et d'étudier la performance à la fatigue des détails de soudure communs aux TOA autres que la soudure entre la plaque de tablier et la nervure, comme les détails de liaison complexes qui sont nécessaires autour des liaisons entre la poutre de plancher et la nervure.

Il est nécessaire de développer davantage les dispositions et l'expertise canadiennes en matière de conception de TOA.

Des efforts continus sont recommandés pour développer l'expertise en termes de conception de TOA au Canada, dans le but d'élaborer un ensemble complet de spécifications relatives à la conception pour le prochain cycle de révision de la norme CSA S6. Ces efforts permettraient de s'assurer que les questions spécifiques à la région concernant la fabrication, les conditions environnementales d'utilisation, la charge de trafic, etc. sont correctement prises en compte dans les futures éditions de la norme.

Références

[1] R. Connor et coll., "Manual for design, construction, and maintenance of orthotropic steel deck bridges," Federal Highway Administration, Washington, DC, États-Unis, Rep. No. FHWA-IF-12-027, 2012. [En ligne]. Disponible: https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/if12027/if12027.pdf

[2] Association canadienne de normalisation Code canadien sur le calcul des ponts routiers, CSA S6:19, Toronto, Ontario, 2019. [En ligne] https://www.csagroup.org/fr/store/product/CSA%20S6%3A19/

[3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2020. [En ligne]. Disponible: https://store.transportation.org/item/collectiondetail/202

[4] C. Seim et T. Ingham, "Influence of wearing surfacing on performance of orthotropic steel plate decks," *Transp. Res. Rec.,* vol. 1892, no. 1, pp. 98–106, 2004, https://doi.org/10.3141/1892-11.

[5] J. L. Hulsey, L. Yang, et L. Raad, "Wearing surfaces for orthotropic steel bridge decks," *Transp. Res. Rec.,* vol. 1654, no. 1, pp. 141–150, 1999, https://doi.org/10.3141/1654-17.

[6] J. Dahlberg et coll., "Guide for orthotropic steel deck level 1 design," Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, Rep. No. FHWA-HIF-22-056, 2022. [En ligne]. Disponible : https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/hif22056.pdf

[7] D. Wang, C. Xiang, Y. Ma, A. Chen, et B. Wang, "Experimental study on the root-deck fatigue crack on orthotropic steel decks," *Mater. Des.*, vol. 203, mai 2021, art. no. 109601, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109601.

[8] B. Ji, R. Liu, C. Chen, H. Maeno, et X. Chen, "Evaluation on root-deck fatigue of orthotropic steel bridge deck," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 90, pp. 174–183, 2013, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.07.036.

[9] Z.-G. Xiao, K. Yamada, S. Ya, et X.-L. Zhao, "Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks," *Int. J. Fatigue,* vol. 30, no. 8, août 2008, pp. 1387–1397, https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.10.008.

[10] Q. Zhang, Y. Bu, et Q. Li, "Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck," China *J. Highw. Transp.,* no. 3, pp. 14–39, 2017. https://www.researchgate.net/publication/317779510

[11] S. Ya, K. Yamada, et T. Ishikawa, "Fatigue evaluation of rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck," *J. Bridge Eng.,* vol. 16, no. 4, pp. 492–499, 2011, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000181.

[12] K. Yamada et S. Ya, "Plate bending fatigue tests for root crack of trough rib of orthotropic steel deck," *J. Struct. Eng.,* A, vol. 54A, pp. 675–684, 2008, https://doi.org/10.11532/structcivil.54A.675.

[13] Z. Fu, B. Ji, C. Zhang, et D. Li, "Experimental study on the fatigue performance of roof and U-rib welds of orthotropic steel bridge decks," KSCE J. Civ. Eng., vol. 22, pp. 270–278, 2018, https://doi.org/10.1007/s12205-017-1725-0.

[14] M. Li, Y. Suzuki, K. Hashimoto, et K. Sugiura, "Experimental study on fatigue resistance of rib-to-deck joint in orthotropic steel bridge deck," *J. Bridge Eng.,* vol. 23, no. 2, 2018, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001175.

