

ÉTUDE DE LA FATIGUE DES POUTRES EN ACIER DU PONT FERROVIAIRE AU-DESSUS DE LA RUE SAINT-MAURICE, CENTRE-VILLE DE MONTRÉAL

Jan Jaworski, ing., M. ing. (CIMA+), Munzer Hassan, ing., Ph.D., FCSCE (CIMA+), Tomasz Pietraszczek, ing., Ph.D., FCSCE (CIMA+), Poulad Daneshvar, ing., Ph.D. (CIMA+) et Marie-Ève Gagné, ing., M.Sc.A. (CIMA+)

RÉSUMÉ

Le Réseau Express Métropolitain (REM), le futur système de métro léger automatisé dans le Grand Montréal, est l'un des plus importants projets d'infrastructure de transport en commun au Québec. Ce projet nécessite la construction de plusieurs nouvelles structures, en particulier des stations, des viaducs et des ponts. Cependant, CDPQ Infra (CDPQi), l'actuel propriétaire de la partie du chemin de fer située au sud de la gare Centrale, a également l'intention de maintenir en service un certain nombre de ponts existants. La plupart des ponts du secteur en question ont été construits autour des années 1930. Par conséquent, afin d'assurer le rendement satisfaisant de ces ponts au cours de leur durée de vie utile prévue en vertu du REM et/ou de déterminer les réparations nécessaires, la coentreprise CIMA+|Hatch a été mandatée pour réaliser une étude de fatigue de ces structures qui feront partie du futur corridor du REM.

Le pont au-dessus de la rue Saint-Maurice au Sud de la gare Centrale, un pont essentiel pour le projet REM, est un pont à poutres d'acier à une seule travée composé de deux structures indépendantes, soit la partie Ouest et la partie Est. Le pont Ouest, comprenant cinq poutres et supportant trois voies, fera partie du REM (Figure 1). Cet article présente l'étude détaillée de la fatigue des poutres en acier de ce pont.



Figure 1: Image du pont ferroviaire au-dessus de la rue Saint-Maurice

Puisque les charges soutenues pendant la durée de vie du pont sont essentielles pour l'évaluation des dommages par fatigue accumulés des éléments du pont, l'étude de fatigue a commencé par une recherche sur l'historique du passage des trains sur le pont. Afin de mieux connaître les propriétés des éléments structuraux, une série d'essais ont été effectués sur des échantillons prélevés sur les éléments en acier des ponts situés au sud de la gare Centrale. Leurs limites élastiques et ultimes ainsi que la résilience et la composition chimique ont été déterminées. De plus, grâce à une série d'essais par ultrasons sur les poutres d'acier, des fractures potentielles dans les joints rivetés à proximité des rivets ont été étudiées. La dernière activité d'inspection et/ou d'essai sur place a été l'installation de jauges de déformation sur certaines poutres à des endroits prédéterminés par analyses d'un modèle numérique. La réaction des poutres du pont au passage des trains a été enregistrée pendant sept jours et le post-traitement des données obtenues a permis de déterminer, entre autres, la répartition de la charge entre les poutres. Grâce à l'application des résultats des essais et à l'adoption des procédures d'analyse de fatigue fournies par l'American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA), l'étendue des dommages actuels aux poutres a été déterminée par l'application de cycles de charge cumulatifs. Les analyses ont été essentielles pour établir la durée de vie de fatigue restante des poutres.

INTRODUCTION

La Caisse de dépôt et placement du Québec Infra (CDPQi) est devenu propriétaire des structures ferroviaires appartenant anciennement au CN et situées au Sud de la Gare Centrale dans le but d'y faire circuler le futur Réseau Express Métropolitain (REM) de Montréal. Ce secteur est composé de ponts et de bâtiments ayant été construits entre les années 1920 et 1940 et requiert donc des vérifications pour s'assurer que les trains du REM puissent circuler sur le faisceau Ouest de ces ouvrages pour de nombreuses années à venir. La **Figure 2** présente l'ensemble du secteur :

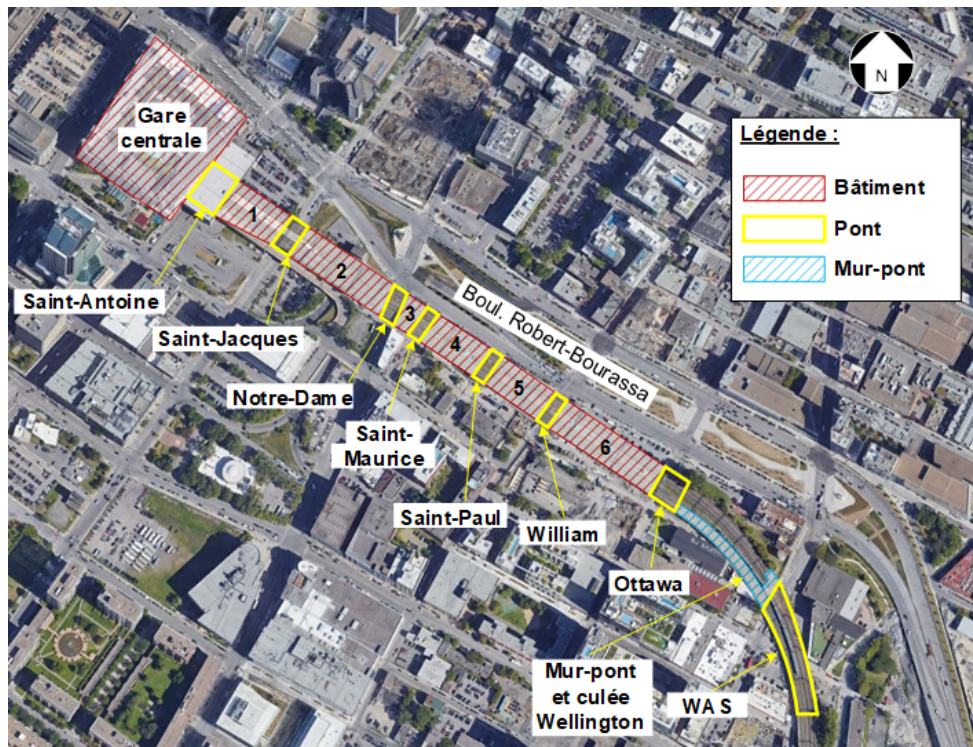


Figure 2: Vue d'ensemble des ouvrages ferroviaires au Sud de la Gare Centrale

Dans le mandat d'accompagnement du client pour le projet du REM, les services professionnels de la coentreprise CIMA+|Hatch avaient été retenus afin de réaliser des évaluations de l'ensemble de ces ouvrages. Ces évaluations contenaient également des vérifications préliminaires au niveau de la fatigue dont les résultats indiquaient des problèmes potentiels pour les ponts à courte portée du secteur.

