

## RAPPORT – ÉBAUCHE

### Ministère des Transports Examen technique indépendant du pont de la rivière Nipigon

Pont de la rivière Nipigon  
Région du Nord-Ouest  
N° de contrat : 2013-6000



**Septembre 2016**



## CONFIDENTIALITÉ ET © DROITS D'AUTEUR

Le présent document est uniquement destiné à l'usage du destinataire et d'Associated Engineering (Ont.) Ltd. Il contient des renseignements de nature exclusive et confidentielle qui ne peuvent être reproduits de quelque façon que ce soit ni faire l'objet d'une divulgation ou d'une discussion auprès de toute autre partie sans l'autorisation écrite expresse d'Associated Engineering (Ont.) Ltd. Les renseignements contenus dans le présent document doivent être considérés comme étant la propriété intellectuelle d'Associated Engineering (Ont.) Ltd. conformément à la *Loi sur le droit d'auteur* du Canada.

Le présent rapport a été préparé par Associated Engineering (Ont.) Ltd. dans le cadre de Ministry of Transportation Independent Technical Review. Son contenu témoigne du meilleur jugement d'Associated Engineering (Ont.) Ltd. à la lumière des renseignements dont elle disposait au moment de la préparation. La responsabilité de toute utilisation du présent document ou de toute décision fondée sur ce dernier par un tiers revient à ce dernier. Associated Engineering (Ont.) Ltd. n'accepte aucune responsabilité au titre de tout dommage subi par un tiers du fait de l'utilisation de ce rapport ou de toute décision fondée sur son contenu.

## Résumé

Le présent rapport a été préparé par Associated Engineering (Ont.) Ltd. (AE) pour le ministère des Transports de l'Ontario (MTO) afin de fournir un examen technique indépendant et des commentaires sur la défaillance des boulons de la plaque d'appui du pont de la rivière Nipigon survenue dans l'après-midi du 10 janvier 2016.

Il s'agit d'un pont à haubans à deux travées comportant une travée d'approche plus courte et une travée principale plus longue, ce qui crée une tension de soulèvement permanente dans les appareils d'appui à la culée ouest. De nombreux ponts à haubans présentent une tension de soulèvement similaire.

Au cours de l'après-midi du dimanche 10 janvier 2016, le pont de la rivière Nipigon sur la route 11/17, un tronçon de la route transcanadienne dans le Nord-Ouest de l'Ontario, est devenu infranchissable à la suite de la rupture complète des 40 boulons reliant l'ensemble d'arrimage à l'aile inférieure de la poutre maîtresse sur l'appareil d'appui nord-ouest du pont. La température enregistrée l'après-midi de la défaillance était de -16 °C et le vent soufflait du nord à environ 27 km/h.

Dès que les boulons se sont rompus, le déséquilibre de poids des travées, agissant par les câbles d'étais, a provoqué le soulèvement de l'extrémité nord-ouest du tablier du pont, celle-ci s'arrêtant à environ 600 mm au-dessus du niveau de la route. Il n'y a pas eu de défaillance au niveau de l'appareil d'appui centre-ouest, ce qui a limité les dommages au pont.

Le nouveau pont à quatre voies est construit en deux étapes; la moitié du pont était terminée et ouverte à la circulation au moment de la défaillance. Aucune blessure n'a été signalée chez les usagers ou les travailleurs du pont. La route transcanadienne a été fermée à toute circulation pendant environ 17 heures alors que l'on mettait en œuvre des mesures d'urgence afin d'abaisser le pont au niveau de la chaussée, ce qui a permis de rétablir la circulation sur une voie. Au cours des semaines suivantes, deux ensembles d'arrimage temporaires indépendants ont été installés à la culée ouest afin de permettre une circulation sécuritaire à deux voies sur le pont.