[15] W. Nagy, "Fatigue assessment of orthotropic steel decks based on fracture mechanics," Ph.D. thesis, [En ligne] Faculté d'ingénierie et d'architecture, Université de Gand, Gand, Belgique 2017. Disponible: http://hdl.handle.net/1854/LU-8540667

[16] S. Kainuma, M. Yang, Y.-S. Jeong, S. Inokuchi, A. Kawabata, et D. Uchida, "Experiment on fatigue behavior of rib-to-deck weld root in orthotropic steel decks," *J. Constr. Steel Res.,* vol. 119, pp. 113–122, mars 2016, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.11.014.

[17] H.-B. Sim, et C.-M. Uang, "Stress analyses and parametric study on full-scale fatigue tests of rib-to-deck welded joints in steel orthotropic decks," *J. Bridge Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 765–773, 2012, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000307.

[18] S. Kainuma, M. Yang, Y.-S. Jeong, S. Inokuchi, A. Kawabata, etD. Uchida, "Experimental investigation for structural parameter effects on fatigue behavior of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks," *Eng Fail Anal,* vol. 79, septembre 2017, pp. 520–537, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.028.

[19] M. H. Kolstein, "Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks," Ph.D. thesis, [En ligne] Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, Pays-Bas, 2007. Disponible: http://resolver.tudelft.nl/uuid:a7bb8daa-930b-405d-af60-8fbfb7c4119b

[20] H. Yang, P. Wang, H. Qian, et P. Dong, "Fatigue performance of different rib-to-deck connections using traction structural stress method," *Appl. Sci.,* vol. 10, no. 4, 2020, art. no. 1239, https://doi.org/10.3390/app10041239.

[21] J. W. Fisher et J. M. Barsom, "Evaluation of cracking in the rib-to-deck welds of the Bronx–Whitestone Bridge," *J. Bridge Eng.*, vol. 21, no. 3, 2016, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000823.

[22] S. Kainuma, M. Yang, Y.-S. Jeong, S. Inokuchi, A. Kawabata, et D. Uchida, "Fatigue behavior investigation and stress analysis for rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks," *Int. J. Steel Struct.,* vol. 18, no. 2, pp. 512–527, 2018, https://doi.org/10.1007/s13296-018-0067-1.

[23] H.-B. Sim, C.-M. Uang, et C. Sikorsky, "Effects of fabrication procedures on fatigue resistance of welded joints in steel orthotropic decks," *J. Bridge Eng.,* vol. 14, no. 5, 2009, https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2009)14:5(366).

[24] A. F. Hobbacher, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (IIW doc. XIII-1539-96/XV-845-96), Gênes, Italie, International Institute of Welding, 2002. 150 p.

[25] CEN-CENELEC. Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 2: Steel Bridges, EN 1993-2, Comité européen de normalisation, Bruxelles, Belgique, 2006. 105 p.

[26] B. Cao, Y. Ding, F. Geng, et A. Li, "Parametric study and fatigue life evaluation using effective notch stress approach for rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 35, no. 3, 2021, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001584.

[27] C. Xiang, D. Wang, B. Wang, A. Chen, et R. Ma, "Numerical simulation of root-deck crack propagation of orthotropic steel bridge deck," *Struct. Infrastruct. E.,* vol. 18, no. 7, pp. 1076–1090, 2022, https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2039219.

[28] W. Wu, H. Kolstein, et M. Veljkovic, "Fatigue resistance of rib-to-deck welded joint in OSDs, analyzed by fracture mechanics," *J Constr. Steel Res,* vol. 162, nov. 2019, art. no. 105700, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105700.

[29] X. Ju et K. Tateishi, "Fatigue crack behavior at rib-to-deck weld bead in orthotropic steel deck," *Adv. Struct. Eng.,* vol. 17, no. 10, pp. 1459–1468, 2014, https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.10.1459.