Il a été convenu avec le client de réaliser une étude de fatigue plus approfondie pour le pont au-dessus de la rue Saint-Maurice, soit le pont ayant la plus courte portée. L'étude prévoyait les activités suivantes :

- Recherche documentaire sur l'historique des passages des trains ;
- Programme de caractérisation de l'acier ;
- Modélisation par élément fini ;
- Programme d'inspection non destructive ;
- Programme d'instrumentation ;
- Analyse de fatigue.

Pont à l'étude

Les ponts au-dessus des rues du secteur au Sud de la Gare Centrale sont composés d'ouvrages indépendants pour les faisceaux Est et Ouest. Le pont Ouest au-dessus de la rue Saint-Maurice, soit le pont identifié pour l'étude approfondie de fatigue sur lequel les trains du futur REM circuleront, est un pont à cinq poutres à une seule travée. Les Figure 3 à Figure 5 qui suivent montrent la localisation et la géométrie du pont.

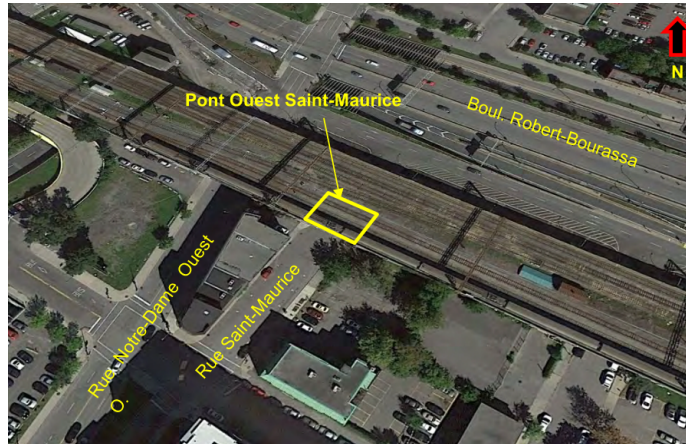


Figure 3: Localisation du pont Ouest au-dessus de la rue Saint-Maurice

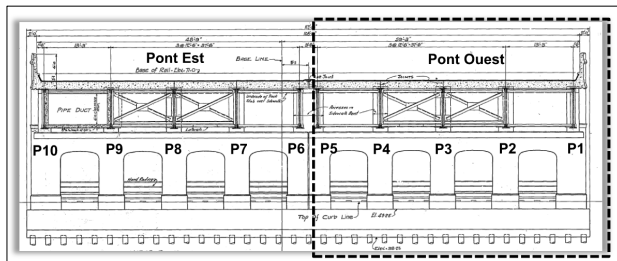


Figure 4: Section des ponts au-dessus de la rue Saint-Maurice

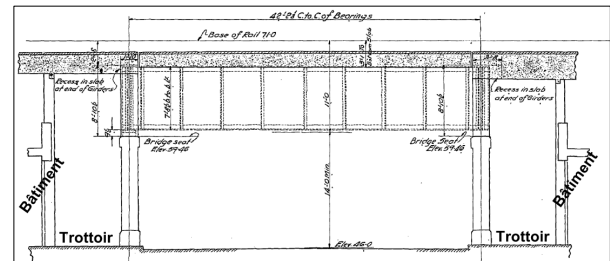


Figure 5: Profil des ponts au-dessus de la rue Saint-Maurice

Il s'agit d'un pont ballasté de type Deck-Plate Girder (DPG) comportant cinq (5) poutres d'acier et quatre (4) dalles de béton armé indépendantes entre les poutres. La portée est de 12,9 mètres, la largeur est de 16,79 mètres. La structure de voie comprend un ballast d'environ 475 mm ainsi que des traverses typiques en bois pour le support des rails.

RECHERCHE DOCUMENTAIRE SUR L'HISTORIQUE DES PASSAGES DES TRAINS

L'objectif de la recherche historique est de raffiner davantage les hypothèses de calculs considérées pour les calculs préliminaires de fatigue des poutres, et ce, de manière à obtenir un portrait plus réaliste de l'état actuel de ces dernières. La recherche effectuée a permis de détailler la fréquence journalière

moyenne des trains ayant circulé dans le secteur depuis la construction des ouvrages ainsi que d'apporter des précisions sur les charges de locomotives et de wagons ayant circulé sur le pont.

Les données recueillies proviennent de documents obtenus de la part de l'historien Claude Martel, président de l'Institut de recherche sur l'histoire des chemins de fer du Québec (IRHCFQ), ainsi que du site Exporail, Le Musée ferroviaire canadien (www.exporail.org).

Fréquence de trains

L'analyse des différents horaires de l'époque obtenus a permis de préciser la fréquence moyenne de trains empruntant les voies ferrées des structures situées au sud (côté Ouest) de la Gare Centrale. Lors de cette analyse, la fréquence a été estimée en fonction du nombre potentiel maximal de trains pouvant réalistement emprunter une même voie ferrée, et ce, en fonction des heures de passage et d'arrivée des trains ainsi que de leur direction de circulation ; « Outward trains », « Inward trains », « Westward trains » et « Eastward trains ». La fréquence calculée à partir des horaires de l'époque a été transposée à une seule des trois voies ferrées, car les documents recueillis n'ont pu préciser le positionnement des trains en fonction des voies sur les structures. Étant donné la présence de trois voies et sachant que l'ensemble des passages a été attribué à une seule voie ferrée pour calculer une fréquence moyenne, cette hypothèse peut paraître conservatrice; cependant, il faut savoir que, par manque d'information, le passage des trains provenant du tunnel Mont-Royal et empruntant l'antenne au sud de la Gare Centrale qui se dirigeaient quotidiennement, à l'époque, vers la cour Pointe-Saint-Charles afin de procéder au nettoyage des wagons et l'entretien des locomotives, a été négligé.

