

Possibilités d'utilisation de l'aluminium dans la construction de ponts routiers et de viaducs

Scott Walbridge (Université de Waterloo) et Alexandre de la Chevrotière (MAADI Group)

Illustrations : Benoit Vézina (MAADI Group), collaboration à la traduction : Vincent Fischer (ÉPFL)

Préparé pour

association
de l'aluminium
du canada



1010, rue Sherbrooke Ouest
Bureau 1600, Montréal (Québec)
H3A 2R7
Canada



Design et Ingénierie de l'Aluminium

400, Rue Montfort, Bureau 200, Montréal, QC, Canada H3C 4J9

Juin 2012 - R1

1 - Introduction

Les ministères des Transports à travers l'Amérique du Nord sont actuellement confrontés à des coûts importants d'entretien de première urgence du parc actuel de ponts, comme le démontrent plusieurs rapports parus récemment [A1], [A2], [C1]-[C3]. Les rapports publiés aux États-Unis estiment à 140 milliards de dollars le coût de modernisation du parc de 600 000 ponts des États-Unis. On considère qu'environ 25 % de ces ponts ne sont « pas conforme d'un point de vue structurel » ou qu'ils « ne remplissent plus leurs fonctions » [C1]. En 2007, la valeur totale des ponts et routes au Canada était estimée à 23,9 milliards de dollars et 170,1 milliards de dollars respectivement [C2]. En 2005, le coût de modernisation et de renouvellement des ponts et routes en milieu urbain au Canada a été estimé à 66 milliards de dollars [C3]. De récents effondrements de ponts ont attiré l'attention de la population sur les problèmes liés aux coûts de rénovation (effondrements des ponts de Laval et du Minnesota, en 2006 et 2007 respectivement). Bien qu'ils soient moins apparents que les frais d'entretien élevés imposés aux propriétaires ou que les répercussions immédiates et importantes de ces effondrements, les coûts significatifs que supportent l'ensemble des utilisateurs et le public en général constituent un élément tout aussi important. Ces coûts, comme les frais liés à une utilisation moindre ou aux impacts environnementaux, sont attribuables aux infrastructures de ponts qui se détériorent de façon progressive et constante, mais que l'on continue d'utiliser même si leur état ne leur permet plus d'assurer correctement la fonction pour laquelle elles ont été conçues (par exemple, lors de la fermeture partielle ou complète des voies des ponts Honoré-Mercier et Champlain à Montréal). Par conséquent, ces infrastructures devraient normalement être rénovées ou remplacées.

S'inscrivant dans un contexte plus large, le présent rapport se concentre sur les avantages d'une utilisation plus répandue de l'aluminium dans la construction de ponts routiers. Il met également en évidence l'ampleur du défi que doit relever l'industrie en ce qui a trait aux opérations actuelles d'entretien d'ouvrages d'art, où l'utilisation de l'aluminium pourrait fournir une solution satisfaisante.

D'un point de vue historique, l'utilisation de l'aluminium dans la construction de ponts routiers a été restreinte pour les raisons suivantes [A10], [A16], [A18] :

- coût initial relativement élevé de l'aluminium, en comparaison avec le béton ou l'acier;
- rigidité relativement faible de l'aluminium, en comparaison avec l'acier;
- manque d'expérience de la plupart des ingénieurs en structures avec l'aluminium;
- manque chronique de règles de calcul dans les normes d'utilisation de l'aluminium lors de la conception de ponts.

Malgré ces lacunes, l'utilisation de l'aluminium dans la construction de ponts offre de multiples avantages par rapport aux autres matériaux plus conventionnels (béton, acier, bois), comme il est possible de le constater en examinant un certain nombre de projets de ponts routiers qui ont été réalisés au cours des dernières années. Le présent rapport, qui a été préparé à la demande de l'Association de l'aluminium du Canada (AAC), présente d'abord un bref historique de l'utilisation de l'aluminium dans la construction de ponts. Les avantages qu'offre l'aluminium sont ensuite abordés, puis les opportunités de son utilisation dans le domaine des ponts sont cernées afin de démontrer comment il est possible de tirer profit au maximum de ces avantages lors de l'entretien et de la construction de ponts routiers.

2 - Historique de l'utilisation de l'aluminium dans la construction de ponts routiers

2.1 - Les années 1970 et avant

L'histoire de l'aluminium dans la construction de ponts routiers est largement documentée [A3], [A5], [A7], [A10], [A14], [A16], [A18] jusque dans les années 1970. Tout a commencé en 1933 avec le remplacement du tablier d'acier et de bois du pont « Smithfield Street » de Pittsburgh par un tablier en aluminium beaucoup plus léger. La réduction significative du poids propre de la structure (675 tonnes métriques) qui en a découlé a permis d'augmenter considérablement la charge utile admissible. Le tablier en alliage 2014-T6 est demeuré en place jusqu'en 1967 avant d'être remplacé par un alliage d'aluminium offrant une meilleure résistance à la corrosion : le 6061-T6. Ce nouveau tablier est resté en service jusqu'en 1995.

La première travée de pont faite entièrement d'aluminium a été installée en 1946 sur le pont « Grasse River » de Massena, dans l'État de New York. Cet ouvrage, qui présentait une portée de 30,5 m, était un pont-rail supportant le trafic ferroviaire d'une aluminerie d'ALCOA. La travée faisait partie d'une structure à travées multiples, dont les autres travées se composaient d'acier traditionnel. Le poids propre de la travée du pont en aluminium était 43 % plus léger qu'une travée équivalente en acier [A10]. Plusieurs ponts en aluminium ont suivi à la fin des années 1940 et au début des années 1950, avec les ponts « Sunderland » (1949) et « Aberdeen » (1953), construits respectivement en Angleterre et en Écosse. On peut également citer la construction du pont « Arvida », à Saguenay, au Québec, par la société ALCAN en 1950 (figure 1). Cet ouvrage demeure à ce jour le pont en aluminium le plus long au monde, avec une portée centrale de 88,4 m.

Le pont « Schwansbell », premier pont routier en aluminium d'Europe continentale, a été construit en Allemagne [A14] en 1956. Cette structure en treillis comportait une seule travée d'une longueur de 44,2 m. Grâce à son faible poids propre, la structure a pu être fabriquée en atelier, puis transportée sur une barge jusqu'au chantier. Le pont a été assemblé aux culées à l'aide de rivets en aluminium fabriqués à partir du même matériau que les éléments assemblés. Un revêtement anticorrosion a été appliqué entre les plaques chevauchantes de chaque connexion afin de prévenir la corrosion sous dépôt (aussi appelée « corrosion caverneuse »). Un récent rapport sur l'état actuel du pont a indiqué que seules des détériorations mineures ont été observées depuis sa mise en service il y a quelque cinquante ans, dans un environnement considéré comme extrêmement dur en raison de son installation au-dessus d'un cours d'eau et de la proximité d'un parc industriel hautement corrosif.

Dans la période de 1958 à 1963, sept ponts routiers en aluminium ont été construits aux États-Unis. Ces projets ont pu voir le jour notamment grâce au prix élevé de l'acier de construction, qui servait de matière première à cette époque. Parmi ces projets, le pont routier de la Route 86 à Des Moines, en Idaho, est particulièrement célèbre, car il s'agit du premier pont soudé en aluminium ([A3], [A10]). Une poutre continue composée de quatre travées (deux pièces d'une longueur de 21 mètres et d'un poids de 9,5 tonnes et deux autres de 12 mètres et 7,3 tonnes) a été préfabriquée. Les travées ont ensuite été érigées et assemblées in situ à l'aide d'une grue. Un tablier en béton a été coulé en place, et un revêtement anticorrosion, soit une couche de peinture à base de zinc, a été appliqué sur les éléments en aluminium qui entraient directement en contact avec le béton. Le pont a offert un bon rendement jusqu'à sa mise hors service en 1993, lors de son remplacement par une structure plus large. De nombreux ouvrages construits aux États-Unis pendant cette période se composaient d'un tablier en béton reposant sur une poutre en caisson triangulaire. Le tableau 1 résume les caractéristiques de ces ouvrages et présente des exemples supplémentaires de ponts routiers en aluminium construits avant cette période.

#	Emplacement	Type de pont	Application	Nbre de voies	Portée(s) (m)	Année	Alliage
1	Pont, Rue Smithfield Pittsburgh, PA, É-U	Pont-treillis avec tablier orthotrope en aluminium	Routière/Tramway	2+2 Voies	2@111	1933, 1967	2014-T6 (1933) 6061-T6 (1967)
2	Pont de la rivière Grasse Massena, NY, É-U	Poutre rivetée	Ferroviaire	1 Voie	30.5	1946	2014-T6
3	Pont Sunderland Angleterre	Pont levis riveté à double-vantaux	Routière/Ferroviaire	1+1 Voie	37	1949	2014-T6 6151-T6
4	Pont Arvida Saguenay, QC, Canada	Pont arqué riveté	Routière	2	5@6.1, 88.4, 5@6.1	1950	2014-T6
5	Pont Aberdeen Écosse	Pont levis riveté à double-vantaux	Routière/Ferroviaire	1+1 Voie	30.5	1953	2014-T6 6151-T6
6	Pont Schwansbell Allemagne	Poutre rivetée à treillis de type Warren	Routière	1	44	1956	6351-T6
7	Route 86 au dessus de I-80 Des Moines, IA, É-U	Tablier de béton sur des poutres en plaque d'aluminium soudée	Routière	2	12, 21, 21, 12	1958	5083-H113
8	Pont Banbury Angleterre	Pont levis rivetée	Routière	1	3	1959	6351-T6
9	I-495 au dessus de l'échangeur Jerico Jerico, NY, USA	Tablier de béton sur des poutres en plaque d'aluminium soudée	Routière	4 (2 Ponts)	23	1960	6061-T6
10	Route 36 (Rivière Appomattox) Petersburg, VA, É-U	Tablier de béton sur poutres-caissons en aluminium boulonnées	Routière	2	30	1961	6061-T6
11	Pont Gloucester Angleterre	Pont levis rivetée	Routière	1	12	1962	6351-T6
12	Route 110 au dessus de l'aut. Sunrise Amityville, NY, É-U	Tablier de béton sur poutres-caissons en aluminium rivetées	Routière	6 (2 Ponts)	9, 23, 23, 9	1963	6061-T6
13	Route 32 (Rivière Patapsco) Sykesville, MD, É-U	Tablier de béton sur poutres-caissons en aluminium rivetées	Routière	2	28, 29, 32	1963	6061-T6
14	Pont de la rivière Saone Montmerle, France	Pont-treillis en aluminium	Routière	N/A	79.9, 79.9	1973	A-SGMT 6
15	Pont de la rivière Rodan Groslee, France	Tablier de béton sur des poutres triangulées en aluminium	Routière	N/A	174	1977	6082-R31
16	Pont Chamalières Chamalières, France	Poutre en aluminium	Routière	4	N/A	1978	N/A

Tableau 1. Exemples d'utilisation d'aluminium dans des ponts routiers – 1970 et avant (adapté de [B2]).