[30] J. Janss, "Fatigue of welds in orthotropic bridge deck panels with trapezoidal stiffeners," *J Constr. Steel Res*, vol. 9, no. 2, pp. 147–154,1988, https://doi.org/10.1016/0143-974X(88)90005-3.

[31] R. Wolchuk, "Structural behaviour of surfacings on steel orthotropic decks and considerations for practical design," *Struct. Eng. Int.,* vol. 12, no. 2, pp. 124–129, 2002, https://doi.org/10.2749/101686602777965586.

[32] R. J. Connor, "Influence of cutout geometry on stresses at welded rib-to-diaphragm connections in steel orthotropic bridge decks," *Transp. Res. Rec.,* vol. 1892, no. 1, pp. 78–87, 2004, https://doi.org/10.3141/1892-09.

[33] F. B. P. de Jong, "Overview fatigue phenomenon in orthotropic bridge decks in the Netherlands," in Proc. Orthotropic Bridge Conference, Sacramento, CA, États-Unis, août 2004, pp. 489–512.

[34] M. S. Pfeil, R. C. Battista, et A. J. R. Mergulhão, "Stress concentration in steel bridge orthotropic decks," *J Constr. Steel Res,* vol. 61, no. 8, pp. 1172–1184, août 2005, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.02.006.

[35] Z.-G. Xiao, K. Yamada, J. Inoue, et K. Yamaguchi, "Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck," *Int. J. Fatigue,* vol. 28, no. 4, pp. 409–416, avril 2006, https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.017.

[36] J.-H. Choi et D.-H. Kim, "Stress characteristics and fatigue crack behaviour of the longitudinal rib-to-cross beam joints in an orthotropic steel deck," *Adv. Struct. Eng.,* vol. 11, no. 2, pp. 189–198, 2008, https://doi.org/10.1260/136943308784466224.

[37] C.-K. Oh, K.-J. Hong, D. Bae, H. Do, et T. Han, "Analytical and experimental studies on optimal details of orthotropic steel decks for long span bridges," *Int. J. Steel Struct.,* vol. 11, pp. 227–234, 2011, https://doi.org/10.1007/s13296-011-2010-6.

[38] B. M. Kozy, R. J. Connor, D. Paterson, et D. R. Mertz, "Proposed revisions to AASHTO-LRFD Bridge Design Specifications for orthotropic steel deck bridges," *J. Bridge Eng.,* vol. 16, no. 6, pp. 759–767, 2011, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000214.

[39] J. Maljaars, F. Van Dooren, et H. Kolstein, "Fatigue assessment for deck plates in orthotropic bridge decks," *Steel Construction,* vol. 5, no. 2, pp. 93–100, juin 2012, https://doi.org/10.1002/stco.201210011.

[40] E. Bocci et F. Canestrari, "Analysis of structural compatibility at interface between asphalt concrete pavements and orthotropic steel deck surfaces," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2293, no. 1, pp. 1–7, 2012, https://doi.org/10.3141/2293-01.

[41] T. W. Kim, J. Baek, H. J. Lee, et S. Y. Lee, "Effect of pavement design parameters on the behaviour of orthotropic steel bridge deck pavements under traffic loading," *Int. J. Pavement Eng.,* vol. 15, no. 5, pp. 471–482, 2014, https://doi.org/10.1080/10298436.2013.839790.

[42] R. Liu, Y. Liu, B. Ji, M. Wang, et Y. Tian, "Hot spot stress analysis on rib-deck welded joint in orthotropic steel decks," *J. Constr. Steel Res.,* vol. 97, pp. 1–9, 2014, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.01.012.

[43] R. Liu, B. Wang, et Y. Liu, "Distortion induced fatigue of deck plate at rib intersection with diaphragm in orthotropic steel deck," *Int. J. Steel Struct.,* vol. 15, pp. 623–632, 2015, https://doi.org/10.1007/s13296-015-9009-3.

[44] K. Yokozeki et C. Miki, "Fatigue evaluation for longitudinal-to-transverse rib connection of orthotropic steel deck by using structural hot spot stress," *Weld. World,* vol. 60, pp. 83–92, 2016, https://doi.org/10.1007/s40194-015-0272-x.