Le **Tableau 1** résume les périodes retenues pour l'analyse de fatigue :

Tableau 1 – Périodes d'analyse de fatigue

Période	Provenance des trains circulation sur les structures à l'étude	Nb. passages estimés /voie/jour	Commentaires
1917-1943	n/a	n/a	L'antenne Sud n'est pas encore complètement construite.
1943-1953	Trains de la ligne Sud + trains de ligne Nord (opérations d'entretien à Pointe-Saint-Charles)	60	Aucun horaire n'est disponible entre 1943 et 1953. Cependant, nous savons que le déclin du transport par trains a débuté au début des années 1950 à la suite de l'augmentation des tarifs et l'arrivée de l'automobile et des autoroutes.
1953-1957		34	Horaire de trains 1953
1957-1969		34	La quasi-totalité des trains est maintenant propulsée par des locomotives au diesel. Déclin constant du transport par trains. Les grandes autoroutes et le métro de Montréal, construit à temps pour l'Exposition universelle de 1967, font compétition.
1969-1986		17	Horaire de trains 1969
1986-1995		20	Horaire de trains 1986
1995-2018	Trains de ligne Nord qui effectuent les changements de voie ou pour stationner temporairement.	20	Aucun train provenant de la ligne Sud (côté ouest). En 1995, la ligne Deux-Montagnes du CN a été achetée par l'AMT. L'année 1995 marque l'arrivée des nouvelles voitures automotrices de Bombardier Transport de 25 kV AC.
2018 – 2020		17	Horaire de trains 2018

Équipement roulant

L'information recueillie n'est pas assez précise pour raffiner davantage les différents types de locomotives, incluant les charges par essieu, ayant emprunté les voies ferrées du secteur suivant leur construction. Néanmoins, les locomotives étaient par moment doublées (voir Figure 6). Étant donné que les plans disponibles pour les ouvrages indiquent des charges de conception Cooper E50 ou E60 (selon l'ouvrage), la charge E60 a été considérée pour les deux premières périodes de passages de trains, tel que présenté plus loin.



Figure 6: Exemple de locomotives doublées

À partir de l'année 1957, la quasi-totalité des trains était propulsée par différentes locomotives au diesel qui elles étaient tirées par des locomotives électriques jusqu'à l'arrivée de l'AMT en 1995, période durant laquelle les nouveaux trains électriques MR-90 de Bombardier (voir Figure 7) sont mises en circulation. L'AMT a par la suite acquis plusieurs locomotives de type bi-mode (ALP45DP) qui ont également circulé sur le faisceau Ouest du secteur au sud de la Gare Centrale (voir Figure 8).



Figure 7: Train MR-90



Figure 8: Locomotive bi-mode (Dual-Power)

En ce qui concerne le nombre de wagons, il a été possible d'estimer une moyenne de dix (10) wagons par train. Cette estimation découle des explications de l'historien Claude Martel et est appuyée par la consultation de différentes photographies de l'époque. Cette moyenne est similaire au nombre de wagons visibles sur les trains d'EXO en provenance de la ligne Deux-Montagnes.

PROGRAMME DE CARACTÉRISATION DE L'ACIER

Un programme de caractérisation de l'acier a été entrepris afin d'améliorer la connaissance des composantes des structures de l'ensemble du secteur. Chaque pont en acier a fait l'objet d'échantillonnage (Figure 9) et d'essais pour déterminer les caractéristiques suivantes : limites élastiques et ultimes (F_y et F_u), soudabilité par des analyses chimiques et résilience par l'essai Charpy.

Pour l'ensemble des échantillons, la limite élastique F_y la plus faible est de 280 MPa et la limite ultime F_u est de 434 MPa. En comparaison avec la limite élastique mentionnée sur les plans existants ($F_y = 250$ MPa), les résultats des essais de traction présentent des limites supérieures. De plus, selon la norme ASTM A992/A992M-11, les valeurs de carbone équivalent (CE) des éprouvettes indiquent que l'acier des ponts du secteur est soudable.



Figure 9 : Échantillon d'acier

Les résultats des essais de résilience Charpy présentent une moyenne de 4 J dissipées à une température de -30°C ce qui est nettement inférieure à la limite de 20 J prescrite par la norme CSA S6-14 assurant une résilience adéquate du matériau d'acier. Puisque l'acier des structures ne présente pas un bon comportement face aux cycles de fatigue, des essais Charpy à une température T_i de $+10^{\circ}\text{C}$ ont été effectués afin de pouvoir déterminer la longueur critique de fissure avant propagation soudaine (a_{cr}). Une longueur critique de la fissure avant propagation fragile a_{cr} de ± 35 mm a pu être établie suite à une revue de la littérature des articles de Barsom (1975), Barsom et S.T. Rolfe (1999), et ICCA (2016). En considérant que l'initiation de la fissure débute au pourtour du trou des rivets et que la tête de rivet recouvre les

plaques d'acier sur une surface de 10 mm autour du trou du rivet, il sera possible, avec attention lors d'inspection visuelle, de détecter la portion visible de la fissure (± 25 mm) avant propagation fragile. Notons que cette ouverture est calculée avec une contrainte qui atteint $0,8 F_y$ tandis que les trains REM produiront des contraintes plus faibles; il est donc anticipé que la portion visible sera plus longue avant une propagation fragile.

MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Un modèle par éléments finis d'une poutre extérieure du pont au-dessus de la rue Saint-Maurice a été réalisé dans le but de cibler les zones à instrumenter et inspecter par méthode non destructive. La poutre extérieure a été visée par cette activité, car cette dernière présentait, dans les analyses préliminaires, un dommage cumulatif associé à la fatigue plus important que les poutres intérieures. Les contraintes dans la semelle inférieure de la poutre ont été vérifiées sur toute sa longueur. La *Figure 10* illustre le modèle numérique tandis que la *Figure 11* montre la plaque additionnelle en milieu de travée après le 4^e raidisseur.