2.2 - Applications récentes

Le pont « Forsmo », construit en Norvège en 1996, est un exemple relativement bien connu de pont routier moderne fait entièrement d'aluminium. Sa portée est de 39 mètres et sa travée se compose de deux poutres en caisson ainsi que d'un tablier. Les alliages 5xxx et 6xxx, qui en plus d'être très durables présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques, ont été utilisés pour construire le pont. L'ensemble de la structure a été transporté jusqu'au chantier à l'aide d'une semi-remorque et a été mis en place à l'aide d'une seule grue [A16]. D'autres exemples de ponts et viaducs modernes réalisés exclusivement en aluminium tendent à démontrer que ce matériau peut servir à réaliser des applications particulières lorsque la minimisation du poids de la structure constitue un critère essentiel et qu'il n'est possible de respecter ce critère qu'en utilisant un matériau léger. Ces structures particulières comprennent notamment les ponts levants (et à bascule, comme les ponts « Helmond » et « Riekerhavenburg », construits en 1999 et en 2003 aux Pays-Bas), les ponts flottants, les ponts amovibles d'urgence, ainsi que certaines applications militaires [A10], [A13].

Récemment, beaucoup d'efforts ont été déployés pour intégrer l'aluminium à la construction de ponts routiers, en privilégiant son utilisation lors du remplacement de tabliers [A4], [A13], [A17], [A19]. Pour soutenir les charges plus élevées que suppose le trafic moderne, l'augmentation de la capacité portante d'anciens ouvrages (en enlevant une masse importante de béton pour la remplacer par un matériau beaucoup plus léger, tout en veillant à ce que la structure remplisse la même fonction et offre le même rendement), représente la principale raison pour laquelle l'aluminium est utilisé pour remplacer les tabliers.

Les importantes détériorations de tabliers en béton armé que cause l'usage intensif de sel de déglacage sont une autre raison qui favorise le remplacement de tabliers en béton armé par des tabliers en aluminium.

Des tabliers en aluminium ont également été utilisés récemment dans des projets de remplacement rapide de ponts, comme dans le cas de la ville de Sandisfield, au Massachussetts, au printemps de 2012 [C7]. Cette structure se compose d'un tablier en aluminium extrudé, soudé par friction-malaxage, sur quatre poutres en acier galvanisé. La totalité du pont, d'une portée de 17,7 mètres par une largeur de 4,2 mètres, a été fabriqué hors site. Il a été transporté au site sur un camion à plate-forme puis érigé à l'aide d'une grue. Le tablier en aluminium, dont le poids correspondait au cinquième de celui d'un tablier en béton, a permis sa construction rapide.

En plus de servir à la construction de ponts routiers, l'aluminium a aussi été largement utilisé pour la construction de passerelles piétonnes dans des zones résidentielles (qui peuvent supporter le trafic de véhicules légers), et ce, en Europe, au Japon et en Amérique du Nord [A7], [A10] (figure 1). Le faible poids propre, les qualités esthétiques et la durabilité de l'alliage d'aluminium corroyé, sans peinture, constituent les principales raisons pour lesquelles l'aluminium a été choisi avec ces applications. On a très souvent recours à des passerelles en aluminium dans des environnements hautement corrosifs, comme dans les ports de plaisance, les ports commerciaux et les milieux industriels, où l'on valorise sa forte résistance à la corrosion [A8], [A18].



Figure 1. Pont d'Arvida au Saguenay, Québec (gauche) , installation d'une passerelle piétonnière à Montréal (droite).

3 - Normes et recommandations pour l'utilisation de l'aluminium dans la conception de ponts

Pour justifier l'utilisation restreinte de l'aluminium dans la construction de ponts routiers, on évoque souvent le manque d'expérience de la plupart des ingénieurs en structures et leurs connaissances insuffisantes de l'aluminium ainsi que le manque de normes et de recommandations officielles pouvant fournir une aide opportune lors de la conception et du dimensionnement de ponts en aluminium. Le présent chapitre aborde les principales normes et recommandations en la matière ainsi que les mises à jour récentes qui ont permis d'améliorer et de compléter ces normes.

3.1 - Normes pour la conception de structures en aluminium

La norme CSA-S157 a longtemps été la norme de référence pour la conception et le dimensionnement de structures en aluminium [D1]. Bien que cette norme ait été mise à jour en 2005, il y avait longtemps qu'elle n'avait pas été revue en profondeur. Cette norme, en vigueur au Canada, s'applique principalement au dimensionnement de structures en aluminium. Elle permet aussi de déterminer la résistance ultime des membrures et de leurs connexions. Elle s'applique à tout type d'assemblage en aluminium supportant des charges connues et pour lesquels il n'existe pas de code de conception spécifique, comme c'est le cas avec les tours en treillis tridimensionnels, les grues, les véhicules, le matériel roulant et, jusqu'à tout récemment, les passerelles piétonnes, les ponts et les viaducs. Il est à noter que la conception d'aéronefs et de vaisseaux sous pression ainsi que d'autres champs d'applications particuliers possèdent leur propre code.

L'une des normes internationales qui a récemment été mise à jour pour le dimensionnement de structures en aluminium est l'Eurocode 9 « Calcul des structures en aluminium » [D2]. Cette norme s'applique aux structures en aluminium en général (c'est-à-dire pas seulement aux structures de bâtiments) et peut être utilisée conjointement avec l'Eurocode 1 « Actions sur les structures » pour établir le dimensionnement de passerelles piétonnes, de ponts et de viaducs.

Aux États-Unis, l'Association de l'aluminium actualise régulièrement le « Aluminium Design Manual » [D3]. Ce manuel se concentre surtout sur l'analyse de la résistance de pièces et de structures. Il contient aussi de nombreux renseignements sur le matériau et ses alliages de même que sur les propriétés géométriques de sections couramment utilisées.

Pour dimensionner des ouvrages d'art en aluminium en utilisant l'une des normes de dimensionnement de structures en aluminium, les ingénieurs peuvent envisager de recourir à une norme de calcul de la capacité structurale conjointement avec une norme de dimensionnement de ponts pour calculer des charges et de combinaisons de charges. L'un des problèmes liés à l'utilisation de cette approche est que les normes de dimensionnement pour les structures de bâtiments et de ponts contiennent des facteurs de charge et de résistance calibrés indépendamment dont le but est de garantir une faible probabilité de rupture. Ces facteurs de charge et de résistance étant liés entre eux, il n'est pas possible de prendre les facteurs de charge d'une norme et les facteurs de résistance d'une autre norme, car la sécurité de la structure risquerait d'être compromise. Autant que possible, cette approche devrait donc être évitée.

3.2 - L'aluminium dans les normes de dimensionnement de ponts et de viaducs

Aux États-Unis, la norme pour le dimensionnement de ponts et de viaducs, publiée par l'AASHTO (« American Association of State Highways and Transportation Officials ») [D4], comprend depuis plusieurs années un chapitre qui traite du dimensionnement de structures en aluminium [D3]. Ce chapitre montre de grandes similitudes avec le « Aluminum Design Manual ». Cette norme formule des recommandations sur la résistance, mais aussi sur les charges relatives aux ponts et viaducs en aluminium, ce qui fait que le niveau de sécurité des ponts en aluminium correspond à celui spécifié pour les ponts en béton et les ponts en acier.

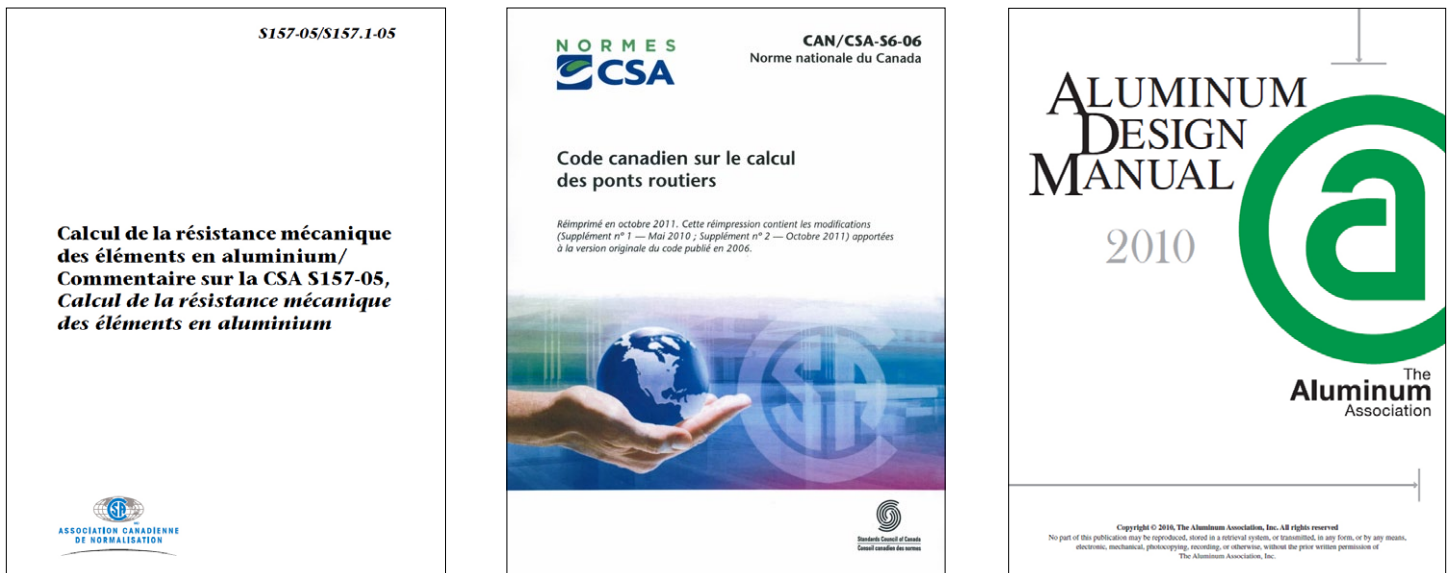


Figure 2. Normes et codes pour la conception de structures en aluminium.

Au Canada, l'industrie de l'aluminium et l'Association canadienne de normalisation (CSA) ont récemment reconnu que les spécifications et recommandations pour le dimensionnement de ponts en aluminium devaient être regroupées dans une seule norme. Cette volonté a abouti à la formation d'un nouveau comité technique pour la norme canadienne de dimensionnement des ponts et viaducs (CAN/CSA-S6), présidé par le professeur Denis Beaulieu de l'Université Laval [D5]. Ce comité a concentré l'ensemble de son travail sur le nouveau chapitre 17 pour les « structures en aluminium », qui a été publié à l'automne 2011 dans le cadre d'un deuxième supplément à la version 2006 de la norme.