[45] S. Teixeira de Freitas, H. Kolstein, et F. Bijlaard, "Fatigue assessment of full-scale retrofitted orthotropic bridge decks," *J. Bridge Eng.,* vol. 22, no. 11, 2017, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001115.

[46] B. Fuštar, I. Lukačević, et D. Dujmović, "Review of fatigue assessment methods for welded steel structures," *Adv. Civ. Eng.,* vol. 2018, art. no. 3597356, https://doi.org/10.1155/2018/3597356.

[47] Saifaldien-Shakir et F. Alemdar, "Experimental study of fatigue crack behavior of rib-to-rib butt welded connections in orthotropic steel decks," *Lat. Am. J. Solids Struct*., vol. 15, no. 10, pp. 1–19, 2018, https://doi.org/10.1590/1679-78255259.

[48] H. Yang, H. Qian, P. Wang, et P. Dong, "Analysis of fatigue behavior of welded joints in orthotropic bridge deck using traction structural stress," *Adv. Mech. Eng.,* vol. 11, no. 11, 2019, https://doi.org/10.1177/1687814019890217.

[49] M. Zhuang, C. Miao, et R. Chen, "Analysis for Stress characteristics and structural parameters optimization in orthotropic steel box girders based on fatigue performance," *KSCE J. Civil Eng.,* vol. 23, pp. 2598–2607, 2019, https://doi.org/10.1007/s12205-019-1618-5.

[50] H. de Backer, A. Outtier, W. Nagy, et P. Van Bogaert, "Influence of wearing courses on fatigue life of orthotropic bridge decks," in Proc. 3rd Orthotropic Bridge Conference, Sacramento, CA, États-Unis, juin 2013, pp. 301–312. [Online] Disponible: https://www.researchgate.net/publication/269101059

[51] H. Zhang, Y. Liu, et Y. Deng, "Fatigue crack assessment for orthotropic steel deck based on compound Poisson process," *J. Bridge Eng.,* vol. 25, no. 8, 2020, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001575.

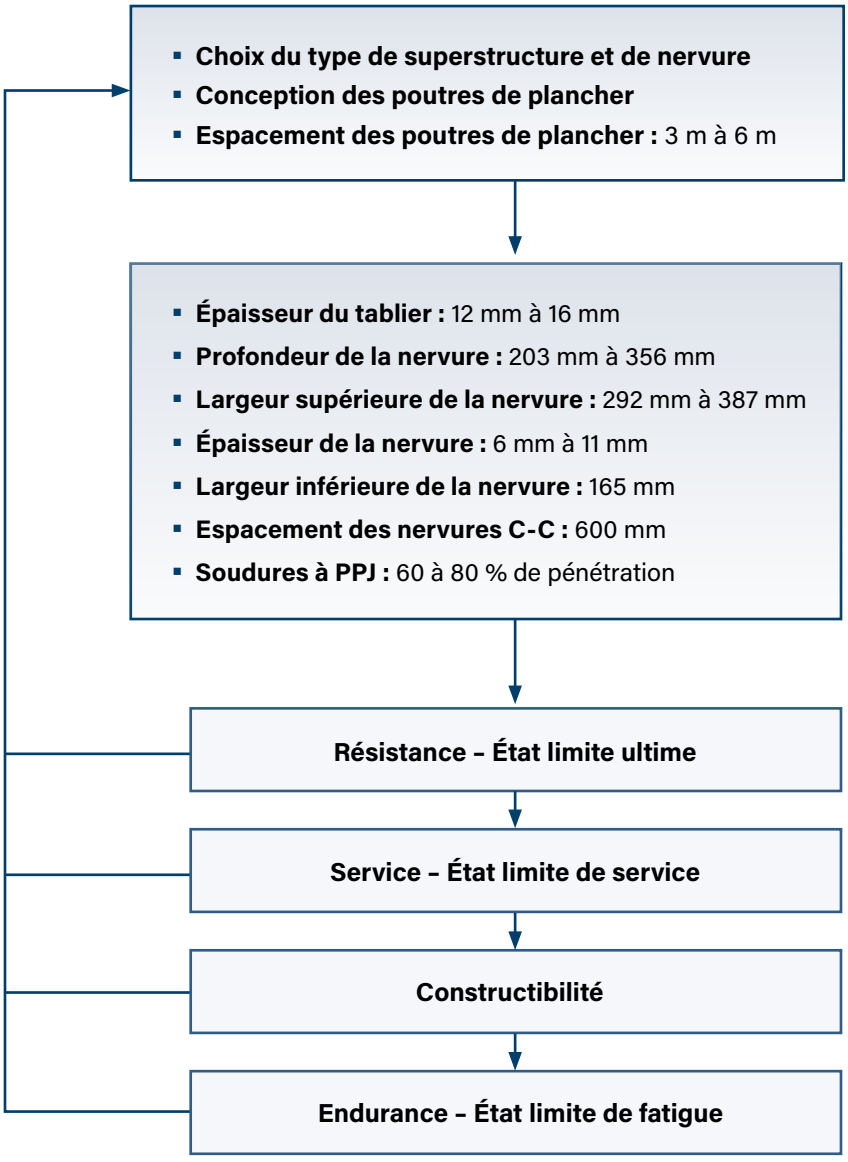
[52] J. Di, X. Ruan, X. Zhou, J. Wang, et X. Peng, "Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks based on strain monitoring data," *Eng. Struct,* vol. 228, Feb. 2021, art. no. 111437, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111437.