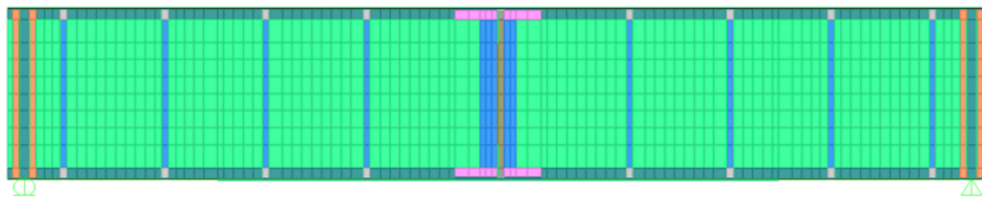


Figure 10: Modèle numérique de la poutre extérieure



Figure 11: Changement de section

Le modèle de cette poutre unique considère les charges mobiles représentant les différentes configurations d'essieux ayant circulé sur la structure. Ces charges ont été introduites en tant que « multi-step static loads » et traversent toute la longueur de la poutre. Les contraintes dans la semelle inférieure de la poutre ont été extraites des analyses et étudiées. La *Figure 12* ci-dessous montre, à titre d'exemple, les contraintes causées par le passage d'une configuration d'essieux spécifique. Mentionnons que les résultats des autres configurations d'essieux montrent des distributions similaires, mais avec des amplitudes de contraintes différentes.

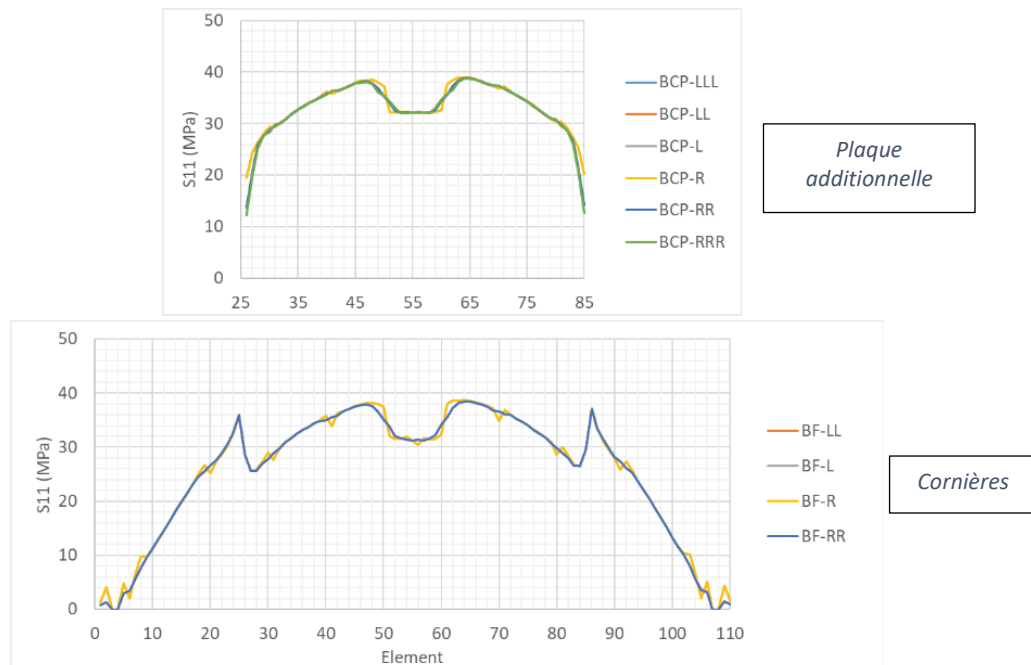


Figure 12: Contraintes dans les éléments de semelle inférieure

L'effet de l'ajout de la plaque dans le tier central de la poutre après le 4^e raidisseur (2^e raidisseur en travée) est clairement visible par la baisse des contraintes au niveau des cornières. Cette baisse est cependant plus graduelle en réalité, car les connexions rivetées activent la plaque progressivement, tandis que le modèle considère des éléments reliés de façon rigide. L'augmentation de la section au centre de la poutre, soit à l'endroit du joint de chantier, diminue également les contraintes dans la semelle inférieure de la poutre; cela est aussi visible à cette même figure. Mentionnons que seulement les plaques de l'âme sont discontinues au niveau du joint de chantier mais les cornières et les plaques constituant les semelles inférieure et supérieure sont continues au niveau du joint de chantier.

Suivant les analyses, les positions suivantes ont donc été identifiées pour l'instrumentation et l'inspection:

- À 500 mm après le 4^e raidisseur, soit avant la plaque supplémentaire vers le centre de la travée;
- À 900 mm après le 6^e raidisseur, soit avant la zone de joint de chantier qui se trouve au centre de la poutre.

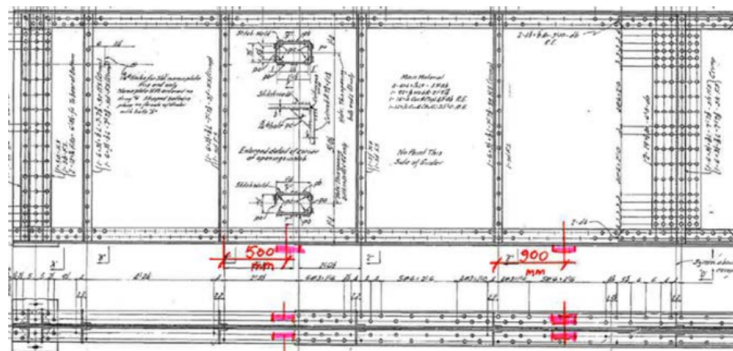


Figure 13: Zones identifiées pour l'instrumentation et inspection

Une seconde modélisation numérique a été réalisée, cette fois-ci en considérant l'entièreté de la charpente d'acier du pont, dans le but de constater la redistribution des efforts entre les poutres en considérant comme hypothèse que les connexions avec les membrures secondaires sont encastées.