Lors de la rédaction du nouveau chapitre de la norme CAN/CSA-S6, le comité a décidé d'organiser le chapitre de la même manière que celui traitant de l'acier, auquel les ingénieurs en structures sont habitués. Connaissant bien le chapitre sur l'acier, les ingénieurs éprouveront peu de difficultés à appliquer les recommandations relatives à l'aluminium. Les recommandations de la norme CSA-S157 à l'égard des structures en aluminium ont servi de point de départ. Cependant, lorsque ces recommandations étaient jugées dépassées ou non adéquates, les normes américaines et européennes actuelles servaient de base de référence.

4 - Propriétés des alliages d'aluminium

Lorsqu'il est question de ponts et de viaducs, les alliages d'aluminium corroyés suscitent normalement un grand intérêt pour la conception d'éléments structuraux primaires, comme les poutres maîtresses, les contreventements et les tabliers. On recommande généralement l'utilisation des alliages 5xxx et 6xxx, en raison de leurs propriétés mécaniques favorables et de leur forte résistance à la corrosion [A11], [A18].

Le nouveau chapitre 17 de la norme CAN/CSA-S6 fournit les propriétés requises des alliages d'aluminium laminés et extrudés qui conviennent aux applications de ponts : 5052, 5083, 5086, 6005A, 6061, 6063 et 6082. Les alliages coulés peuvent s'avérer une solution intéressante pour les éléments structuraux secondaires (éléments de connexions et plaques de base de lampadaires, structures supportant les panneaux de signalisation, éléments de connexion de passerelles pour piétons et cyclistes) ou pour les éléments de fixation de dispositifs de retenue de piétons et cyclistes. Pour les applications de passerelles piétonnes, le nouveau chapitre fait référence aux alliages et aux traitements thermiques des aluminiums coulés 356.0-T6, A356.0-T61 et A357.0-T61.

4.1 - Résistance et rigidité

Le tableau 2 montre la résistance des alliages et les traitements thermiques des alliages 5xxx et 6xxx. Ces alliages sont généralement utilisés lors de la construction de structures de ponts et de viaducs en aluminium. Le tableau 2 montre que la limite élastique et la résistance ultime (F_y et F_u) de ces alliages restent très élevées, bien qu'elles soient légèrement inférieures à celles d'un acier doux. Il faut aussi prendre en compte la différence significative du poids volumique des deux matériaux (les alliages d'aluminium présentent une densité de 2700 kg/m³, ce qui correspond approximativement au tiers de la densité de l'acier). L'effet des soudures conventionnelles par fusion se traduit par une perte locale considérable de résistance. Voilà l'une des grandes différences entre l'aluminium et l'acier dont il faut tenir compte lors de la phase de conception. Les effets de cette chute de résistance peuvent être minimisés, notamment en concevant soigneusement les détails de construction (soudures), par exemple en privilégiant les soudures longitudinales plutôt que les transversales [A18]. Plus récemment (en 1991), le soudage par friction-malaxage (SFM) – un processus de soudage prometteur à l'état solide qui produit des soudures de haute qualité avec peu d'énergie – a été développé. Les soudures réalisées à l'aide de ce processus présentent une haute résistance. Le SFM a été utilisé avec succès pour fixer des sections de tablier de pont en aluminium. L'application du SFM à d'autres éléments de ponts routiers est un domaine qui mérite d'être examiné de plus près.

Trempe d'alliage	Produit	Gamme d'épaisseur		Résistance minimum (MPa)			
		(mm)		Tel que reçu		Dans les régions soudées	
		Min.	Max.	F_u	F_y	F_{wu}	F_{wy}
5052-H32	Feuille, plaque	0.4	50	215	160	170	65
5083-H116	Feuille, plaque	1.6	40	305	215	270	115
5086-H116	Feuille, plaque	1.6	50	275	195	240	95
5086-H321	Feuille, plaque	1.6	8	275	195	240	95
6005A-T61	Extrusion	—	25	260	240	165	90
6063-T5	Extrusion	—	12.5	150	110	115	55
6063-T6	Extrusion	—	25	205	170	115	55
6061-T6, -T6510, -T6511	Extrusion	All	—	260	240	165	80*/105**
6061-T6	Feuille	0.15	6.3	290	240	165	105
6061-T651	Feuille, plaque	6.3	100	290	240	165	80*/105**
6082-T6, -T6511	Extrusion	5	150	310	260	190	110

*Lorsque soudé avec un apport 4043 sur des épaisseurs d'au moins 9.5mm

**Lorsque soudé avec un apport 5356 ou avec un apport 4043 sur des épaisseurs d'au plus 9.5mm

Tableau 2. Résistance mécanique des alliages couramment utilisés (adaptés de [D5]).

Pour ce qui est du dimensionnement, le module d'élasticité des différents alliages d'aluminium est fixé à $E=70\,000$ MPa [D5]. Cette valeur correspond approximativement au tiers de la valeur typique de dimensionnement du module élastique de l'acier structural. Étant donné que le rapport résistance-rigidité des alliages d'aluminium est généralement plus élevé, les limites de flèche et de vibration, lors du dimensionnement des ponts en aluminium, régissent souvent le dimensionnement des éléments structurels primaires, comme les poutres maîtresses et les éléments du tablier. Malgré ces restrictions, il est possible d'obtenir des poutres en aluminium avec une section transversale en I dont la rigidité flexionnelle équivaut à celle d'une poutre à section en acier, mais avec un poids propre réduit de moitié, à dimension égale, à l'exception de la largeur des semelles de la poutre, que l'on augmentera d'un facteur équivalant à 1,4. Le poids de la poutre peut même être diminué davantage si la hauteur hors tout de la section en I n'est pas limitée [A11].

La réduction du module d'élasticité a pour effet de favoriser le voilement local des éléments élancés de la poutre. Toutefois, il est possible de pallier ce problème potentiel et de réduire le risque de voilement local [A18] en ayant recours à des parois plus épaisses et en utilisant des extrusions réalisées avec des raidisseurs en forme de bulbs intégrés.

4.2 Propriétés thermiques, corrosion et fatigue

L'aluminium présente un coefficient de dilatation thermique correspondant à $\alpha=24 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, ce qui représente approximativement le double du coefficient du béton ou de l'acier. Ainsi, lors du dimensionnement de ponts en aluminium, une attention particulière doit être portée aux dilatations ou aux contractions que les différences de température ambiante peuvent provoquer. En effet, il est important de s'assurer que ces variations de longueurs restent acceptables en dimensionnant correctement les joints de dilatation ou en ayant recours à d'autres moyens (comme des ponts intégraux). La prudence est également de mise lors du dimensionnement de structures mixtes aluminium-béton, car les effets liés aux variations de température ne sont pas les mêmes pour les deux matériaux.

Les alliages d'aluminium, et en particulier les alliages 5xxx et 6xxx, sont reconnus pour être plus résistants à la corrosion que les aciers alliés ou les aciers patinables. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour la construction de ponts routiers au Canada, où l'utilisation de grandes quantités de sel de déglacage est très répandue en hiver. L'avantage de l'aluminium en matière de résistance à la corrosion est évident dans des milieux marins et industriels hautement corrosifs. Cependant, de futures recherches à ce sujet s'avéreraient opportunes pour mesurer l'ampleur de cet avantage. Les résultats d'une étude sur l'utilisation de l'aluminium ont été extrêmement positifs. Dans un environnement présentant une forte exposition au sel et une exposition moyenne à des polluants, une perte d'épaisseur annuelle de 0,0194 mm/an a été observée pour l'aluminium, contre 0,81 mm/an pour un acier patinable et 2,19 mm/an pour un acier avec un alliage de carbone [C5].

Pour ce qui est des ponts et des viaducs, le rendement de certaines des plus vieilles structures encore en service est évident lorsqu'il est question de résistance à la corrosion, et ce, pour des périodes de service de plus de 45 ans [A3], [A6], [A14]. Il est également à noter que des cas de faibles résistances à la corrosion ont été observés, ce que l'on peut généralement attribuer à l'utilisation d'alliages d'aluminium plus anciens, qui résistent moins bien à la corrosion (comme les alliages 2xxx). Cette faible résistance à la corrosion peut également être imputée à la faible qualité de la finition des détails de construction, qui suppose un contact direct entre l'aluminium et le béton, ou encore à des endroits le long de la structure où l'eau peut stagner près des joints et ainsi créer un milieu conducteur dans lequel le phénomène de corrosion peut se produire avec la consommation de matière.

Les premières recommandations pour le dimensionnement à la fatigue de structures métalliques ont été établies en tenant compte des mêmes différences de contraintes qui ont été utilisées pour l'acier, que l'on a simplement multiplié par un tiers. Bien que ces hypothèses soient raisonnables comme point de départ, elles se sont considérablement raffinées au fil du temps. Des courbes de résistance à la fatigue (courbes S-N) avec des pentes différentes sont maintenant utilisées pour les différentes catégories de détails, et des bases de données de tests à la fatigue beaucoup plus élaborées sont maintenant disponibles, ce qui permet d'augmenter la fidélité des courbes de résistance. À ce jour, peu de tests de soudures d'aluminium à la fatigue ont été réalisés à des charges de service à amplitude variable [A21]. Cependant, des hypothèses conservatrices sont faites dans le but de faciliter le dimensionnement à la fatigue en utilisant les normes d'Amérique du Nord [D4, D5]. En s'appuyant sur les résultats de récentes recherches dans le domaine des soudures d'aluminium, il semble que le phénomène de fatigue soit en quelque sorte plus critique pour les

structures soudées en aluminium que pour celles en acier doux, car le rapport entre la résistance à la fatigue et la résistance statique est plus faible. Comme nous l'avons mentionné auparavant, nous pouvons pallier certains problèmes de fatigue propres aux structures en aluminium qui n'existent pas avec les structures en acier structural traditionnel. Par exemple, au lieu de fabriquer des tabliers à partir de tôles laminées, il est possible de supprimer les soudures en aluminium en utilisant des extrusions qui font toute la longueur du tablier. Le processus d'extrusion permet également d'augmenter l'épaisseur à certains endroits critiques afin de réduire les concentrations de contraintes et accroître le rendement en matière de fatigue.