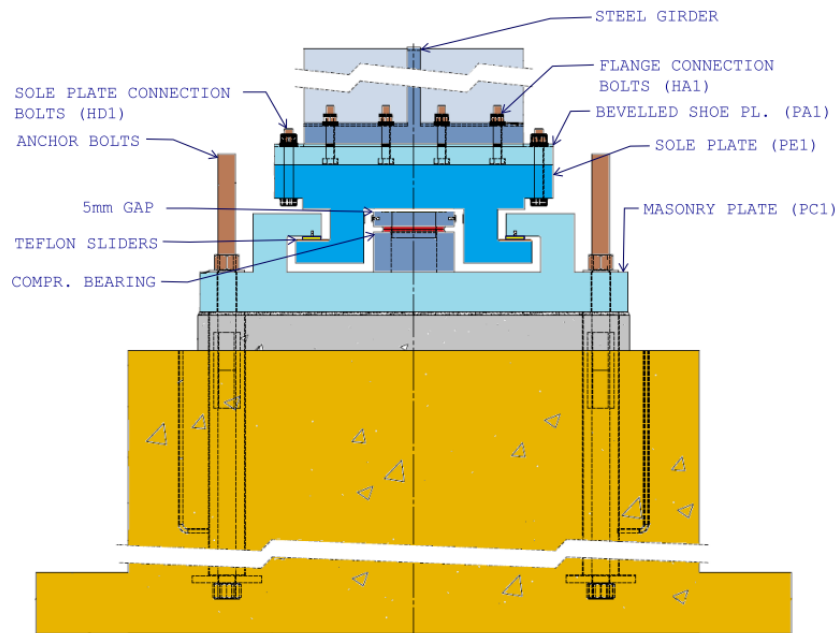


**Figure 1-1 : Pont de la rivière Nipigon – soulèvement de 600 mm du bord nord du pont à la culée ouest le 10 janvier 2016**

La défaillance de l'ensemble d'arrimage a été causée par une rupture progressive des 40 boulons (ASTM-A490) raccordant l'appareil d'appui à l'aile de la poutre maîtresse au cours des semaines et des mois précédant le bris complet du groupe de boulons. Bien que la défaillance du groupe de boulons fut immédiatement apparente (comme on peut le voir sur la figure 1-2), la nature progressive de la rupture des boulons et les facteurs contributifs ont été déterminés au moyen d'un examen et d'un essai des boulons défailants, ainsi que par des analyses et des évaluations décrites dans le présent rapport.



**Figure 1-2 : Boulons rompus (boulons ASTM A490 reliant la plaque semelle à l'aile de la poutre maîtresse) et plaque semelle déformée à l'appareil d'appui ouest. Noter les quatre rangées de boulons de raccordement d'aile défailants.**



**Figure 1-3 : Nomenclature de l'appareil d'appui**



**Figure 1-4 : Appareil d'appui centre-ouest en place. On aperçoit la plaque semelle biseautée entre l'aile de la poutre maîtresse et la plaque semelle de l'appareil d'appui.**

Les principales conclusions du présent rapport comprennent ce qui suit :

1. La rupture des boulons découle d'un processus de rupture par fatigue à faible cycle progressif induit par des changements cycliques dans les tensions des boulons en combinaison avec une flexion des boulons localisée. Les boulons étaient soumis à un effort de traction dans le domaine plastique et à des cycles répétés liés à une circulation de camions relativement lourds, mais respectant le poids légal pour les routes, ainsi qu'à d'autres demandes au cours de la période de 42 jours suivant l'ouverture du pont à la circulation. Comme il est résumé ci-dessous, le matériau des boulons satisfaisait aux spécifications et n'a pas été fragilisé par des enduits ou des températures froides.
2. Les forces et les déformations dans les deux rangées extérieures de boulons ont été augmentées considérablement par la flexibilité de la plaque semelle biseautée et les forces d'arrachement connexes entre l'appareil d'appui et l'aile de la poutre maîtresse. Outre la flexibilité de la plaque semelle, des déformations par flexion et des déformations plastiques se sont également produites dans la plaque semelle durant la propagation de la rupture des boulons. La flexion était évidente dans la courbure permanente de la plaque à la suite du bris. Les forces d'arrachement et le comportement plastique dans la plaque semelle ont contribué à accroître les déformations dans les boulons et à faire progresser la rupture des boulons.
3. Lorsqu'ils agissent durant un soulèvement, la rigidité et le manque de capacité de rotation des ensembles d'arrimage augmentent les forces et les déformations des boulons en raison des déformations imposées par la superstructure du pont. Les excentricités des forces résultantes, soit longitudinalement et transversalement à l'intérieur de l'appareil d'appui, ont contribué à la redistribution des forces dans le groupe de boulons. L'appareil d'appui n'a pas été en mesure de répondre aux demandes spécifiées ou en service; il n'a pas pu isoler les groupes de boulons de ces demandes ni fournir une capacité adéquate pour l'amplification des forces et des déformations dans le raccord boulonné entre l'aile et l'appareil d'appui.
4. Deux types de propagation superficielle de défaillance ont été signalés par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et le laboratoire Surface Science Western (SSW). Un type superficiel de défaillance