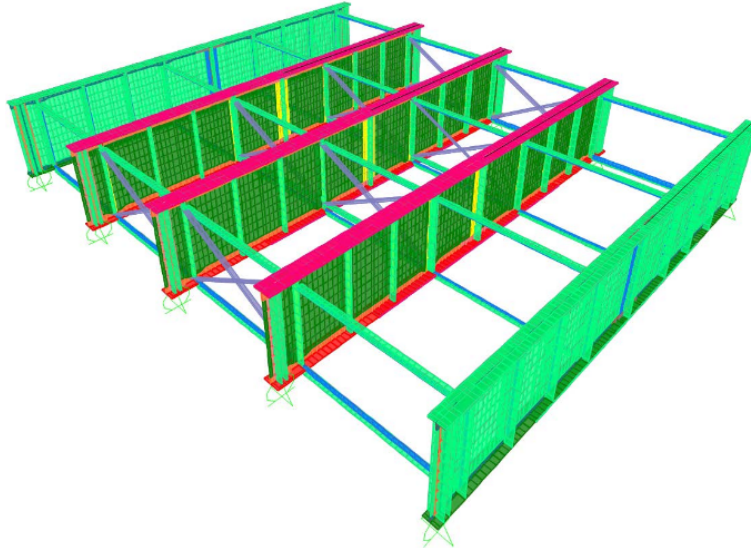


Figure 14 : Modèle numérique complet de la charpente du pont

Les comparaisons des différents cas de chargement ont permis de constater qu'il y a un léger transfert d'efforts vers la poutre extérieure P1 lorsque les membrures secondaires encastées sont considérées dans le modèle, qui est d'un ordre de grandeur maximal de 1,25 %. Il sera néanmoins vu suite au programme d'instrumentation que la répartition s'avère plus importante en réalité, possiblement par la contribution également des dalles malgré qu'elles soient théoriquement indépendantes l'une de l'autre selon les plans existants.

PROGRAMME D'INSPECTION NON DESTRUCTIVE

Un programme d'inspection non destructive a été réalisé afin de déceler l'initiation de fissures dans les zones critiques identifiées précédemment. La méthode d'inspection à l'aide de la technique par ultrasons « Phased Array Ultrasonic – PAUT » avait été privilégiée, car les rebonds du signal permettent la détection des fissures sur le pourtour des trous sous les têtes des rivets. Un total de 346 trous de rivets a été inspecté sur la portion des poutres P1 à P4 du pont Ouest au-dessus de la rue Saint-Maurice.

L'inspection non destructive par ultrason a permis la détection d'irrégularités sur le pourtour de deux (2) trous de rivets à la poutre centrale, orientées vers le Sud tel que montré à la Figure 15 ci-dessous.

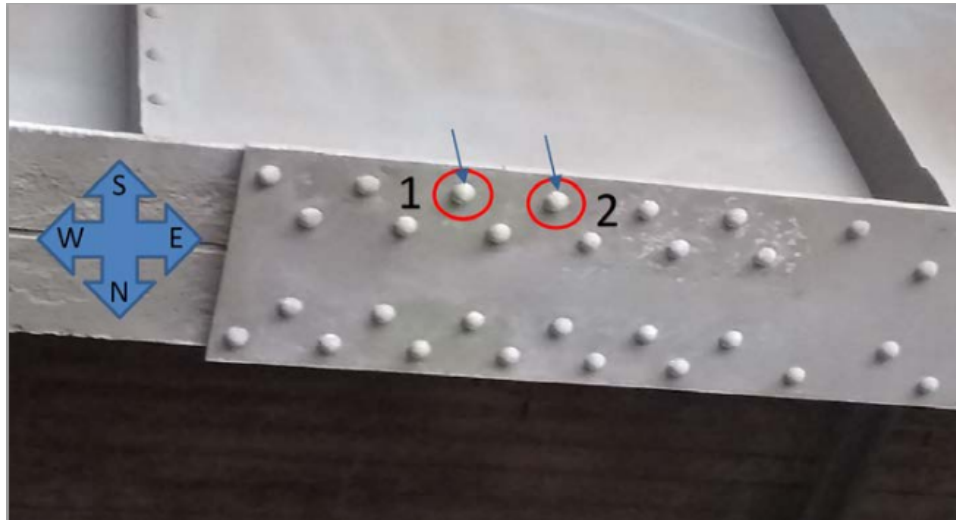


Figure 15 : Localisation de trous présentant des irrégularités

La dimension des défauts était de l'ordre de 1 mm avec une incertitude de $\pm 0,5$ mm, associé possiblement à une géométrie irrégulière de la surface intérieure des trous ou encore à de la fissuration. Les rivets ont été enlevés afin d'effectuer un alésage et ensuite des boulons de plus grand diamètre ont été remis de façon préventive. Aucun autre défaut n'a été décelé.

PROGRAMME D'INSTRUMENTATION

Un programme d'instrumentation des poutres a été réalisé afin de voir le niveau réel de contraintes dans les poutres lors de passages des charges vives. Les résultats servent d'ajustement des hypothèses de calcul pour l'évaluation de la durée de vie utile du pont en fonction de l'endommagement dû à la fatigue.

Quinze jauges de déformation ont été installées sur les poutres du pont ouest au-dessus de la rue Saint-Maurice afin d'observer les déformations, transformées par la suite en contraintes, induites lors des passages de trains actuels. Ces jauges ont été installées dans les zones où les contraintes maximales de traction ont été observées dans le modèle numérique de la poutre extérieure présenté précédemment. Ainsi, les jauges ont été installées sous les plaques de semelles inférieures près des joints de construction ainsi que sous les cornières avant ces plaques (Figure 13).

L'acquisition de données a été réalisée en continu pendant une période de 7 jours, avec une fréquence d'acquisition de 100 Hz, ce qui correspond à une lecture à chaque 0.01 seconde. Cette approche a été retenue afin d'éviter l'installation d'un système d'activation automatique sur le dessus des structures, ce qui nécessiterait des autorisations de la part du CN ainsi que l'obtention de blocs de travail pour effectuer ces travaux.

Le traitement de données s'est avéré laborieux étant donné la quantité d'information récoltée. Malgré tout, cette activité a permis de voir le niveau de contraintes réel lorsque les trains d'EXO (anciennement AMT) reculent vers sud de la Gare Centrale pour se garer ou pour changer de voie.

Les Figure 16 à Figure 19 qui suivent présentent quelques exemples de résultats obtenus.