4.3 - Coûts et impact environnemental

De nombreuses recherches ont été menées dans le but d'évaluer les coûts initiaux de construction ainsi que les frais d'entretien au cours de la vie de structures en aluminium, comme des ponts et leurs composantes. Le prix de la matière première des alliages d'aluminium varie sensiblement par rapport aux prix de l'acier. Néanmoins, on reconnaît généralement que le prix de l'aluminium au kilogramme ou à la tonne est environ 4 fois plus élevé que celui de l'acier. S'il est possible de réduire de moitié le poids d'une structure en ayant recours à l'aluminium, le coût initial en matériel d'une structure en aluminium est deux fois plus élevé que celui d'une structure équivalente en acier standard. Bien que cette différence de coût puisse paraître notable, il convient de souligner que le coût des matières premières constitue seulement une portion du coût total de la construction d'une nouvelle structure. Effectivement, l'exécution du soudage par fusion ainsi que la coupe et l'usinage accélérés de l'aluminium permettent d'obtenir des gains non négligeables en matière de temps de fabrication. Dans l'étude A5, les coûts de 40 différents types de ponts routiers ayant des portées variant de 15 à 35 mètres ont été comparés. Le meilleur résultat qui a été observé pour l'utilisation de l'aluminium a été un surcoût de 70 % par rapport à un pont équivalent réalisé en poutres en I en acier avec un tablier conventionnel en béton. Cependant, de nombreux frais de construction n'ont pas été pris en considération puisqu'ils sont censés être identiques, indépendamment du type de structure. Ces coûts négligés incluent les colonnes, les culées, les fondations, les armatures en acier, les appareils d'appuis ainsi que les éléments structuraux secondaires (comme les contreventements). Si ces coûts avaient été pris en compte dans l'étude, il y a fort à parier que le surcoût (en pourcentage) lié à la réalisation des variantes en aluminium diminuerait. Cependant, de façon générale, la réduction des coûts à long terme, comme les frais d'entretien tout au long du cycle de vie d'une structure, constitue la principale raison pour laquelle l'aluminium est préférable à l'acier lors de la construction d'un ouvrage d'art. Lorsque vient le temps de comparer les structures en aluminium et en acier sur cette base, les structures en aluminium peuvent être concurrentielles, comme l'ont prouvé un certain nombre d'études sur le remplacement de tabliers de pont [A4] et de passerelles piétonnes [A9], [C6].

C'est bien connu, la production d'aluminium primaire à partir de bauxite (sous forme de minerai) consomme énormément d'énergie. Ainsi, pour utiliser l'aluminium lors de la construction de ponts routiers tout en minimisant au maximum les impacts environnementaux, il est nécessaire de compenser ce coût énergétique élevé en ayant recours à de l'aluminium recyclé provenant de structures de génie civil, et ainsi cibler des applications où le poids propre faible et la durabilité de la structure sont importants. Certaines applications où les avantages de l'aluminium recyclé au niveau environnemental peuvent être exploités doivent également être envisagées. Voici quelques mesures permettant de tirer profit de ces avantages : (1) augmenter la durée de service des structures; (2) réduire la durée de mise hors service pendant les interventions de remise en état; et (3) éviter les projets de remise en état ayant de grandes conséquences écologiques (comme le décapage de peinture). Le recyclage est déjà une pratique bien établie, puisqu'environ 95 % de l'aluminium actuellement utilisé dans le domaine de la construction provient de l'industrie du recyclage, ce qui suppose un impact environnemental positif considérable, car la fabrication d'aluminium recyclé consomme seulement 5 % de l'énergie requise pour produire de l'aluminium à partir de bauxite [A18].

Selon l'étude [A12], l'utilisation de l'aluminium au lieu d'autres matériaux de construction conventionnels dans la construction de structures peut être concurrentielle en matière de durabilité à long terme si au moins 80 % de la matière première provient d'aluminium recyclé et si l'on peut réduire de moitié le poids de la structure par rapport à une structure équivalente en acier structurel. Pour ce faire, les structures en aluminium doivent être conçues en minimisant le poids et en pensant au démontage à la fin de leur cycle de vie, au terme de laquelle elles pourront être recyclées. Toutefois, même si les applications étudiées dans cette étude étaient uniquement des structures de bâtiments, nous pouvons en venir à la conclusion, en nous appuyant sur d'autres études similaires, que l'aluminium peut, dans une perspective de durabilité et de développement durable, représenter la meilleure solution pour certaines applications en raison de son faible poids propre, de sa durabilité et de sa recyclabilité.

5 - Utilisation de l'aluminium lors de la rénovation de ponts existants

Pour rendre l'utilisation de l'aluminium avantageuse par rapport à d'autres matériaux conventionnels utilisés dans le domaine de la construction, il est essentiel de cibler les applications où les avantages suivants peuvent être pleinement exploités [A8], [A18] :

- Faible poids propre (densité faible, rapport résistance-poids élevé).
- Durabilité (forte résistance à la corrosion).
- Capacité de transformation (possibilité de créer des pièces très complexes, comme des tabliers, sous forme d'extrusions).

Le présent chapitre présente plusieurs exemples d'utilisation de l'aluminium. Certaines applications pour lesquelles l'aluminium s'avérerait avantageux pour la rénovation de ponts et de viaducs existants sont mises en évidence. Le chapitre 6 présente une discussion similaire et met l'accent sur les avantages de l'utilisation de l'aluminium lors de la construction de nouveaux ponts routiers et viaducs.

5.1 - Tablier de pont en aluminium extrudé

Plusieurs études ont examiné l'utilisation de l'aluminium pour le remplacement de tabliers [A4], [A13], [A16], [A17], [A19] et plusieurs produits brevetés sont actuellement offerts sur le marché (par exemple, [C7]). Une étude canadienne sur la faisabilité du remplacement de tabliers en aluminium est décrite dans la référence [A4]. Plusieurs exemples y sont cités, dont les systèmes ALCOA et Alumadeck (Reynolds), fabriqués aux États-Unis, ainsi que le tablier Svensson, fabriqué en Suède (figure 3). L'un des avantages significatifs de ce dernier réside dans le fait qu'il ne comprend aucune soudure, ce qui diminue nettement les risques de rencontrer des problèmes structurels liés aux phénomènes de fatigue. Le poids propre des tabliers Svensson ne dépasse pas le dixième du poids d'un tablier équivalent en béton [A4]. Une couche d'asphalte ou de mélange de résine et de gravier peut y être appliquée. Cette couche a l'avantage d'être antidérapante et de protéger le tablier. Parmi les autres avantages des tabliers en aluminium, la possibilité de réaliser très rapidement des changements de tablier (en moins de 24 heures seulement, s'il le faut) ou encore la durabilité accrue du matériau (une durée de service de plus de 80 ans est garantie par un fabricant) constituent les principaux avantages. L'étude [A4] démontre que les meilleures applications de ponts d'acier sont celles qui utilisent des tabliers de béton n'agissant pas de façon composée avec la structure principale de poutres ou de caissons. Lorsque les structures sont utilisées dans une action composite du tablier et des poutres principales, la capacité portante du pont est limitée puisque la réduction du poids mort exerce un effet contraire par rapport à l'action composite. L'étude [A4] présente une analyse et une comparaison des coûts d'entretien au cours du cycle de vie d'une structure (y compris les coûts initiaux) lors du remplacement d'un tablier par un tablier en aluminium ou un tablier en bois. Cette étude montre que les coûts sont plus faibles dans le cas du

tablier en aluminium, même si le coût initial est plus élevé. L'étude examine également les coûts du cycle de vie de deux tabliers, l'un en bois, l'autre en aluminium. Le tablier en aluminium est moins cher à long terme, même si son coût d'acquisition est supérieur.

L'étude [A13] examine en détail les tabliers suédois. Selon cette source, quelque 70 ponts en Suède ont été rénovés avec des tabliers en aluminium. Le produit SAPA se compose de deux pièces pouvant être installées entre deux lignes d'appuis (c.-à-d. sur des poutres maîtresses) sur une travée de 1,2 à 3 mètres. Toujours selon cette étude, ce produit est concurrentiel lors du remplacement d'un tablier en béton, même en ce qui a trait aux coûts initiaux [A13].

Les tabliers en aluminium extrudé ont été utilisés avec succès à de nombreuses reprises pour remplacer des tabliers en béton et ils semblent être concurrentiels en matière de coûts, autant pour les coûts initiaux que pour les frais d'entretien. Les défis associés à ces tabliers en aluminium sont l'analyse de la fatigue du système de tablier développé et l'intégration durable et non glissante de la couche d'asphalte qui y est appliquée. La capacité de la presse d'extrusions limite les dimensions potentielles de la section transversale des panneaux de tablier. En Amérique du Nord, cette limite est d'environ 20 pouces (508 mm).

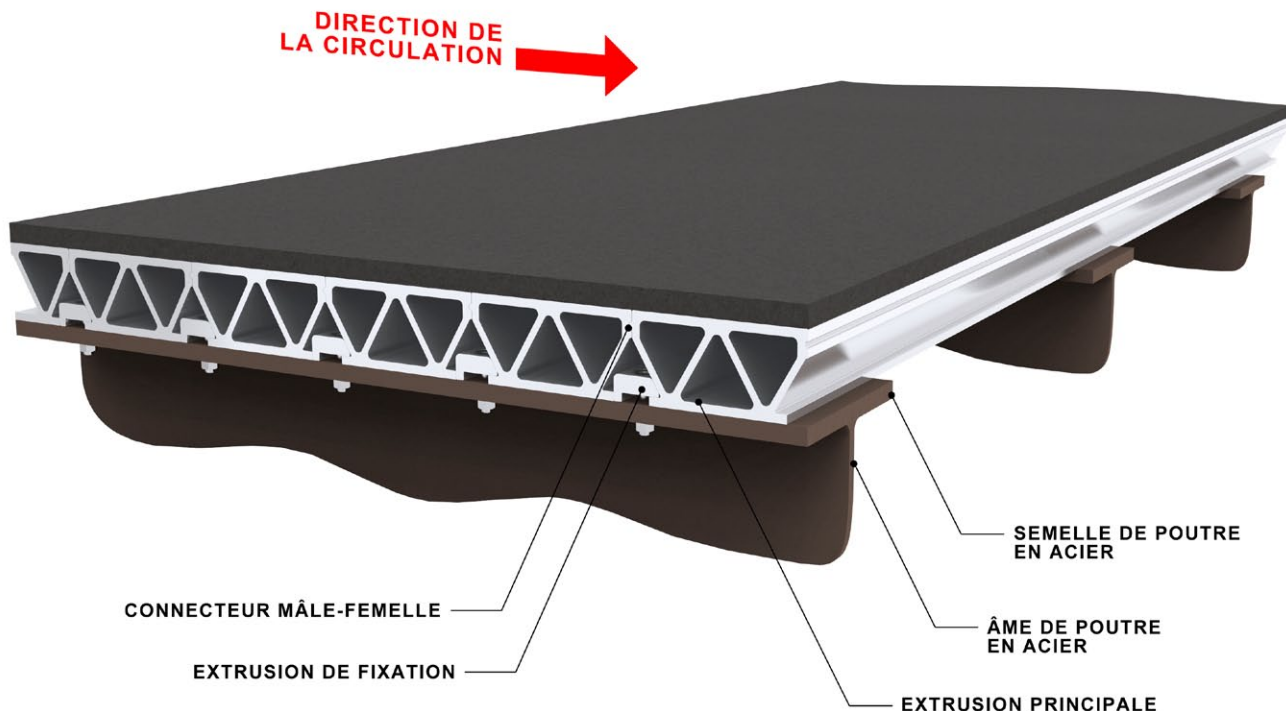


Figure 3. Système de tablier extrudé

L'utilisation de l'aluminium semble très bien convenir au remplacement de tabliers existants, car ce domaine d'application permet d'exploiter les trois principaux avantages du matériau (poids propre faible, forte résistance à la corrosion et facilité de fabriquer des sections très complexes par extrusion). Il n'est donc pas surprenant que ce domaine soit devenu l'une des applications prédominantes de l'aluminium dans la construction de ponts et de viaducs.

