

Le Tracel de Cap-Rouge – Un pont historique canadien aux travers des méthodes d’analyse contemporaine

Samuel Cuerrier Auclair, Mario Fafard, Luca Sorelli et Charles-Darwin Annan

Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval, Québec, Canada

Résumé

En, 2013, l’honneur des 100 ans d’utilisation du Tracel de Cap-Rouge, la société historique de Cap-Rouge, la Société Canadienne de Génie Civil de la région de Québec, l’Université Laval et des entreprises privées, ont mis sur pied une compétition pour les étudiants de premier cycle visant la modélisation du Tracel de Cap-Rouge à l’aide du logiciel SAFI.

Un modèle de référence de la structure du Tracel a été construit par une équipe de l’Université Laval de manière la plus fidèle possible en fonction des plans disponibles. Les méthodes de conception de l’époque étant certainement différentes de celle d’aujourd’hui, l’objectif est de calculer les efforts et les déformations de la structure le plus fidèlement possible selon les plans et les charges de conception de l’époque. Une fois l’analyse effectuée, les résultats sont comparés avec les normes disponibles. Pour effectuer une telle analyse, des difficultés de modélisation ont été rencontrées et des choix simplificateurs ont été faits afin d’obtenir des résultats de qualité dans un délai raisonnable.

Le modèle final contient 388 464 degrés de liberté, 43 572 membrures et 54 594 éléments de coques. Selon les résultats de ce modèle, il peut être conclu que le pire ratio de flèche peut être mesuré à la portée de 160 pieds avec un ratio de $L/1060$ causé par la charge de train. La période naturelle de la structure est de l’ordre de 0.2 à 0.45 seconde. Les coefficients de sécurité pour les poutres principales sont supérieurs à trois et pour les chevalets ils sont supérieurs à deux.

Introduction

Lors de son élection en 1895, le premier ministre de l’époque, Sir Wilfrid Laurier, veut doter le Canada d’un nouveau chemin de fer qui le traversera d’un océan à l’autre. En 1906, la construction du Tracel débuta et fut inaugurée en 1913. Cent ans plus tard, en l’honneur de cette œuvre d’ingénierie, la société historique de Cap-Rouge, la Société Canadienne de Génie Civil de la région de Québec, l’Université Laval et des entreprises privées, ont mis sur pied une compétition pour les étudiants de premier cycle visant la modélisation du Tracel de Cap-Rouge à l’aide du logiciel SAFI.

Les méthodes de conception de l’époque étant certainement différentes de celle d’aujourd’hui, l’objectif est de calculer les efforts et les déformations de la structure selon les plans fournis par le Canadien National [1]. Une fois l’analyse effectuée, les résultats sont comparés avec les normes disponibles. Pour effectuer une telle analyse, des difficultés de modélisation ont été rencontrées et des choix simplificateurs ont été faits afin d’obtenir des résultats de qualité dans un délai raisonnable.

Dans le présent travail, les étapes de modélisation du Tracel de Cap-Rouge ainsi que les hypothèses utilisées pour la modélisation sont présentées. Un résumé des efforts et des déformations des sections principales de la structure est également discuté. Des résultats d'une analyse fréquentielle de la structure sont également présentés à la fin du travail.

Approche de modélisation

Le principal défi de la modélisation fut la lecture des plans (110 pages) puisque ceux-ci étaient souvent illisibles à plusieurs endroits clés, comme les cartouches et les cotes. Pour surmonter ce problème, chacune des membrures du Tracel a été mise dans un chiffrier Excel en fonction de son emplacement sur la structure en prenant soin de noter chacune des données lisibles sur le plan. Une fois cette base de données effectuée, il fut plus facile de déduire certaines dimensions de membrures illisibles en fonction des autres, puisqu'une certaine logique pouvait être déduite.