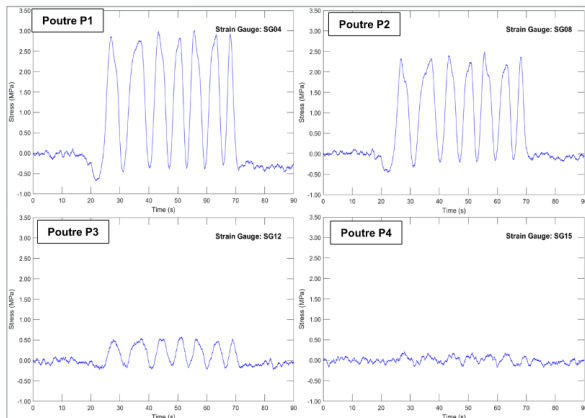


Figure 16 : Contraintes obtenues selon les déformations relevées lors d'un passage de train MR-90 sur la voie entre P1 et P2

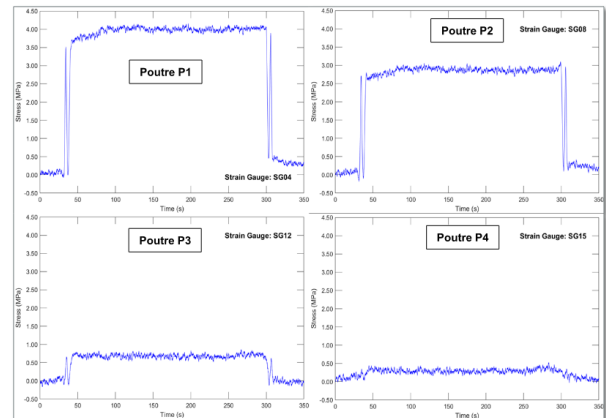


Figure 18 : Contraintes obtenues selon les déformations relevées lors d'un train MR-90 arrêté sur la voie entre P1 et P2 – cas 1

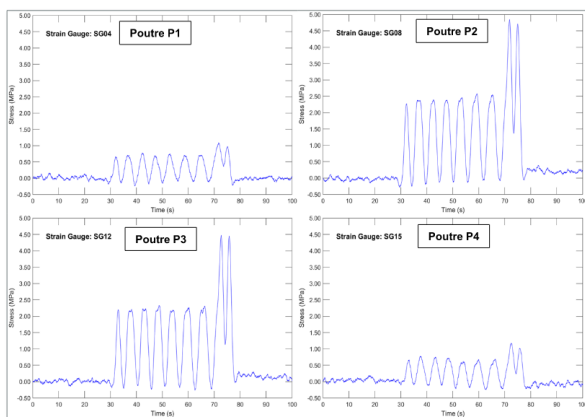


Figure 17 : Contraintes obtenues selon les déformations relevées lors d'un passage de train avec locomotive bi-mode sur la voie entre P2 et P3

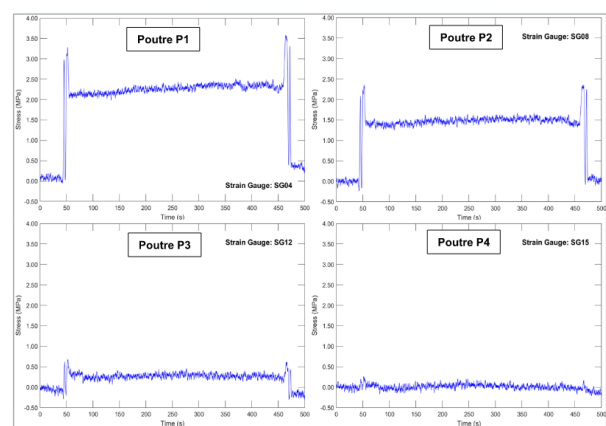


Figure 19 : Contraintes obtenues selon les déformations relevées lors d'un train MR-90 arrêté sur la voie entre P1 et P2 – cas 2

Les données récoltées permettent non seulement d'apprécier les variations de contraintes, mais également de constater si un bogie de train est arrêté directement sur l'ouvrage ou non, de savoir combien de bogies ont traversé le pont, de savoir de quel train il s'agit (sachant quels sont les deux types de trains circulant sur le faisceau Ouest), de comprendre sur quelle voie il circulait, et même de calculer la vitesse de son passage. L'instrumentation en simultané des poutres a permis également d'observer la contribution des poutres éloignées de la voie chargée.

Concernant la répartition transversale des charges, les pourcentages observés sont plus élevés que ceux obtenus par le modèle 3D. La contribution des portions de dalles est possiblement associée à ce transfert d'efforts, car bien que les dalles soient théoriquement simplement appuyées, la présence de rivets, de coulis et de même de corrosion sont des éléments qui empêcheraient la libre rotation de ces dernières, créant ainsi un certain encastrement.

Les amplitudes de contraintes obtenues lors du programme d'instrumentation montrent que ces dernières sont inférieures à celles théoriques provenant des modèles numériques, et ce même lorsqu'aucun facteur d'impact, débalancement des charges et facteur de pondération ne sont considérés à cause de la vitesse très basse des trains. Les raisons les plus probables pouvant expliquer cette amplitude moindre sont les suivantes :

- La répartition de la charge sur les poutres éloignées de la voie chargée qui est de l'ordre de 10% de la charge totale.
- La contribution des sections de dalle à la rigidité en flexion des poutres.

Les contraintes obtenues pour les trains qui reculent temporairement au sud de la Gare Centrale sont assez faibles pour ne créer aucun dommage cumulatif supplémentaire; en effet, les contraintes sont de l'ordre de 5 MPa pour les charges les plus lourdes, soit celles des locomotives bi-modes. Ainsi, dans la section qui suit, le dommage cumulatif associé à la période de 1995 à aujourd'hui (période AMT/EXO) est de zéro.

ANALYSE DE FATIGUE

Les résultats préliminaires selon l'étude réalisée en 2016-2017 montrent que la poutre extérieure ouest du pont était la plus susceptible d'avoir des dommages dus à la fatigue. Le dommage cumulatif de la poutre extérieure P1 dépasse la limite admissible seulement après 5 ans de service du REM selon les calculs préliminaires. Compte tenu des données obtenues à partir de l'historique des passages de trains, des constatations tirées des instruments du pont et des résultats du modèle numérique, une série d'analyses plus raffinées de la fatigue a été effectuée pour le pont.

Le chargement de fatigue prescrit par l'AREMA considère 60 trains par jour. Les trains consistent en 110 wagons ayant un poids brut s'approchant de 1400 kN (4 x 350kN charge d'essieux). Cette charge est modifiée pour représenter la charge de conception. Chaque passage de train entraîne 3 cycles dans les travées plus longues que 30,5 m et 110 cycles dans les travées plus courtes que 15 m. L'approche de l'AREMA est utilisée pour la conception des nouveaux ponts et procure une certaine marge de sécurité afin de tenir compte d'éventuelles augmentations de charge. Ceci pénalise les structures existantes où les conditions de circulation (nombre de trains et niveaux de charge) sont moins sévères. Suite à l'analyse des résultats réalisée à partir des chargements de fatigue de l'AREMA, il a été conclu qu'une nouvelle approche était justifiée.