présentait des stries progressant à partir des deux côtés d'un boulon vers une rupture ductile éventuelle de la région centrale, et l'autre présentait des stries progressant à partir d'un côté, menant également à une rupture ductile finale des boulons sous haute tension. Ces motifs indiquent qu'une flexion s'est également produite dans de nombreux boulons. La plupart des boulons présentaient des fissures évidentes par fatigue à faible cycle. Les demandes et la propagation de la rupture des boulons ont été influencées par plusieurs facteurs à différentes étapes de la progression de la défaillance des 40 boulons. Ces facteurs comprennent des déformations élevées dues à la traction, une flexion horizontale alternante cyclique des boulons dans les deux rangées de boulons externes et une propagation de la rupture principalement d'un côté dans la rangée de boulons internes.

5. Les boulons ASTM A490 raccordant les ailes de la poutre maîtresse aux appareils d'appui de la culée ouest n'ont pas été prétendus (serrés) durant l'installation des appareils d'appui. De plus, les boulons fournis étaient trop longs, les longueurs des filets étaient plus courtes que ce qui est habituellement utilisé pour cette longueur de boulon et des rondelles plates temporaires ont été utilisées en tant que mesure provisoire pour permettre la correspondance du filetage des écrous et des boulons durant l'installation. Le *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* exige que les boulons à haute résistance dans ce type de raccord soient prétendus (serrés). Cela aurait permis de créer une pression de serrage importante entre les plaques raccordées réduisant les déformations axiales cycliques dans les boulons soumis aux charges de service. Pourvu que les charges appliquées n'excèdent pas les pré-tensions des boulons, les déformations dans ces derniers devraient demeurer presque constantes et une rupture par fatigue pourrait être évitée. Le manque de pré-tension a également permis à la plaque semelle et à l'aile de la poutre maîtresse de glisser horizontalement, ce qui a permis aux forces de cisaillement horizontales s'exerçant en travers des appareils d'appui de passer aux boulons. Les surfaces polies sur les côtés de nombreux boulons montrent clairement qu'un glissement s'est produit. Ces forces de cisaillement auraient été faibles si le PTFE avait fonctionné correctement comme prévu, mais elles augmentent avec un accroissement de la friction du PTFE endommagé. Notre évaluation démontre qu'une flexion de boulon suffisante peut être générée à partir de ce mécanisme même avec une légère augmentation de la friction du PTFE. Le manque de pré-tension signifie également que les forces et les déformations initiales dans divers boulons ne sont pas uniformes ni prévisibles et peuvent permettre à d'autres effets secondaires de se produire.
6. Des essais indépendants des boulons menés par le CNRC et le laboratoire SSW ont permis de conclure que les boulons satisfaisaient aux spécifications du projet et du *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* en matière de matériaux, de résistance, de ductilité et de ténacité à basse température. Les boulons satisfaisaient aux exigences de ténacité à basse température les plus rigoureuses requises pour un pont au Canada. Le revêtement était approprié pour des boulons ASTM-A490 et n'a pas altéré de manière importante leur ductilité ou autres propriétés.
7. L'analyse par éléments finis globale du pont a confirmé que la force de soulèvement sur l'appareil d'appui nord-ouest avant la défaillance était de l'ordre de 1 720 kN pour les charges permanentes seulement, ce qui correspondait généralement à la conception. Toutefois, selon nos résultats d'analyse et contrôles de conception, les appareils d'appui de la culée ouest n'ont pas été en mesure de résister aux charges de soulèvement de service ou de rupture (pondérées), ainsi qu'aux autres demandes spécifiées dans les dessins joints au contrat du pont, tout en respectant les exigences nominales au sein du *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. La conception des appareils d'appui n'était pas conforme aux exigences du contrat.