Puisque le Tracel de Cap-Rouge est essentiellement fait de section composée, la principale hypothèse simplificatrice fut de modéliser ces sections comme une seule membrure avec des propriétés équivalentes en tenant pour acquis que les étrésillons offrent une connexion rigide [3]. Les étrésillons ne sont cependant pas pris en compte lors du calcul des propriétés de la pièce. Pour tenir compte du poids des accessoires tels que les étrésillons et les rivets sur la structure, le poids de l'acier fut majoré selon chacune des 86 types de membrures. Cette majoration peut varier de 5% à 166% par rapport aux poids de la membrure sans accessoires. L'âme des poutres principales du Tracel fut modélisée en élément de coques afin d'avoir une précision supplémentaire sur les résultats telle que les déplacements. Afin de modéliser les connexions les plus fidèlement possibles à la structure, des membrures fictives furent ajoutées afin de tenir compte de certaines excentricités présentes sur la structure. De plus, dû au fait que certaines membrures ont des rigidités très faibles dans certaines directions, comme certains contreventements, des instabilités empêchaient l'analyse. Il a donc fallu majorer leur inertie dans certaines directions afin de permettre l'analyse complète du Tracel. La rigidité de chacune des connexions fût traitée cas par cas, mais en règle générale, toutes les connexions sont rigides dû à la grande quantité de rivets qui lie chacune des membrures, à l'exception des poutres principales qui sont appuyées simplement sur les chevalets.

L'acier considéré pour l'analyse du modèle fut déterminé selon le « Manuel d'évaluation de la capacité portante des structures 2005 » [2]. Pour de l'acier datant entre 1905 et 1932, la limite élastique spécifiée est 210 MPa et la contrainte de rupture en traction est 420 MPa. Un module standard de 200 000 MPa a également été retenu pour l'analyse. Le fournisseur de l'acier pour la construction fût le Dominion Bridge de Montréal, il n'y avait cependant pas de donnée disponible aux plans pour les propriétés de l'acier.

Les charges considérées sur la structure sont bien sûr son poids propre structural, le poids du tablier et la charge de train. Le poids du tablier contient les billots de bois, les barrières et les rails, ceux-ci totalisent 885 lb/pi (12.92 kN/m). Le poids volumique du bois utilisé est de 7.4 kN/m³ ce qui correspond à du chêne blanc selon le « Manuel de calcul des charpentes de bois 2012 ». La charge de train choisi pour l'analyse est une charge standard Cooper E60. Selon les informations fournies par David Cook, directeur des Ponts et Structures aux Canadien National, cette charge peut être estimée comme la charge de conception à l'époque. La figure suivante montre une

charge Cooper E1, il faut donc multiplier chaque axe de charge par 60 pour obtenir une Cooper E60.

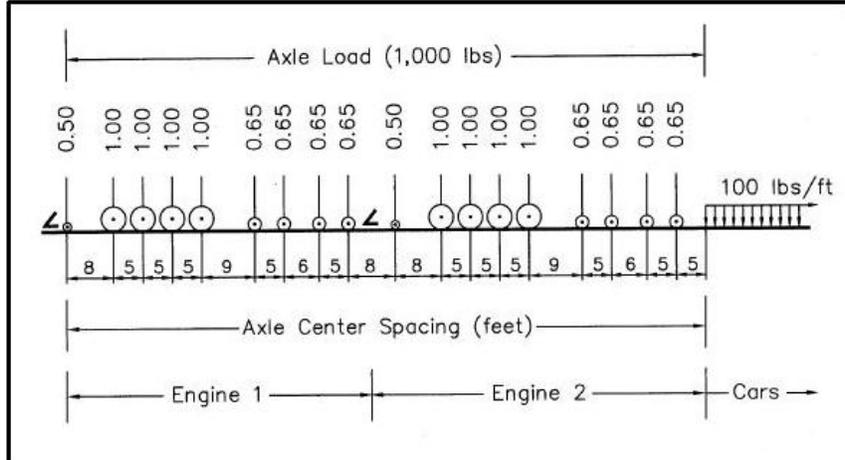


Figure 1: Charge standard Cooper E1

Un facteur de majoration dynamique de 48% conforme à la méthode de calcul de « American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association » (AREMA) [6] a été ajouté à la Cooper E60, il peut donc être estimé que la réponse dynamique est équivalente à une charge statique Cooper E88.8.

Pour l'analyse de la charge de train, puisque la licence permettant la charge mobile n'était pas disponible, il a été choisi de placer le centre des locomotives sur chacun des « Decks » de 125, 150 et 160 pieds (38.1, 45.72 et 48.77 mètres) et également au centre d'une poutre de 40 et de 60 pieds (12.19 et 18.29 mètres). L'image qui suit montre la charge de train placé aux centres du « Decks » de 160 pieds (48.77 mètres).