[53] J. Di, J. Wang, X. Zhou, X. Peng, et F. Qin, "Fatigue Behavior of rib-to-floor beam junctions with separate inner stiffeners in orthotropic steel bridge decks," *J. Bridge Eng.,* vol. 27, no. 5, 2022, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001857.

[54] R. Coughlin et S. Walbridge, "Fatigue correction factors for welded aluminum highway structures," *Can. J. Civ. Eng.,* vol. 38, no. 10, pp. 1082–1091, 2011, https://doi.org/10.1139/l11-070.

[55] J. M. Ocel, B. Cross, W. J. Wright, et H. Yuan, "Optimization of rib-to-deck welds for steel orthotropic bridge decks," Federal Highway Administration, Washington, DC, États-Unis, Rep. No. FHWA-HRT-17-020, 2017. [En ligne]. Disponible: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/17020/17020.pdf

Annexe 1 – Organigramme proposé pour la conception de TOA



Remarque : *Organigramme pour la conception de TOA adapté de [1].*
Les sections fermées à cellule unique constituent la meilleure solution pour faciliter l'inspection des soudures entre la nervure et le tablier.
L'augmentation de l'espacement des poutres de plancher nécessite moins d'intersections coûteuses entre la nervure et la poutre de plancher. Il est difficile de contrôler les contraintes de fatigue à ces intersections pour des nervures de longues portées.
Une plus grande épaisseur de tablier améliore la performance à la fatigue, 16 mm étant l'épaisseur optimale.
L'utilisation de nervures plus larges améliore la performance à la fatigue.
Des épaisseurs de nervure plus importantes réduisent le risque de percée et de fusion, et favorisent un soudage homogène.

Recherche du Groupe CSA

Dans le but de favoriser l'adoption de solutions normatives fondées sur le consensus afin d'accroître la sécurité et de favoriser l'innovation, le Groupe CSA soutient et effectue des recherches dans des domaines qui visent les industries nouvelles ou émergentes ainsi que sur des sujets et des questions qui touchent une vaste gamme de parties prenantes actuelles et potentielles. Les résultats de nos programmes de recherche étaieront l'élaboration de solutions normatives futures, ils offriront aux industries des directives provisoires sur la conception et l'adoption de nouvelles technologies et ils contribueront à démontrer notre engagement continu envers l'édification d'un monde meilleur, plus sécuritaire et plus durable.

GROUPE CSA[MC]

© 2024 Association canadienne de normalisation et l'Université de Waterloo. Tous droits réservés.