Pour l'analyse de la fatigue de la poutre extérieure Ouest, quatre types de charges ont été retenus et appliqués à sept périodes: (i) Une configuration de train de marchandises consistant en une combinaison d'une charge de l'AREMA E60 et une séquence de douze wagons chargés et vides; (ii) Une configuration de train voyageur (TV-1) consistant en une combinaison d'une charge de locomotive type ALP46A (4 x 225.6 kN) et 10 wagons voyageurs (4 x 125kN); (iii) Une configuration de train voyageur (TV-2) consistant en une combinaison d'une charge de locomotive type ALP45DP (4 x 320 kN) et 10 wagons voyageurs (4 x 200kN); et (iv) Une configuration de train REM consistant de 6 wagons voyageurs (146 kN de charge maximale d'essieux) et avec 5 niveaux des charges (AW0 à AW4). La recherche de l'historique des passages des trains a permis de raffiner les différentes périodes de passage de train. Le [Tableau 2](#) présente les sept périodes considérées ainsi que les trains associés.

Tableau 2 – Passages de trains

Période	Nombre d'années	Train	Nombre de passages quotidiens
1943 à 1953	10	E60	60
1953 à 1957	4	E60	34
1957 à 1969	12	ALP46A	34
1969 à 1986	17	ALP46A	17
1986 à 1995	9	ALP46A	20
1995 à 2020	24	ALP45DP	20
2020 à 2120	100	REM	462

Habituellement, les courbes S-N (AISC 1977) sont utilisées pour l'analyse de la fatigue. Ils présentent les contraintes en fonction du nombre de cycles de contraintes constants causant des dommages dus à la fatigue. Ces courbes sont établies à partir d'essais en laboratoire et de mesures sur le terrain avec un degré de confiance de 95 % que le détail évalué a une chance de survie de 97,5 % (AREMA 2017). Cette probabilité est comparable aux facteurs de sécurité appliqués dans chapitre 15 de l'AREMA pour la tension axiale (Sweeney 2015). Les courbes S-N sont définies en fonction de la catégorie de détail de l'élément étudié. L'AREMA fournit ces catégories de détails et les limites de contraintes qui y sont associées, comme présenté à la Figure 20. Les courbes de fatigue pour les catégories de détail B et D sont représentées à la Figure 21. À l'aide des courbes S-N, on détermine le nombre admissible de cycles associés à la contrainte obtenue à partir des analyses. Cette valeur est ensuite comparée au nombre de cycles auxquels l'élément a été soumis pour savoir si l'élément est endommagé en raison de la fatigue.

Il existe quelques méthodes pour déterminer les magnitudes et les nombres des cycles de contraintes à partir des résultats des modèles analytiques de la structure. La méthode Rainflow (Matsuishi et Endo 1968) est largement utilisée pour déterminer les plages de contraintes et le nombre de cycles qui y sont associés. Un exemple est présenté à la Figure 22.

La règle des dommages cumulés Palmgren-Miner (P-M) (Palmgren 1924, Miner 1945) est utilisée pour calculer les dommages dus aux charges cycliques. La règle P-M stipule que les dommages associés aux défaillances sont la somme cumulée de sous-dommages en raison de cycles multiples de plages de contraintes.

Description	Category	Constant A (ksi ³)	Threshold S _{Rfat} (ksi)	Potential Crack Initiation Point	Illustrative Examples
1.2 Non-coated weathering steel base metal with rolled or cleaned surfaces detailed in accordance with	B	120 x 10 ⁸	16	Away from all welds or structural connections	
2.3 Base metal at the net section of other mechanically fastened joints, except for eyebars and pin plates; e.g., joints using ASTM A307 bolts or non-pretensioned high-strength bolts. (Reference 40, 175)	D	22 x 10 ⁸	7	In the net section originating at the side of the hole	

Figure 20 : Exemple de catégorie de détail prescrite par l'AREMA (2017)

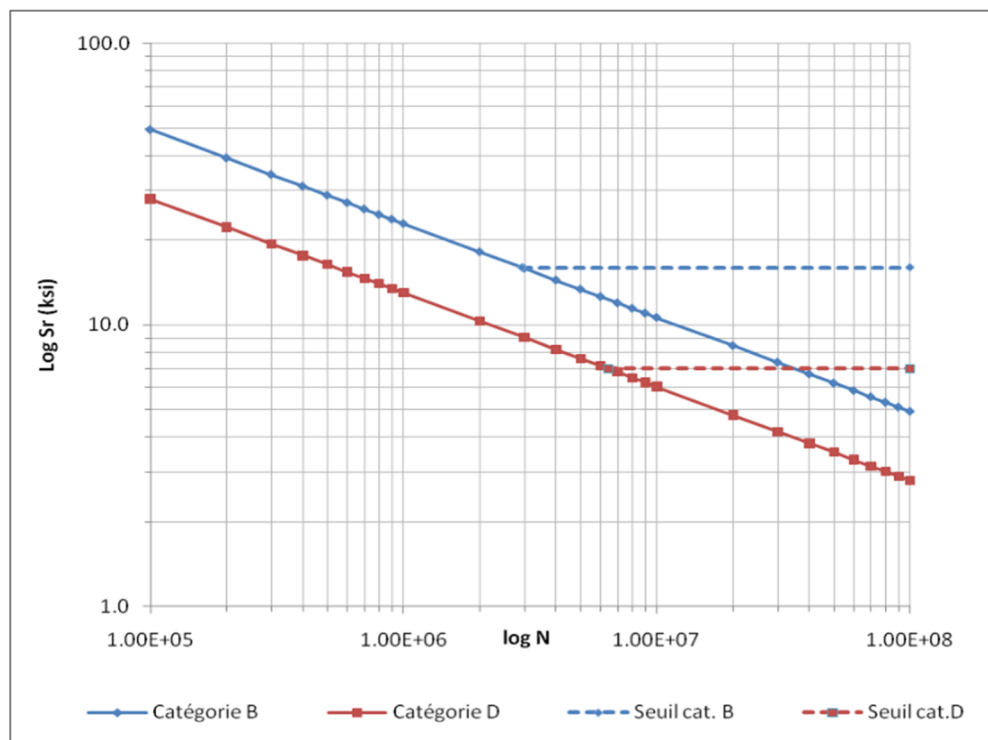


Figure 21 : Courbe S-N pour l'analyse de la fatigue (AREMA 2017)

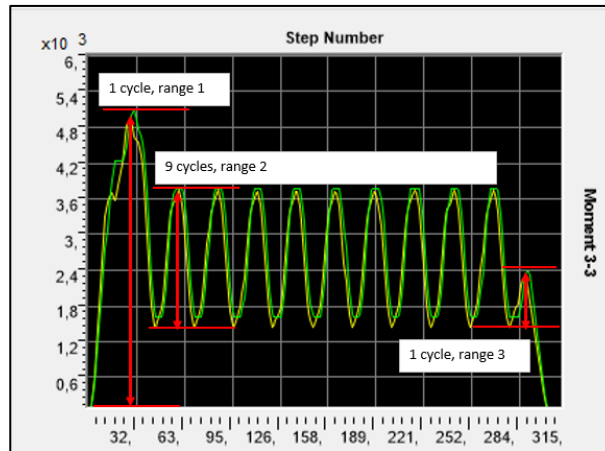


Figure 22 : Exemple de la méthode Rainflow pour le comptage des cycles de stress

Résultats

Pour l'estimation des dommages, les lignes S-N sont présumées valides pour le nombre de cycles $N = 1,0E+5$ à $1,0 E+8$. En utilisant les contraintes obtenues du modèle numérique, les plages de contraintes et le nombre de cycles ont été déterminés. Les courbes S-N pour la catégorie de détail D ont ensuite été utilisées pour déterminer les dommages dus à la fatigue. Les résultats raffinés du dommage cumulatif dû à la fatigue pour la poutre extérieure Ouest du pont au-dessus de la rue Saint-Maurice sont présentés au Tableau 3.

Tableau 3 : Dommages dus à la fatigue incluant le Train REM – Poutre extérieure

Périodes	1 / 2	3 / 4 / 5	6 (AMT/EXO)	7 (REM)
Type de train	E60+12wagons	ALP46A+10wagons	ALP46DP+10wagons	SLR-6x146
No. de trains/jour	60 / 34	34 / 17 / 20	20	462
No. d'années	10 / 4	12 / 17 / 9	24	100
Dommage	0.182	0.006	0.000*	0.134
Dommages cumulatifs				0.322

* selon conclusions d'instrumentation

Le dommage cumulatif révisé en fonction de l'historique raffiné des passages de trains ainsi qu'en fonction des résultats de l'instrumentation est réduit à un total de 0,322. Ce résultat est grandement inférieur à celui obtenu dans les analyses préliminaires.

Également, la 6^e période de trains, soit celle de l'exploitation du faisceau Ouest par EXO (anciennement AMT), considère les contraintes réelles obtenues de l'instrumentation. Ces contraintes sont inférieures à la contrainte minimale nécessaire pour causer du dommage de fatigue, ce qui fait en sorte qu'il n'y a pas de dommage ajouté par cette période. Les contraintes réelles obtenues ne peuvent cependant être généralisées aux autres périodes étant donné que les vitesses de trains étaient différentes; en effet, les trains qui reculent sur le pont Saint-Maurice circulent à une vitesse très basse étant donné qu'ils s'arrêtent à cet endroit, ce qui n'était probablement pas le cas pour les autres périodes.

CONCLUSION

Les nouvelles informations reçues de l'instrumentation ainsi que des recherches de documentation effectuées modifient largement à la baisse le résultat de fatigue obtenu pour le pont Ouest au-dessus de la rue Saint-Maurice qui présentait l'endommagement cumulatif le plus critique suite aux analyses préliminaires. Les résultats raffinés montrent un endommagement cumulatif total de 0.322, ce qui est inférieur à la limite de 1.0. Ce résultat inclut 100 ans d'exploitation par le REM.

Il faut cependant réaliser que les prévisions de résistance à la fatigue ne sont pas aussi précises que le calcul des efforts sollicitant les membrures, peu importe l'exactitude des modèles numériques et les méthodes d'analyse utilisées. C'est pourquoi généralement des inspections de routine et des entretiens réguliers des structures sujettes au chargement de fatigue sont essentiels pour assurer une exploitation sécuritaire de telles structures. Néanmoins, à la lumière des nouveaux résultats, aucune attention particulière n'est nécessaire lors des inspections régulières de la structure.

RÉFÉRENCES

1. Anthony Clegg (1963); Article historique "*The Mount Royal Tunnel*" publié par *Trains & Trolleys*;
2. Barsom, J.B. (1975). "*Development of the AASHTO Fracture-Toughness Requirements for Bridge Steels*". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 605-618;
3. Barsom, L. M. and S.T. Rolfe (1999). "*Fracture and Fatigue Control in Structures – Applications of Fracture Mechanics*". Prentice-Hall, Inc;
4. Beaulieu, Picard Tremblay, Grondin, Massicotte (2008), "*Calcul des charpentes d'acier*", Tome I. ICCA : Institut canadien de la construction en acier;
5. Beaulieu, Picard Tremblay, Grondin, Massicotte (2010), "*Calcul des charpentes d'acier*", Tome II. CISC ICCA : Institut canadien de la construction en acier;
6. CANADIAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, *Steel Bridges Design, Fabrication and Construction* (2016). CISC ICCA : Institut canadien de la construction en acier.
7. Claude Martel, géographe-historien, Institut de recherche sur l'histoire des chemins de fer au Québec (IRHCFQ), <https://www.irhcfq.org>;
8. Exporail, Le Musée ferroviaire canadien, <https://www.exporail.org>;
9. Matsuishi, M., and Endo, T. (1968). "*Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress*". Presented to Japan Society of Mechanical Engineers. Fukuoka, Japan.
10. Miner, M. A. (1945). "Cumulative damage in fatigue". *Journal of Applied Mechanics*, 3, 159-164.
11. Palmgren, A. (1924). "*The Fatigue life of ball bearings*". *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (ZVDI)*, 14, 339-341.

REMERCIEMENTS

Les auteurs ainsi que la coentreprise CIMA+|Hatch tiennent à remercier CDPQi, les partenaires GKM Consultants, Groupe Lefebvre, Nucleom, SNC-Lavalin GEM, ainsi que l'historien Claude Martel.