5.2 - Élargissement du tablier ou ajout d'une piste cyclable ou d'un passage piétonnier

L'élargissement du tablier de ponts et viaducs pour ajouter une piste cyclable ou un passage piétonnier en raison de la largeur libre insuffisante de la structure représente un autre domaine d'application de l'aluminium.

En effet, le faible poids et la grande durabilité de l'aluminium en font un matériau incontournable pour l'élargissement de ponts existants. Ce type de modification est devenu monnaie courante au fil du temps en raison des multiples changements fonctionnels auxquels les structures actuelles doivent répondre. Ces changements sont dus à l'augmentation de la circulation, mais aussi à l'intégration de modes de transport qui respectent davantage l'environnement tout en favorisant le bien-être, comme la marche et le vélo.

En considérant différents systèmes structuraux pour ce genre de modernisation, l'utilisation de l'aluminium s'impose rapidement en raison des restrictions de poids propre supplémentaire que peut supporter la structure existante qui, à la base, n'a pas été conçue pour soutenir cette augmentation de charge. L'aluminium présente un grand avantage lorsqu'il est question de minimiser le poids. Ainsi, les surcoûts initiaux de l'aluminium sont largement compensés par rapport au coût que suppose le renforcement obligatoire d'une structure existante, si un système alternatif plus lourd est choisi, ou pire, si l'ensemble de la structure doit être remplacé.

La figure 4 (gauche) montre comment il est possible d'intégrer une piste cyclable à un pont existant qui est trop étroit pour céder une voie carrossable à la circulation sécuritaire de vélos. La solution légère en aluminium se compose d'une série de douze sections en porte-à-faux, fixées par des supports aux piliers du pont existant.



Figure 4. Piste cyclable en porte-à-faux (gauche) [C8], remplacement de pont accéléré en Ontario (droite).

5.3 - Remplacement rapide d'une structure

L'exécution de travaux sur les ponts doit se faire de façon plus rapide et efficace dans les zones où la population est très dense, en raison des coûts collatéraux que la mise hors service de ces structures cause, ce qui justifie le recours à une expertise et à du matériel supplémentaire pour atténuer les effets négatifs. En Ontario, plusieurs projets de remplacement de ponts ont été réalisés en 24 heures ou moins [C9]. Les ingénieurs ayant travaillé sur les différents projets s'accordent pour dire que le coût additionnel lié à l'utilisation d'équipement de levage à haute capacité (voir figure 4, à droite) et à la logistique peut être compensé par les frais qu'aurait entraînés une période d'arrêt ou de déviation du trafic de plus d'une journée.

Ces projets étaient surtout des ouvrages de petites portées (de l'ordre de 25 m) qui se composaient de poutres mixtes acier-béton. Compte tenu de la réduction importante du poids des structures en aluminium, il est évident que ce type de structures conviendrait très bien au remplacement rapide d'un pont existant. La légèreté de l'aluminium permettrait de procéder au remplacement de ponts de petite portée en utilisant des équipements de levage de capacité moyenne, qui sont plus souvent disponibles que les grues de fort tonnage, rares et coûteuses. Les structures de plus grande portée pourraient aussi être rapidement remplacées en utilisant du matériel de levage imposant, ce qui serait impossible à réaliser si des matériaux traditionnels

comme l'acier étaient utilisés.

Cet exemple d'application de l'aluminium pour les ponts prend tout son sens en raison de l'économie immédiate que suppose la réduction du poids propre de la structure. La résistance élevée à la corrosion de la nouvelle structure est un avantage supplémentaire qui devrait se solder par une économie financière importante au cours de sa durée de vie.

6 - Possibilités d'utilisation de l'aluminium dans la construction de nouveaux ouvrages

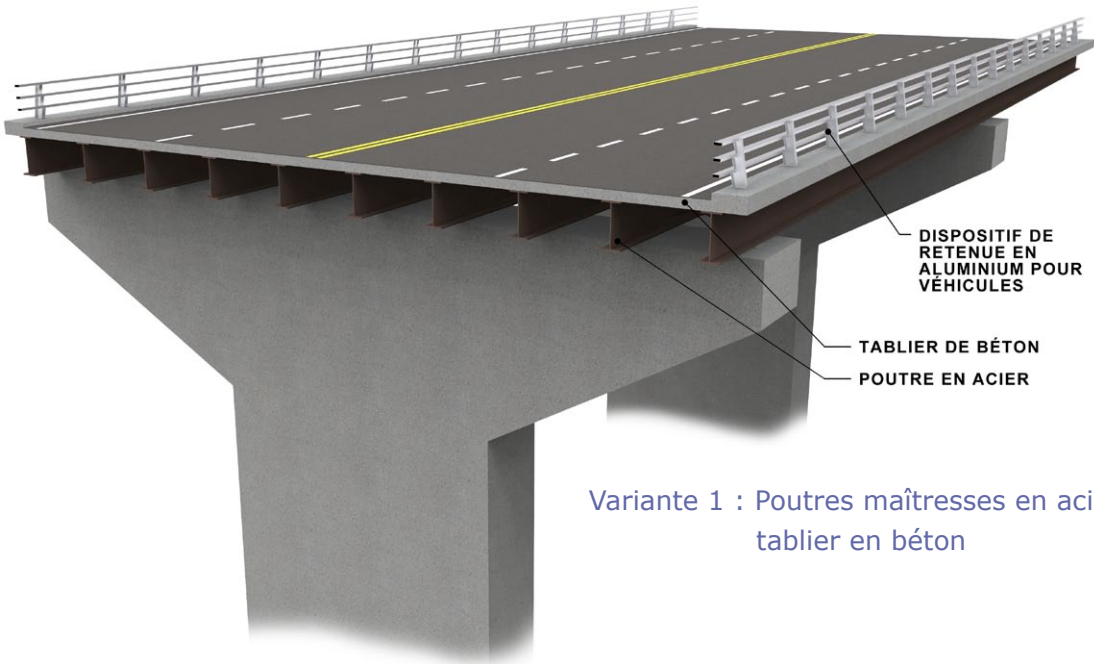
La construction de nouveaux ponts et viaducs permet également d'exploiter pleinement les avantages de l'aluminium par rapport à d'autres matériaux conventionnels. Dans ce chapitre, les différents éléments d'un pont routier pouvant être réalisés en aluminium sont passés en revue, y compris les éléments structuraux primaires et les composants secondaires.

6.1 - Éléments structuraux primaires

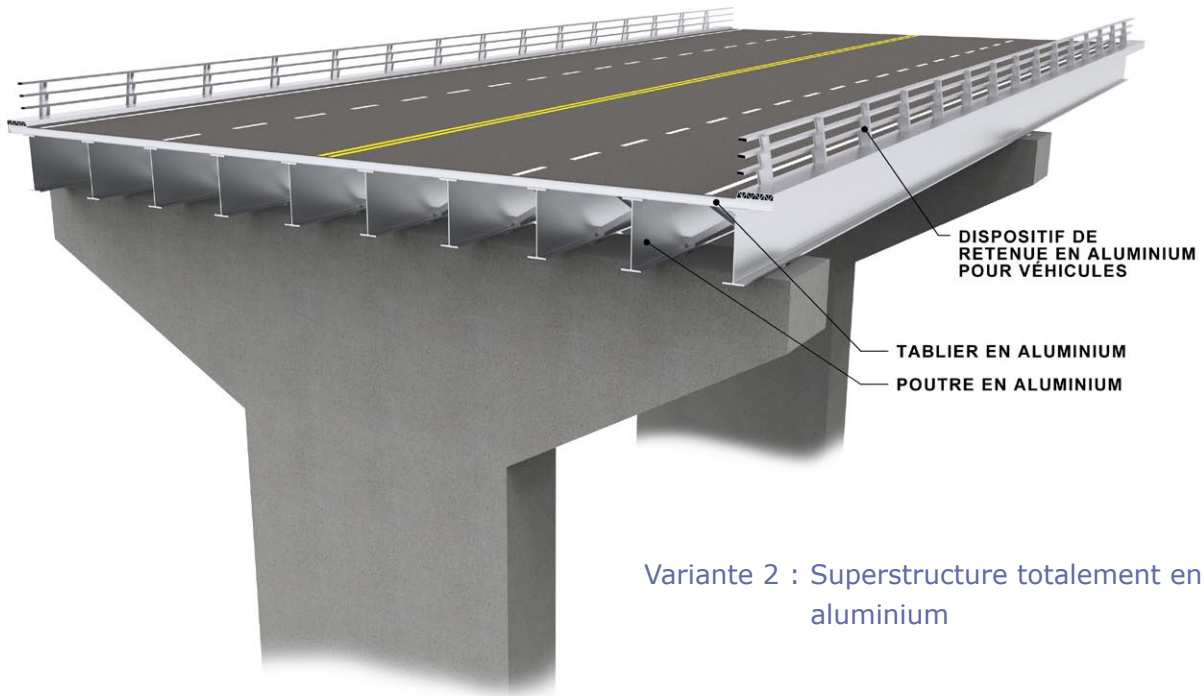
Les éléments porteurs primaires d'un pont routier pouvant être réalisés en aluminium sont le tablier, l'ensemble de la superstructure, y compris les poutres maîtresses, les entretoises et le système de contreventements. L'aluminium peut être utilisé dans la fabrication de tous ces éléments ou de certains d'entre eux, en combinaison avec des matériaux de construction plus conventionnels, comme le béton et l'acier, pour les autres éléments de la structure. La figure 5 montre plusieurs exemples de combinaison de matériaux envisageables pour les éléments structuraux primaires d'un pont routier.