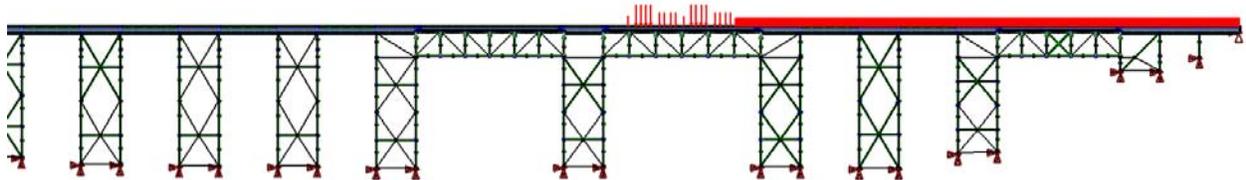


Figure 2: Charge de train au centre du « Deck » de 160 pieds

Le modèle final contient 388 464 degrés de liberté, 43 572 membrures et 54 594 éléments de coques. La figure qui suit montre une vue isométrique de la structure avec les sections en vue tridimensionnelle.

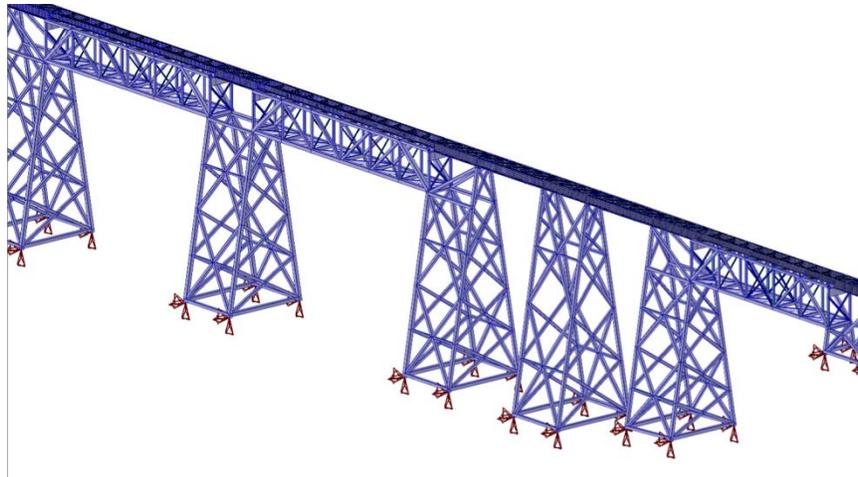


Figure 3: Vue isométrique des « Decks »

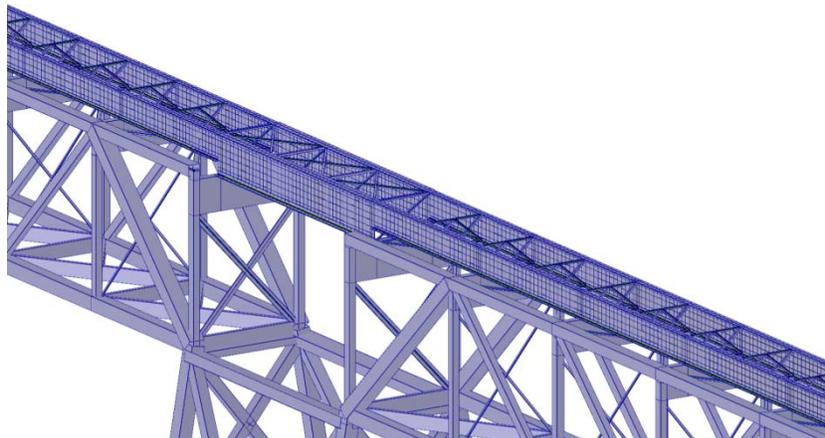


Figure 4: Vue rapprochée des poutres principales

Résultats de l'analyse statique

Le type d'analyse effectué avec le logiciel SAFI est une analyse P-Delta. Suite à l'analyse, les résultats des déformations aux sections critiques sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Résumé des déformations

Charge	Flèche [Po]				
	Poutre 40'	Poutre 60'	Deck 125'	Deck 150'	Deck 160'
Permanente	0.03	0.10	0.28	0.38	0.44
Train	0.18	0.46	1.08	1.66	1.81
Permanente + Train	0.21	0.56	1.36	2.04	2.25
Proportion train	L/2666	L/1565	L/1389	L/1084	L/1060
Proportion totale	L/2285	L/1286	L/1103	L/882	L/853

Selon l'AREMA [6], la déflexion maximale admissible causée par la charge vive additionnée à l'impact doit être inférieure à 1/640 de la longueur de la travée. Il est donc constaté que les flèches calculées selon le modèle numérique SAFI sont conformes à l'AREMA à ce qui a trait les poutres principales.