8. Le passage de poids lourds, mais dont le poids était légal, sur le pont conjointement avec l'absence de parallélisme des appareils d'appui attribuable aux méthodes d'installation serait suffisant pour causer des déformations permanentes (déformations plastiques) dans les boulons découlant des réactions de soulèvement changeantes et des forces axiales exercées sur les boulons critiques à l'appareil d'appui nord-ouest. Les permis de poids excédentaire délivrés par le MTO indiquent qu'un peu moins de 90 camions de plus de 60 tonnes (le poids d'un camion conçu selon un code) auraient traversé le pont. Le passage de ces véhicules serait suffisant pour contribuer à l'accumulation des ruptures par fatigue à faible cycle des boulons. Le nombre de poids lourds traversant le pont est du même ordre que le nombre de cycles de propagation des fissures observés dans les stries sur la surface de rupture de certains des boulons.
9. Les effets du vent fondés sur la conception (pour une période de retour relativement courte de dix ans, comme celle utilisée habituellement pour les demandes de construction de pont) ont été analysés et on a constaté qu'ils augmentaient les forces de soulèvement d'environ 10 % de la réaction causée par le propre poids du pont. Cela n'est pas suffisant pour contribuer de manière importante à l'accumulation de déformations plastiques dans les boulons. Il est peu probable que le pont ait été soumis à des vents aussi considérables avant la défaillance. Ainsi, il est improbable que les effets du vent aient joué un rôle important dans la défaillance de l'appareil d'appui.
10. Les effets des basses températures (raccourcissement des câbles, raccourcissement et déformation du tablier) ont été analysés et on a constaté également qu'ils augmentent les forces de soulèvement d'environ 10 %. Ces augmentations seraient survenues conjointement avec les effets du passage des camions, à la fois pour le soulèvement et les déformations à l'appareil d'appui nord-ouest, et pourraient avoir accéléré, mais pas modifié de manière importante, le mécanisme de défaillance du pont. Les déformations axiales induites thermiquement dans la superstructure du pont auraient également modifié les forces de cisaillement dans l'appareil d'appui nord-ouest, comme il est décrit ci-dessus, et auraient contribué aux propagations des fissures des boulons.
11. Les deux appareils d'appui de la culée ouest fournis ont été conçus de manière à avoir les mêmes capacités de soulèvement nominales. L'appareil d'appui nord-ouest a cédé, contrairement à l'appareil centre-ouest. L'appareil d'appui nord-ouest comporte des demandes de soulèvement plus élevées à cette étape-ci de la construction que l'appareil centre-ouest, mais ce dernier aura environ deux fois la réaction de soulèvement de l'appareil nord-ouest une fois le pont achevé. Ces charges plus élevées à la poutre maîtresse centrale ont régi le choix des appareils d'appui. L'appareil d'appui nord-ouest ayant cédé sous des demandes correspondant à seulement la moitié de ses demandes nominales maximales indique que la capacité de l'appareil telle que modifiée par l'installation était substantiellement déficiente. Plusieurs conditions au niveau des deux appareils d'appui qui ont modifié les tensions et la flexion des boulons auraient été suffisamment différentes pour éviter la défaillance de ces derniers et la propagation de la rupture à l'appareil central. Des marques de poli de boulon ont également été observées sur les boulons intacts de l'appareil d'appui central, ce qui suggère qu'ils ont également subi une flexion et étaient susceptibles de se rompre de manière similaire à la défaillance survenue à l'appareil d'appui nord-ouest.