Une étude, dont les détails sont exposés dans le document [A5], a comparé les coûts initiaux de construction d'un pont en aluminium et d'un pont équivalent dont certains éléments sont en acier (poutres maîtresses), d'autres en béton (tablier). Des ponts à poutres et des ponts à treillis avec des portées de 15 à 35 mètres ont été étudiés. Cette étude a conclu, en s'appuyant sur les coûts initiaux de construction, que les éléments structuraux primaires en aluminium n'étaient pas concurrentiels dans les conditions économiques étudiées (un surcoût de 70 % est estimé). Les frais d'entretien qui incombent au propriétaire de l'ouvrage pendant la durée de vie du pont ainsi que les pertes économiques que subissent les utilisateurs lors de la fermeture de l'ouvrage pour procéder à des travaux d'entretien n'ont pas été pris en compte dans cette analyse comparative, bien que ces coûts soient indissociables des coûts totaux de possession.

Dans un mémoire de maîtrise réalisé récemment [B3], des ponts routiers composés d'une série de poutres simples ont été dimensionnés selon la norme de dimensionnement pour les ponts CAN/CSA-S6 [D5] en suivant la procédure décrite dans le document-projet du nouveau chapitre 17 de cette norme. Différentes portées, allant de 25 à 40 mètres, ont été étudiées. Trois variantes de ponts ont été dimensionnées pour chaque portée (voir Figure 5) : la variante 1 consistait en un tablier en béton armé supporté par des poutres maîtresses en I en acier (matériaux conventionnels). La variante 2 était une conception faite exclusivement d'aluminium, qui se composait d'un tablier en aluminium extrudé (Svensson) supporté par des poutres maîtresses en I en aluminium. Finalement, la variante 3 consistait en un tablier en aluminium supporté par des poutres maîtresses en I en acier. Les états limites ultimes et de service ainsi que la résistance à la fatigue ont été analysés.



Variante 1 : Poutres maîtresses en acier,
 tablier en béton



Variante 2 : Superstructure totalement en
 aluminium

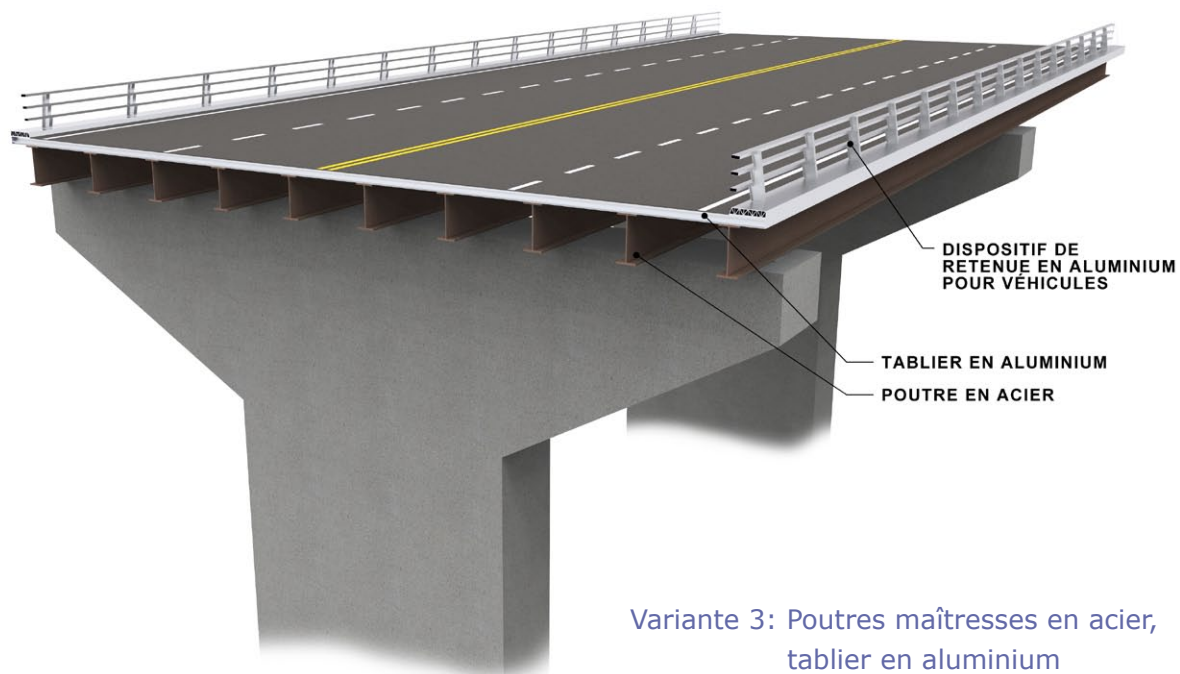


Figure 5. Différentes configurations de ponts utilisant l'aluminium (adapté de [B3]).

La figure 6 compare les poids propres des ponts dimensionnés avec leur portée respective pour chaque variante. Dans le cas des variantes 1 et 3, deux sous-variantes ont été dimensionnées : une des sous-variantes (a) est formée de poutres en acier laminées à chaud. Les propriétés de la section transversale le long de la travée sont constantes. L'autre sous-variante (b) est formée de poutres dont l'épaisseur des ailes et de l'âme varient tout au long de la portée, en fonction de la variation des efforts de dimensionnement en flexion et en effort tranchant.

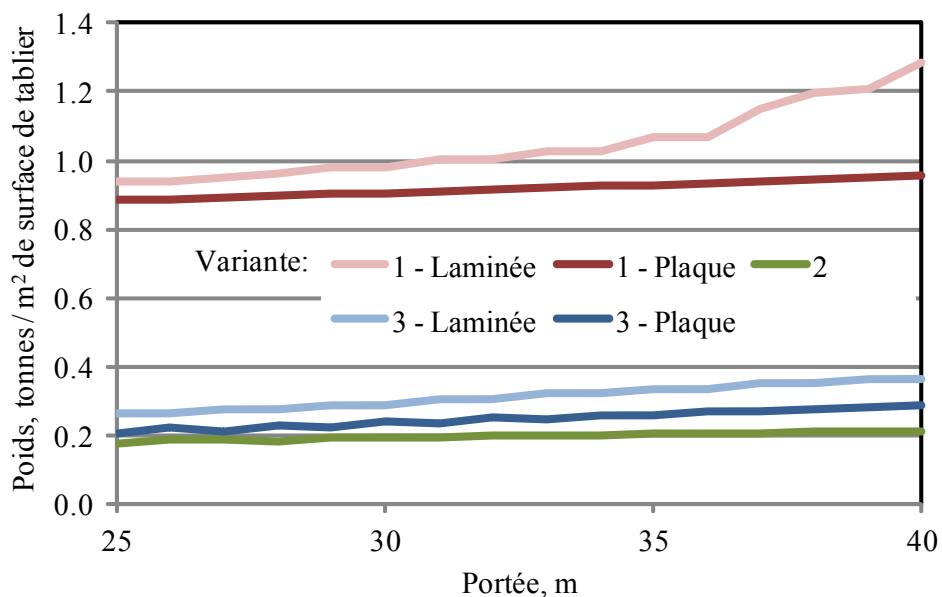


Figure 6. Poids vs portée selon différentes configurations de ponts (adapté de [B3]).

Plusieurs tendances se dégagent de la figure 6. Premièrement, une réduction significative du poids propre de l'ouvrage a lieu lors du remplacement du tablier en béton par un tablier en aluminium. En comparant les poids propres des variantes 1 et 3, on remarque que la variante 3 a un poids propre représentant entre le quart et le tiers du poids de la variante 1, selon la portée de la structure examinée. De plus, même si une réduction de poids est encore possible avec l'utilisation de poutres en aluminium, la différence de poids est moindre lors du remplacement du tablier en béton par un tablier en aluminium.

Selon l'étude [B3], on estime que les coûts initiaux de construction sont plus élevés de 80 % lorsque la variante 2 l'emporte sur la 1(b). L'étude montre que les frais d'entretien moins élevés de la variante en aluminium ne sont pas suffisamment bon marché pour compenser les surcoûts initiaux sur une période d'analyse de 75 ans, en supposant que le coût moyen de peinture d'une surface en acier s'élève à 117 \$/m² et que les travaux de peinture doivent avoir lieu tous les 15 ans. Si les coûts associés à la peinture augmentent, la solution de l'aluminium devient concurrentielle. Après discussion avec des experts de l'industrie, le coût moyen de la peinture qui a été admis dans l'étude [B3] est sans doute le meilleur cas de figure et représente le coût type d'une pose de peinture en atelier ou sur place, sans tenir compte du coût relatif à l'accès à la structure et à la protection de l'environnement lors des travaux (c'est-à-dire la récupération par des moyens physiques des particules produites lors du sablage au jet). Ces coûts additionnels peuvent être bien plus élevés que le coût de base de la peinture, selon l'accessibilité et la sensibilité de l'environnement sur le site. Cela laisse croire qu'un pont sans peinture en aluminium pourrait présenter des coûts globaux inférieurs sur l'ensemble de sa durée de vie lorsque l'on estime que ces coûts supplémentaires seront élevés.

Les coûts significatifs devant être supportés par des personnes autres que le propriétaire de l'ouvrage n'ont pas non plus été pris en compte dans l'étude [B3]. Ces coûts pourraient être induits par des fermetures fréquentes de l'ouvrage pour y réaliser des opérations d'entretien ou de rénovation. Dans une étude réalisée récemment [A22], une analyse des « coûts totaux » a été effectuée afin d'évaluer différentes stratégies possibles pour faire face au problème de corrosion d'un pont routier en acier en Suisse. En s'appuyant sur cette analyse, si l'on tient compte des coûts que supposent les détours imposés et l'augmentation du volume du trafic pour toutes les personnes concernées (le propriétaire, les utilisateurs et le public en général), au lieu de s'attarder uniquement aux coûts devant être pris en charge par le propriétaire de l'ouvrage, le rapport des coûts critiques d'une solution utilisant des aciers plus résistants à la corrosion (comme l'acier intempérique) ou une peinture de protection (métallisation au zinc) augmente considérablement.

Même si l'aluminium n'était pas l'une des variantes étudiées dans cette étude, les coûts d'entretien des poutres en acier peuvent servir à quantifier le coût engendré par la corrosion et à calculer les économies qu'il serait possible de réaliser en utilisant des matériaux plus durables pour la construction de la structure porteuse d'un pont routier. Cette idée est représentée graphiquement sur la Figure 7. Le pont étudié dans l'étude [A22] supporte deux voies carrossables et franchit un cours d'eau. Il possède deux travées en portées simples, chacune mesurant approximativement 25 mètres. Plusieurs possibilités de détours et différents volumes de trafic ont été analysés. Dans la figure 7, deux cas sont illustrés, dont un cas typique (2,4 km de détour, trafic journalier moyen [TJM] de 650) et un cas avec une longueur de déviation ainsi qu'un volume de trafic significativement augmenté, mais quand même réaliste (10 km de détour, TJM de 8000). La figure 7 illustre également la variation des coûts imposés au propriétaire. L'hypothèse de l'étude est que la durée de vie moyenne d'une couche de peinture de protection est de 20 ans.