Les efforts des flexions aux sections critiques avec leurs résistances sont résumés dans le tableau 2. La résistance des poutres a été calculée conformément à la norme CAN/CSA-S6-06 [4, 5] avec un coefficient de tenue égale à 1. La combinaison flexion-cisaillement n'a cependant pas été prise en compte.

Tableau 2 : Effort de flexion

	Moment de flexion [Kip-Pi] (kN-m)				
	Poutre 40'	Poutre 60'	Deck 125'	Deck 150'	Deck 160'
Effort	1219 (1652)	2467 (3345)	453 (614)	583 (790)	646 (876)
Résistance	4240 (5749)	7670 (10399)	2020 (2739)	2020 (2739)	2157 (2924)
Facteur de sécurité	3.48	3.11	4.46	3.46	3.34

La charge de compression maximale reprise par un poteau de chevalet est de 1005 kips (4481 kN), ce poteau est situé sur le chevalet qui supporte les deux « Decks » de 150 et 160 pieds. Le facteur de sécurité de ce poteau est d'environ 2.3.

Analyse fréquentielle

Une analyse fréquentielle a également été faite sur le modèle afin d'estimer les modes fondamentaux de la structure. Pour réaliser cette analyse, il a fallu scinder la structure en plusieurs modèles numériques afin d'éliminer les modes de vibration locaux. Puisque le Tracel est une suite de structure isostatique, les poutres principales sont simplement appuyées sur les chevalets, chacun des chevalets a tendance à vouloir vibrer selon la fréquence qui lui est propre en étant très peu influencée par les vibrations autour. La fréquence transversale de chacun des chevalets au-dessus de 110 pieds semble se situer entre de 2.22 et 5 Hertz (0.2 à 0.45 s). La figure qui suit montre la vibration transversale des « Decks » de 150 et 160 pieds.



Figure 5 : Vibration transversale des « Decks »

Conclusion

L'analyse des charges verticales d'une grande structure d'acier telle que le Tracel de Cap-Rouge avec le logiciel SAFI demande beaucoup de temps de modélisation et bien sûr de lecture de plan. L'expérience apportée aux étudiants de premier cycle en menant le projet de la modélisation du Tracel à terme est certainement notable. En effet, il permet de constater que les méthodes de conception et de construction de l'époque sont très différentes, puisqu'aujourd'hui on ne verrait certainement pas une nouvelle structure avec autant de sections composée et avec autant de rivets en plus d'apporter une expérience en lecture de vieux plans. En se limitant à une analyse de charge verticale, il peut être conclu que le Tracel de Cap-Rouge est une structure de qualité en se fiant aux plans tel que construit, puisque les flèches sont relativement faibles si on se fie aux normes d'aujourd'hui pour une charge de train Cooper E60 et que les facteurs de sécurité sont supérieurs à trois pour les poutres et supérieurs à 2 pour les chevalets. Bien sûr aujourd'hui,

l'acier sur la structure n'est plus à son état d'origine, ces facteurs de sécurité ne sont donc plus applicables.

Bibliographie

1. CANADIEN NATIONAL, Plan du Tracel de Cap-Rouge, Dominion Bride Co. LTD
2. MINISTÈRE DU TRANSPORT DU QUÉBEC (décembre 2005), *Manuel d'évaluation de la capacité portante des structures*
3. BEAULIEU, PICARD, TREMBLAY, GRONDIN & MASSICOTTE (2008), *Calcul des charpentes d'acier Tome I*, Institut canadien de la construction d'acier
4. BEAULIEU, PICARD, TREMBLAY, GRONDIN & MASSICOTTE (2010), *Calcul des charpentes d'acier Tome II*, Institut canadien de la construction d'acier
5. CANADIEN STANDARS ASSOCIATION (2006), *Design of highway bridges*, CAN/CSA-S6-06
6. GERVAIS-TREMBLAY I. (2002), *Analyse par éléments finis de l'interaction dynamique entre les trains et les ponts ferroviaires*, Université Laval, Département de génie civil