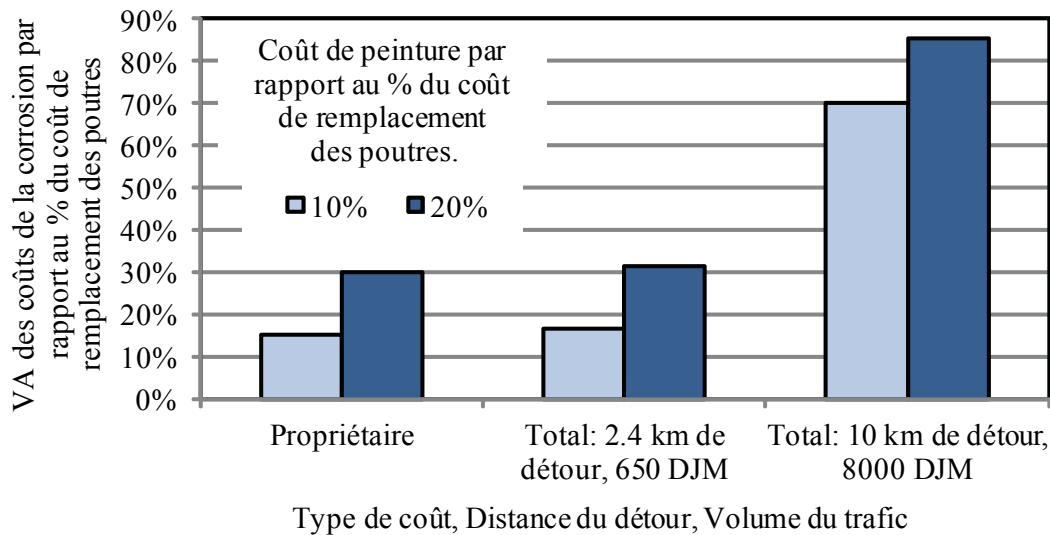


Figure 7. Coûts associés à la corrosion d'une poutre peinte en acier dans des conditions de corrosion extrêmes (adapté de [A22]).

Les résultats représentés à la figure 7 ont été obtenus en admettant un taux d'actualisation de 2 % et une durée de service de 100 ans dans un environnement très corrosif (haute exposition aux chlorures). Les résultats montrent une valeur actualisée (VA) des coûts engendrés par la corrosion moins élevés que ceux engendrés par la fabrication de poutres en aluminium (70-80 % de surcoût) si seuls les coûts supportés par le propriétaire de l'ouvrage sont pris en considération ou si la déviation du trafic et le volume de trafic dévié sont faibles. Cependant, les coûts totaux attribuables à la corrosion peuvent dépasser le prix de fabrication de poutres équivalentes en aluminium si la longueur de déviation du trafic, le volume de trafic ainsi que les coûts de la peinture augmentent. En nous appuyant sur cette observation, nous pouvons en venir à la conclusion que, grâce à sa haute résistance à la corrosion, l'aluminium sans protection représente une solution très intéressante pour la fabrication d'éléments d'une superstructure de pont lorsque certaines des conditions suivantes sont réunies : (1) l'environnement est très corrosif; (2) les coûts de peinture estimés sont élevés (en raison de l'accessibilité à l'ouvrage et de contraintes environnementales); (3) l'estimation des coûts pour les utilisateurs est élevée lors de travaux d'entretien (long détour ou volume de trafic élevé). Les résultats de l'étude tiennent compte d'un seul des nombreux avantages de l'aluminium : sa forte résistance à la corrosion. Des économies pourraient encore être réalisées compte tenu de la faible densité volumique de l'aluminium, notamment lors de projets de remplacement rapide de ponts ou dans le cas de ponts transportables. Ces économies potentielles supplémentaires ne sont pas prises en considération dans cette étude. Il serait utile de réaliser d'autres études à cet égard et de poursuivre le travail entamé dans l'étude [A22] en examinant d'autres géométries de pont et des estimations de coûts différentes dans un contexte nord-américain.

6.2 - Éléments structuraux secondaires

En plus des éléments structuraux primaires, plusieurs éléments secondaires peuvent être fabriqués en aluminium. Ils sont illustrés à la figure 8.

Les passerelles pour piétons ou cyclistes en porte-à-faux peuvent être faites d'aluminium lorsqu'un nouveau pont est construit et être intégrées de la même manière que lors de la rénovation d'une structure existante. Les avantages sont les mêmes dans les deux cas : faible poids propre, durabilité et esthétique des alliages d'aluminium corroyés (sans protection de surface). Même si beaucoup d'ouvrages sont seulement visibles de loin ou ne peuvent être appréciés que furtivement en les parcourant en véhicule, les structures en porte-à-faux pour cyclistes et piétons permettent aux usagers de les observer plus attentivement, d'où l'avantage de recourir à l'aluminium, dont les qualités esthétiques sont reconnues.

L'utilisation de l'aluminium est bien répandue dans la construction de lampadaires et de structures supportant les panneaux de signalisation. Des normes pour le dimensionnement de ces structures sont disponibles [D5], [D6] et plusieurs entreprises se spécialisent dans leur fabrication (par exemple, [C10]). À nouveau, ce type d'application où le faible poids de la structure, la résistance à la corrosion et la possibilité d'utiliser des extrusions font de l'aluminium un matériau de premier choix. Des éléments en aluminium coulé sont également utilisés dans ce genre d'applications. L'utilisation de longue date de l'aluminium tend à montrer que les lampadaires et les structures supportant les panneaux de signalisation offrent un très bon rendement. Certains problèmes antérieurs de corrosion liés à ce type de structures sont dus à la réalisation non conforme des détails de construction, lorsque l'aluminium est en contact direct avec le béton. Un certain nombre de fissures de fatigue ont également été observées. Elles sont apparues à la suite de cycles de charge extrêmes, comme ceux que provoquent les ouragans. Les études qui ont abordé ce problème potentiel ont permis une meilleure compréhension du phénomène de chargement cyclique et du comportement de ces éléments à la fatigue. Des recommandations pour améliorer la qualité des détails constructifs ont également été élaborées [A15], [B1].

Les produits en aluminium destinés à la fabrication de barrières (garde-corps, glissières de sécurité, dispositifs de retenue) sont répertoriés dans quelques normes et directives [D5, C11]. Ces éléments sont produits par différents fabricants (par exemple, [C12]). En général, les normes et recommandations relatives à ces éléments fournissent un prédimensionnement pour différentes charges d'impacts de véhicules, charges qui sont spécifiées par l'ingénieur responsable du dimensionnement de l'ensemble de l'ouvrage. Dans le domaine des glissières de sécurité, les produits en acier offrent normalement la plus haute résistance. Cependant, lorsque les charges de dimensionnement pour les impacts de véhicules sont plus faibles, les produits réalisés en aluminium suscitent un certain intérêt grâce à leur haute résistance à la corrosion. De plus, ils pourraient représenter le choix logique pour des raisons architecturales, lorsque l'aspect esthétique est fondamental.

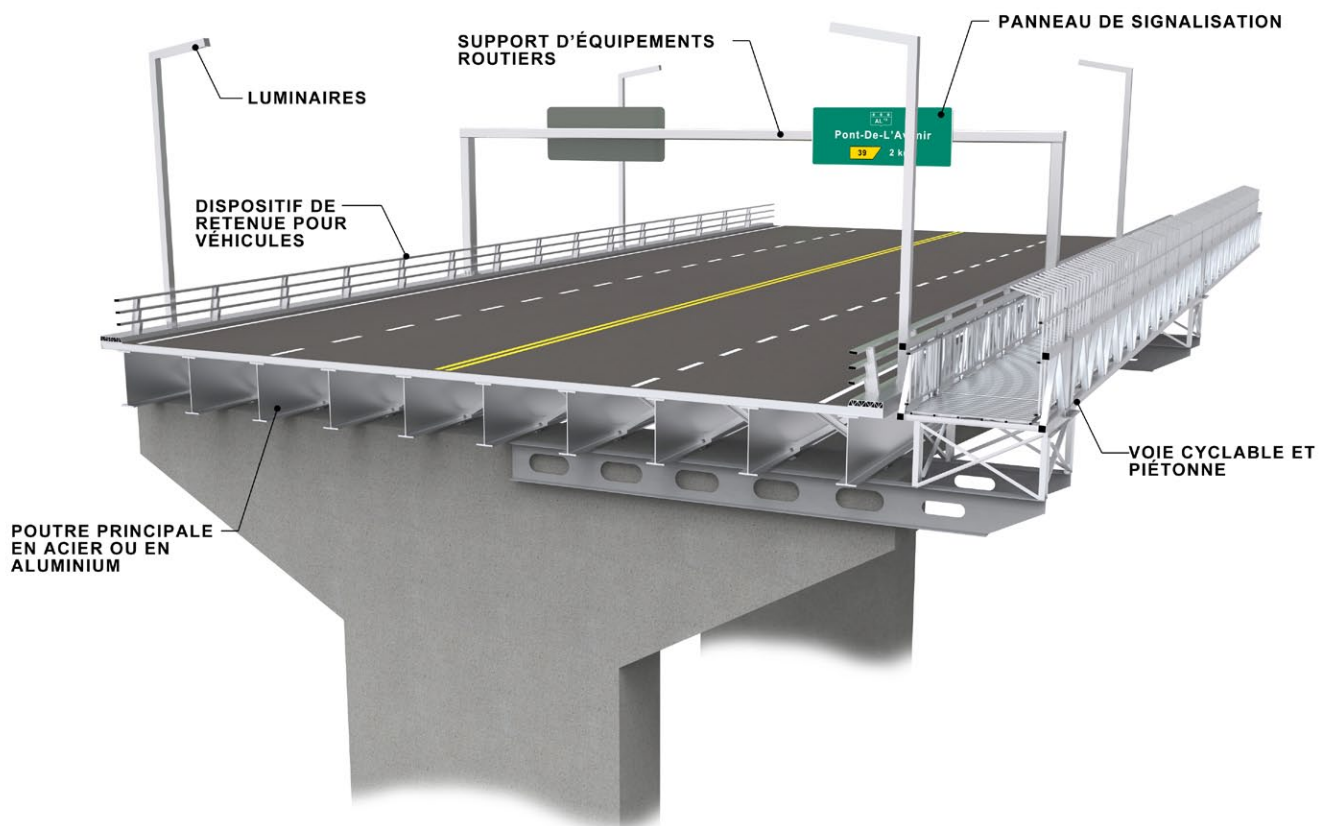


Figure 8. Utilisation de l'aluminium dans les éléments structuraux secondaires des ponts.

7. Sommaire et conclusions

Ce rapport expose brièvement l'historique de l'utilisation de l'aluminium dans la construction des ponts routiers et de viaducs. Des solutions sont proposées pour exploiter plus efficacement l'aluminium dans le domaine des ponts routiers et viaducs. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1 - Depuis près de 80 ans, l'aluminium offre un bon rendement dans des applications de ponts routiers. Différents projets ont prouvé qu'il était possible de construire un pont routier fait exclusivement d'aluminium. Les applications les plus fréquentes et celles ayant remporté le plus de succès comprennent le remplacement de tabliers existants et la construction de passerelles piétonnes, de ponts levants (ou à bascule), de ponts flottants et de ponts temporaires.

2 - Des normes et des recommandations ont récemment été publiées ou mises à jour pour faciliter le dimensionnement de ponts routiers en aluminium. Dans la mesure du possible, elles ont été rédigées pour correspondre le plus possible aux normes actuelles s'appliquant à l'acier afin que les ingénieurs puissent se familiariser avec ces nouvelles normes le plus rapidement possible, en diminuant les difficultés liées à leur compréhension.

3 - En ce qui concerne les perspectives d'utilisation, les avantages des alliages d'aluminium sont leur faible poids propre, leur haute résistance à la corrosion et leur extrudabilité. Les meilleurs domaines d'application de l'aluminium sont ceux qui peuvent exploiter ces avantages de façon optimale.

4 - Les plus grands défis liés aux propriétés de l'aluminium lors de la construction d'un pont sont son faible module d'élasticité et sa résistance à la fatigue en comparaison avec celle de l'acier traditionnel, la réduction locale de la limite élastique qui peut être observée dans de nombreux alliages à proximité de soudures et son coût initial élevé. Ces désavantages peuvent être compensés par une bonne conception des détails constructifs, l'utilisation de techniques modernes de soudage par friction-malaxage (SFM), lorsqu'il est possible de le faire, et un choix du matériau se fondant sur une analyse des coûts de l'ensemble de la durée de vie de l'ouvrage.

5 - Les domaines d'utilisation de l'aluminium dans le cadre des opérations d'entretien et de construction d'ouvrages neufs comprennent le remplacement de tabliers existants, l'élargissement de tabliers, l'ajout d'un passage piétonniers ou d'une piste cyclable et les projets de remplacement rapide de structures.

6 - Les éléments structuraux primaires pouvant être fabriqués en aluminium lors de la construction d'ouvrages neufs sont les tabliers, les poutres maîtresses, les entretoises et les systèmes de contreventements. Les avantages liés à l'utilisation de l'aluminium pour ce type d'applications sont plus évidents dans un environnement hautement corrosif et lorsque l'on considère les coûts supportés par l'ensemble des personnes affectées par les opérations d'entretien durant la totalité de la durée de service de l'ouvrage. L'aluminium s'impose de manière plus évidente lorsque les coûts d'entretien liés à la peinture sont élevés, notamment en raison d'un accès difficile à la structure, de contraintes liées à la protection de l'environnement et lorsque les frais d'entretien sont élevés (si une longue déviation de la circulation est nécessaire et que le volume de trafic dévié est important).

7 - Actuellement, l'aluminium sert aussi à la fabrication d'éléments structuraux secondaires, comme les structures connexes de passerelles pour piétons et cyclistes, les lampadaires, les structures supportant les panneaux de signalisation et les barrières (garde-corps, dispositifs de retenue). Dans ces applications, le faible poids, la durabilité et les qualités esthétiques de l'aluminium constituent ses principaux avantages.

Références

Nouvelles, conférences et articles scientifiques :

- [A1] Globe and Mail. (July 24, 2008). "Ontario, Ottawa to Spend Billions on Infrastructure."
- [A2] Montreal Gazette. (March 29, 2012). "New Champlain Bridge to be Completed in 2021-2022."
- [A3] Sanders, W.W. & Abendroth, R.E. (1995). "Construction and Evaluation of a Continuous Aluminum Girder Highway Bridge." 6th International Conference on Aluminum Weldments, Cleveland, OH.
- [A4] Arrien, P., Bastien, J., & Beaulieu, D. (2001). "Rehabilitation of Bridges Using Aluminum Decks." Canadian Journal of Civil Engineering, 28(6):992-1002.
- [A5] Roy, C., Beaulieu, D., & Bastien, J. (2001). « Utilisation d'éléments structuraux en aluminium dans les ponts routiers: Etude économique et structurale. » Canadian Journal of Civil Engineering, 28(6):1029-1040.
- [A6] Hag-Elsafi, O. & Alampalli, S. (2002). "Cost-Effective Rehabilitation of Two Aluminum Bridges on Long Island, New York." Practical Periodical on Structural Design and Construction.
- [A7] Okura, I. (2003). "Application of Aluminum Alloys to Bridges and Joining Technologies." Welding International, 17:781-785.
- [A8] Mazzolani, F.M. (2006). "Structural Applications of Aluminum in Civil Engineering." Structural Engineering International, 4:1-4.
- [A9] Radlbeck, C., Dienes, E., & Kosteas, D. (2006). "Sustainability of Aluminum in Buildings" Structural Engineering International, 4:221-224.
- [A10] Siwowski, T. (2006). "Aluminum Bridges – Past, Present and Future." Structural Engineering International, 4:286-293.
- [A11] Gitter, R. (2006). "Aluminum Material for Structural Engineering - Essential Properties and Selection of Materials." Structural Engineering International, 4:294-300.
- [A12] Radlbeck, C., Dienes, E., & Kosteas, D. (2006). "Aluminium Structures – A Sustainable Future?" Structural Engineering International, 4:339-344.
- [A13] Høglund, T. & Nilsson, L. (2006). "Aluminium in Bridge Decks and in a New Military Bridge in Sweden." Structural Engineering International, 4:348-351.
- [A14] Mader, W. & Pieper, A. (2006). "Schwansbell Bridge Celebrating 50th Birthday." Structural Engineering International, 4:356-359.
- [A15] Azzam, D. & Menzemer, C.C. (2006). "Fatigue Behavior of Welded Aluminum Light Pole Support Details." ASCE Journal of Structural Engineering, 132:1919-1927.
- [A16] Das, S. K. & Kaufman, J. G. (2007). "Aluminum Alloys for Bridges and Bridge Decks." The Minerals, Metals & Materials Society, 61-72.
- [A17] Maljaars, J., Soetens, D., & De Kluijver, D. (2008). "Structural Design of Aluminium Bridge Decks for Existing Traffic Bridges." 17th Congress of IABSE: Creating and Renewing Urban Structures, Chicago.
- [A18] Tindall, P. (2008). "Aluminium in Bridges." ICE Manual of Bridge Engineering, 345-355.
- [A19] Siwowski, T.W. (2009). "Structural Behaviour of Aluminium Bridge Deck Panels." Engineering Structures, 31:1349-1353.
- [A20] Soetens, F. (2010). "Aluminium Structures in Building and Civil Engineering Applications." Structural Engineering International, 20(4): 430-435.
- [A21] Coughlin, R. & Walbridge, S. (2012). "Fatigue Testing and Analysis of Aluminum Welds under In-Service Highway Bridge Loading Conditions." Journal of Bridge Engineering.
- [A22] Walbridge, S., Fernando, D., & Adey, B.T. (2012). "Total Cost-Benefit Analysis of Alternative Corrosion Management Strategies for a Steel Roadway Bridge." Journal of Bridge Engineering.

Mémoires et thèses:

[B1] Bédard, S. (2000). « Comportement des structures de signalisation aérienne en aluminium soumises à des sollicitations cycliques. » Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC.

[B2] Coughlin, R. (2010). "Fatigue of Aluminum Welds in Canadian Highway Bridges." M.A.Sc. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, ON.

[B3] Sollet, G. (2010). "Aluminum Highway Bridges: Design and Life Cycle Cost Analysis." Master's Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

Rapports en ligne et autres documents accessibles sur l'Internet:

[C1] American Society of Civil Engineers. (2009). "Report Card for America's Infrastructure." www.infrastructurereportcard.org

[C2] Statistics Canada. (2009). "Age of Public Infrastructure: A Provincial Perspective." www.statcan.gc.ca/pub/11-621-m/11-621-m2008067-eng.htm.

[C3] Council of the Federation. (2005). "Looking to the Future: A Plan for Investing in Canada's Transportation System." www.councilofthefederation.ca/pdfs/NTS_Booklet.pdf.

[C4] Office of the Auditor General of Ontario. (2009). "2009 Annual Report." www.auditor.on.ca/en/reports_en/en09/302en09.pdf.

[C5] Houska, C. "Deicing Salt – Recognizing the Corrosion Threat." www.imoa.info/_files/pdf/DeicingSalt.pdf.

[C6] "Considérations relatives au coût et à la durée de vie : l'aluminium représente un matériau de choix pour les projets d'ingénierie civile en raison de sa durabilité et du peu d'entretien qu'il nécessite." <http://www.maadigroup.com/lang/fr/tco>.

[C7] SAPA bridge deck: www.sapagroup.com/en/na/profiles/products/aluminum-bridge-decking.

[C8] Ponts piétons MAADI Group Inc.: www.maadigroup.com.

[C9] MTO rapid bridge replacement projects: www.417queenswaybridges.ca.

[C10] HAPCO aluminum pole products: www.hapco.com.

[C11] FHWA Bridge Rail Guide (2005): www.fhwa.dot.gov/bridge/bridgerail.

[C12] AMG aluminum highway railing products: www.amgmetals.com.

Normes et règles de conception et recommandations:

[D1] Calcul de la résistance mécanique des éléments en aluminium/ Commentaire sur la CSA S157-05, Calcul de la résistance mécanique des éléments en aluminium."

[D2] European Committee for Standardization, (2009). "Eurocode 9 – Design of Aluminium Structures."

[D3] Aluminum Association, (2010). "ADM-10: Aluminum Design Manual – Specifications and Guidelines for Aluminum Structures."

[D4] American Association of State Highways and Transportation Officials, (2007). "AASHTO LRFD Bridge Design Specification: Fourth Edition."

[D5] Normes de l'Association canadienne de normalisation (CSA), (2006). "CAN/CSA-S6-06: Code canadien sur le calcul des ponts routiers Supplément n° 2 – Octobre 2011."

[D6] American Association of State Highways and Transportation Officials, (2009). "Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals."