



Analyse du coût du cycle de vie de ponts à platelage en aluminium

Victor Desjardins, ing. jr. M.Sc.

Université Laval/Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL

18 mars 2020

Analyse du coût du cycle de vie de ponts à platelage en aluminium

Victor Desjardins, ing. jr., M.Sc. – Université Laval / Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL

Avant-propos : Cet article synthétise un travail de maîtrise réalisé à l'Université Laval en 2017-2019, au sein du Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL, par Cassandra Bayan, sous la direction des professeurs Luca Sorelli et Mario Fafard. Ce projet de maîtrise faisait partie d'un projet de recherche financé par le ministère des Transports du Québec; le rapport final est disponible à l'adresse suivante : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1240295.pdf> [1].

1. Introduction

1.1. Contexte

L'aluminium a des propriétés qui rendent son usage potentiellement intéressant dans les ponts et les ouvrages d'art. En premier lieu, l'aluminium a un rapport résistance/poids élevé, ce qui permet de créer des structures plus légères, à charge de conception équivalente, qu'avec de l'acier ou du béton [2]. Cela est particulièrement utile dans le cas de la réfection de ponts à la capacité limitée ou pour les ponts à bascule. En outre, la légèreté de l'aluminium (2,7 tonnes/m³ contre 7,85 tonnes/m³ pour l'acier) permet de faciliter la manutention en usine et le transport sur chantier d'éléments préfabriqués. L'aluminium possède également une excellente résistance naturelle à la corrosion [3]. Cela permet de limiter les travaux d'entretien et de réparation à cet égard, ce qui est particulièrement utile dans un environnement agressif, comme au Québec, où l'usage des sels de déglacage est important.

Le Centre d'expertise et d'innovation sur l'aluminium d'AluQuébec (CeIAI) a dénombré 97 ponts utilisant de l'aluminium en tant que matériau structural dans le monde. L'observation de l'état général des ponts montre généralement une bonne durabilité pour un entretien faible [4] [5] [6] [7]. Au Québec, le pont d'Arvida (Figure 1-1) illustre la durabilité de l'aluminium : il a été construit en 1950 avec une structure entièrement en aluminium et une dalle en béton. En 2020, après 70 ans de service, le pont n'aura nécessité qu'un remplacement de la dalle de béton et le remplacement de certaines membrures en aluminium, dégradées par la corrosion galvanique. Notons que l'alliage utilisé à l'époque (série 2xxx) n'est plus utilisé de nos jours. Un autre pont utilisant de l'aluminium a été construit au Québec : il s'agit du pont de St-Ambroise, construit en 2015 avec un platelage en aluminium sur des poutres en acier. [Lire l'article « *Construction d'un pont à platelage en aluminium à St-Ambroise, Québec* » paru dans la Revue L'ingénieur civil canadien, Printemps 2018. Pages 10-14]



Figure 1-1 : Pont en aluminium d'Arvida en juillet 2018 (crédit photo : Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL).

L'aluminium est également un matériau de première importance pour le Québec. En effet, le Québec produit 90 % de l'aluminium primaire produit au Canada. Ainsi, en 2015, le gouvernement du Québec a lancé sa *Stratégie québécoise de développement de l'aluminium (SQDA)*, qui vise à doubler la transformation d'aluminium au Québec d'ici 2025 [8]. Dans le cadre de cette stratégie, des fonds sont alloués au ministère des Transports du Québec, afin de développer l'utilisation de l'aluminium dans ses infrastructures. Ces fonds ont été mis à profit pour mener plusieurs projets de R-D, dont l'objectif global était de développer un platelage de pont routier en aluminium adapté aux conditions climatiques québécoises [9]. Plusieurs projets préliminaires ont ainsi été réalisés pour étudier certaines problématiques liées à l'utilisation de l'aluminium dans les ponts [10] [11] [12] [13]. Puis, un projet plus large a été lancé pour réaliser la conception complète d'un platelage de pont en aluminium pour pont routier [14] [15]. Dans le but de quantifier la compétitivité de ce platelage, en matière de coût, un autre projet a été lancé, visant à faire l'analyse du coût du cycle de vie d'un pont à platelage en aluminium, et le comparer au coût sur le cycle de vie de ponts équivalents, utilisant les matériaux usuels (bois et béton) [16].

Le platelage en aluminium qui fait l'objet de cette étude est constitué de profilés multicellulaires, extrudés en aluminium et soudés avec le procédé MIG. Le platelage se présente sous forme de panneaux de 3 m de large, s'assemblant entre eux par un dispositif de joint mécanique boulonné.

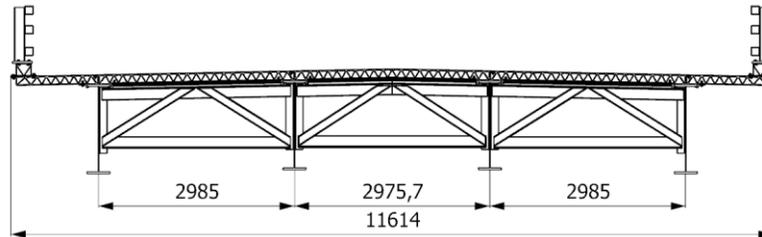


Figure 1-2 : Vue en coupe du tablier de pont conçu par l'équipe de recherche du Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL (crédit: Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL).

1.2. Problématique et objectif

Un platelage en aluminium a un coût de fabrication substantiellement plus important que le coût de fabrication de solutions plus classiques, comme un platelage en madriers de bois ou une dalle de béton. Une étude préliminaire estime ainsi que la fabrication d'un platelage en aluminium serait 2,6 fois plus dispendieuse qu'une dalle de béton équivalente [17]. Ainsi, en dépit de ses avantages, l'utilisation de l'aluminium est pénalisée par un coût **initial** important.

Cependant, en considérant la durabilité importante des structures en aluminium, on peut conjecturer que les **coûts d'entretien sur le cycle de vie seront suffisamment faibles pour contrebalancer le prix initial** élevé. Certaines études tendent à conforter cette hypothèse [18].

L'objectif de l'étude est donc de quantifier le coût sur le cycle de vie d'un pont à platelage en aluminium sur poutres d'acier et de le comparer à celui d'un pont à dalle de béton sur poutres d'acier, ainsi qu'à celui d'un platelage en madriers de bois sur poutres d'acier.

2. Méthodologie

2.1. Méthodologie d'une analyse économique du cycle de vie

L'analyse du coût du cycle de vie est un outil économique d'aide à la décision qui permet de comptabiliser l'ensemble des coûts d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie, c'est-à-dire de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie (« du berceau à la tombe »). Le périmètre des coûts à considérer est défini dans la norme ISO 15686-5 [19]. Il comprend les coûts de construction, d'exploitation, d'entretien, de fin de vie, ainsi que les coûts environnementaux (Figure 2-1).

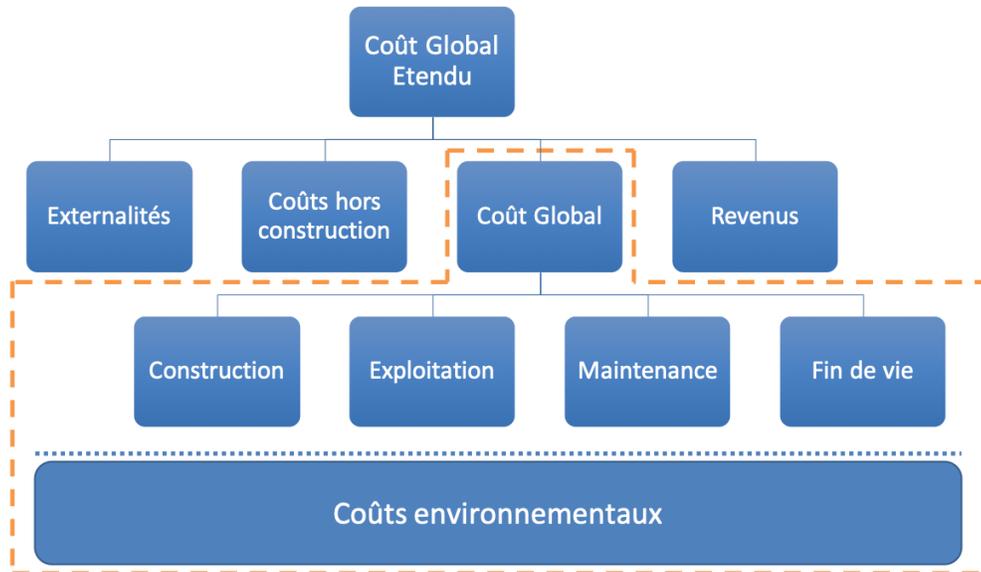


Figure 2-1 : Périmètres des coûts d'une ACCV d'après la norme ISO 15686-5.

La méthodologie globale d'une analyse de cycle de vie est également normée et se compose de trois principales étapes :

1. La définition des objectifs et du champ de l'étude, qui consiste notamment à définir l'unité fonctionnelle du système étudié et les frontières de l'étude;
2. L'inventaire des flux économiques, c'est-à-dire la quantification des coûts entrant et sortant du système aux différentes étapes du cycle de vie;
3. Le calcul du coût du cycle de vie, en faisant la somme des coûts, actualisés à une même année.

À ces trois étapes, il faut ajouter une étape parallèle qui consiste à interpréter, avec un regard critique, les données récoltées et les hypothèses prises tout au long de l'analyse, afin de garantir la qualité des résultats. La méthodologie est illustrée sur la Figure 2-2.

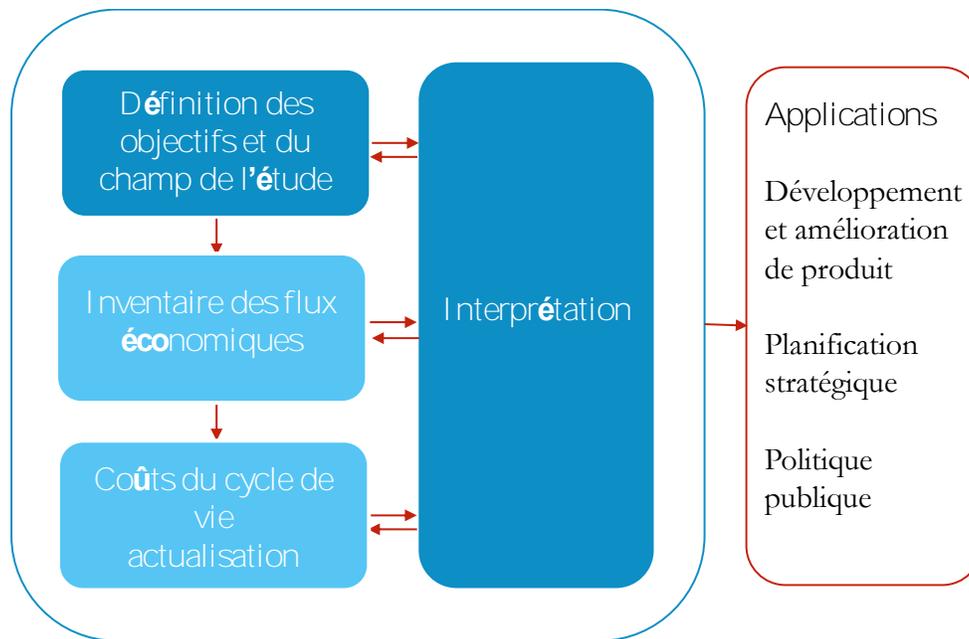


Figure 2-2 : Phases de la réalisation d'une ACCV.

2.2. Périmètre du projet

Le périmètre du projet est défini par les éléments suivants : les scénarios étudiés, la définition de l'unité fonctionnelle et les frontières de l'étude.

Les analyses de cycles de vie dans cette étude seront réalisées en suivant deux scénarios, représentant chacun un milieu différent. Le premier scénario concerne un milieu rural : on compare un pont à platelage en aluminium sur poutres d'acier à un pont à platelage en madriers de bois sur poutres d'acier. Le second scénario est relatif à un milieu urbain : on compare un pont à platelage en aluminium sur poutres d'acier à un pont à dalle de béton sur poutres d'acier. Ces milieux, urbains et ruraux, sont principalement caractérisés par le débit de véhicules et la longueur de la déviation en cas de fermeture du pont. Les ponts comparés aux ponts avec un platelage en aluminium, c'est-à-dire le pont à madriers de bois et le pont à dalle de béton, ont été choisis, car ils sont des structures typiques des milieux considérés.

L'unité fonctionnelle qualifie la fonction du système étudié, c'est-à-dire des ponts dans cette étude, et constitue une base de comparaison pour l'évaluation des différents cas étudiés. Dans cette étude, l'unité fonctionnelle est la construction d'un pont de 20 m de portée, à deux voies de circulation, permettant d'assurer le franchissement d'une route par des véhicules pendant une durée de 75 ans.

Les frontières de l'étude caractérisent le périmètre de l'analyse. Il y a deux frontières : temporelle et spatiale. La frontière temporelle est de 75 ans, ce qui correspond à la durée typique de service d'un pont telle qu'exigée par la norme canadienne sur les ponts routiers, CAN/CSA S6-14 [20]. La frontière spatiale est délimitée par la superstructure de l'ouvrage. C'est-à-dire qu'on ne considérera que le platelage et les poutres. Les autres éléments (culées, approches, etc.) sont considérés équivalents pour tous les scénarios et sont donc exclus de l'étude.

2.3. Conception des ponts d'étude

Tableau 2-2 : Calendrier d'entretien pour les ponts acier-aluminium (milieu rural et milieu urbain).

Éléments	Années															
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Surface de roulement						①					①					
Boulons dessous						①					①					
Boulons dessus											①					
Platelage																
Glissières																
Poutres																

① Remplacement ② Entretien

Le calendrier d'entretien du pont acier-béton est présenté sur le Tableau 2-3. La surface de roulement subit un entretien (resurfaçage) aux 15 ans et un remplacement au bout de 50 ans. La dalle subit un entretien au bout de 25 ans et un remplacement complet (incluant la membrane, les chasse-roues et les glissières) au bout de 50 ans, Les surfaces extérieures et en porte-à-faux subissent une imperméabilisation tous les 10 ans. Il est à noter que ce calendrier d'entretien a été établi sur la base des connaissances disponibles au MTQ au moment de la collecte de données. Il est cependant vraisemblable que pour les ponts construits récemment ou dans le futur, la fréquence et l'ampleur des réparations nécessaires soient moindres, du fait de l'amélioration des matériaux, des techniques de mise en œuvre et des normes de conception des ouvrages.

Tableau 2-3 : Calendrier d'entretien pour le pont acier-béton.

Éléments	Années															
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Enrobé bitumineux			②			①		②			①		②			
Membrane						①					①					
Dalle						②					①					
Surface en porte-à-faux			②		②		②		②		①		②		②	
Chasse-roues											①					
Surface extérieure			②		②		②		②		①		②		②	
Glissières											①					
Poutres											②					

① Remplacement ② Entretien

2.5. Collecte de données

La collecte de données est une étape importante dans la réalisation d'une analyse du coût du cycle de vie, car la qualité des données impacte directement la qualité des résultats. Les données collectées

appartiennent à deux catégories : les données relatives aux coûts directs et les données relatives aux coûts indirects.

Les coûts directs sont les coûts supportés par le propriétaire de l'ouvrage, c'est-à-dire les opérations de construction et d'entretien. Les données relatives à ces coûts ont été fournies par le MTQ, qui tient des statistiques sur les coûts de construction et d'entretien défrayés chaque année pour son parc de ponts.

Les coûts indirects sont les coûts supportés par la société, c'est-à-dire les coûts encourus par les usagers lors des fermetures de routes, qui occasionnent une perte de temps, une consommation d'essence et une usure des véhicules, provoquées par la mise en place d'un itinéraire de contournement du pont fermé à la circulation. Les coûts indirects sont obtenus en combinant des coûts indirects unitaires (tel que le coût d'essence par km parcouru pour un camion) avec les données du site (tels que le nombre de kilomètres de détour occasionné par une fermeture de route). Les coûts indirects unitaires sont obtenus à partir d'un guide officiel du MTQ, compilant ces coûts en fonction de nombreuses études sur le sujet [21]. Les données de site sont obtenues à partir de statistiques du MTQ, collectées pour un ensemble de ponts similaires à ceux de l'étude, qui font état des longueurs de détours, du nombre de passages de véhicule journalier moyen et du pourcentage de camion.

2.6. Calcul des coûts

Deux méthodes distinctes peuvent être utilisées pour calculer le coût sur le cycle de vie (Figure 2-3). La méthode la plus simple est une approche déterministe : à chaque paramètre (coût d'une opération de construction, longueur de détour, etc.) est associée une valeur unique. Le calcul sur le coût du cycle de vie est donc une simple somme de multiplications et le résultat est une valeur unique. Cette approche est simple d'utilisation, mais elle ne permet pas de quantifier les variations du coût du cycle de vie en fonction de la variation des paramètres. Il est possible de réaliser des analyses de sensibilité afin de déterminer l'importance de la variation de certains paramètres sur le résultat, mais on ne peut pas combiner la variation de plusieurs paramètres en même temps. Cette approche limite donc les conclusions que l'on peut tirer de l'étude, car le résultat obtenu est valable pour le jeu de données utilisé uniquement, c'est-à-dire pour un pont en particulier; on ne peut pas transposer le résultat à un autre jeu de données. La seconde approche est probabiliste. Pour cette approche, chaque paramètre est associé à une distribution statistique, caractérisée par une distribution (le plus souvent une loi normale), une moyenne et un écart type. Le calcul sur le coût du cycle de vie avec cette approche est plus complexe et la collecte de données est plus exhaustive qu'avec l'approche statistique. Le résultat est plus intéressant, car il permet d'obtenir le coût moyen et la variabilité de ce coût sur le cycle de vie pour un large éventail de données (c'est-à-dire pour de nombreux ponts distincts) et non un jeu de données en particulier (un pont précis).

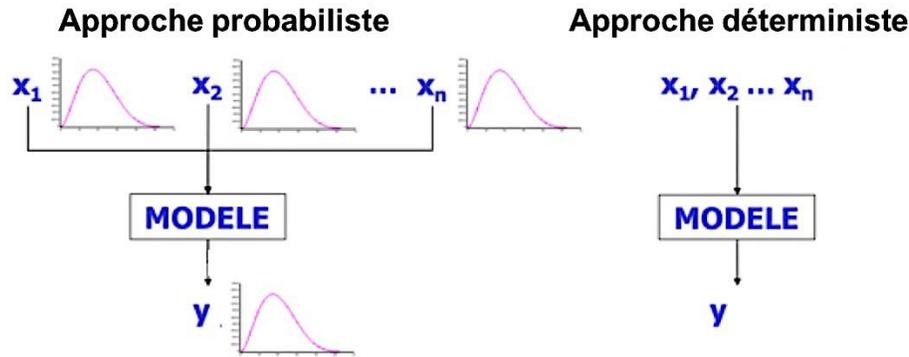


Figure 2-3 : Approches possibles pour le calcul du coût sur le cycle de vie (d'après [22]).

Dans cette étude, l'approche probabiliste est utilisée. Certaines données n'ont pas pu être caractérisées par une distribution probabiliste, des valeurs déterministes ont donc été prises et des études de sensibilité ont été menées dans le but d'évaluer la variabilité de ces paramètres sur le résultat.

La Figure 2-4 illustre le modèle de calcul mis en œuvre dans cette étude. D'une part, les coûts directs sont calculés en associant les coûts unitaires de construction et réparation avec les opérations de construction et réparation définies lors de la conception des ponts et de l'élaboration des calendriers d'entretien. D'autre part, les coûts indirects sont obtenus en associant les données propres au site (débit de véhicules et longueur de détour) avec les durées de fermeture de route nécessaires pour les opérations de construction et d'entretien. Ce calcul est réalisé pour les quatre ponts de l'étude.

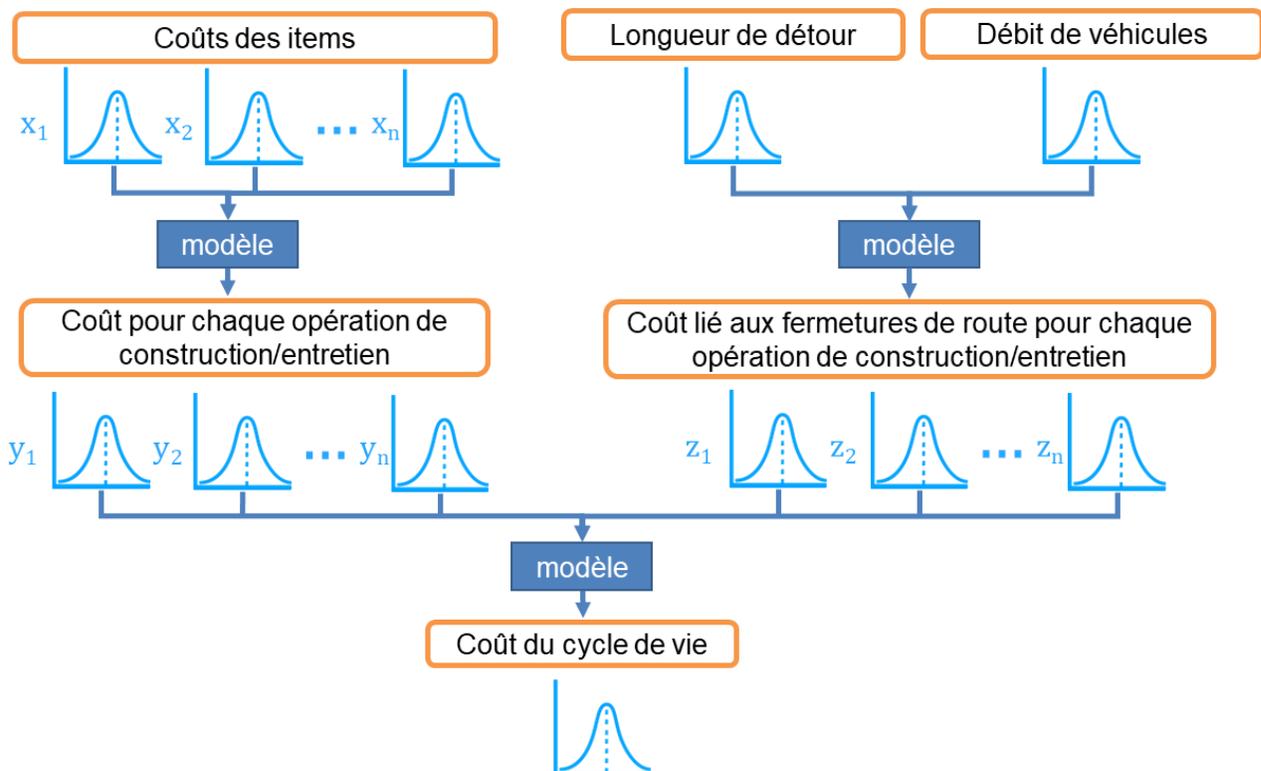


Figure 2-4 : Modèle du calcul du cycle de vie

La formulation générale du coût sur le cycle de vie est donnée dans l'équation 2-1. Le coût sur le cycle de vie est la somme des coûts directs (construction et réparation) et indirects (fermeture de route) sur le cycle de vie, auquel on retranche la valeur résiduelle en fin de vie. Les paramètres de l'équation 2-1 sont les suivants :

- C_c , le coût de construction initial ;
- $C_{fermeture,c}(t_0)$, le coût de fermeture de la route pendant la construction initiale ;
- $C_{e_i}(t_i)$, le coût associé à l'entretien e_i à la date t_i ;
- $C_{fermeture,e_i}(t_i)$, le coût de fermeture de route lié à l'opération d'entretien e_i à la date t_i ;
- $V_{rés}$, la valeur résiduelle de l'ouvrage à la fin du cycle étudié (75 ans) ;
- T_f , la fin du cycle de vie étudié (75 ans) ;
- r , le taux d'actualisation

$$CCV = C_c + C_{fermeture,c}(t_0) + \sum_{i=1}^N \frac{C_{e_i}(t_i)}{(1+r)^{t_i}} + \sum_{i=1}^N \frac{C_{fermeture,e_i}(t_i)}{(1+r)^{t_i}} - \frac{V_{rés}}{(1+r)^{T_f}} \quad 2-1$$

Les dénominateurs dans l'équation 2-1 servent à calculer la valeur actualisée nette des coûts survenus tout au long du cycle de vie, afin de les ramener leur valeur à l'année initiale. En effet, la valeur du dollar évolue dans le temps et un dollar d'aujourd'hui a plus de valeur qu'un dollar du futur. Ce phénomène, bien connu des économistes, est appelé actualisation et est caractérisé par un taux d'actualisation, noté r . Le choix de la valeur de ce taux est un paramètre sensible [23], puisqu'il impacte fortement les résultats d'une analyse économique du cycle de vie, car les taux élevés diminuent rapidement la valeur des coûts futurs, tandis que les taux trop faibles réduisent l'importance des investissements initiaux. La valeur considérée dans cette étude est un taux de 2,37 % (taux proposé par le MTQ dans son *Guide avantage-coûts* [21]), décroissant à 1 % à partir de l'année 30 [24]).

3. Résultats et analyses

3.1. En milieu rural

La Figure 3-1 présente l'évolution du coût sur le cycle de vie (CCV), tout au long des 75 ans de la vie de la structure, pour les ponts du scénario rural, c'est-à-dire les ponts acier-bois et acier-aluminium. À la fin du cycle de vie (année 75), le pont acier-bois a un CCV moyen de 705 386 \$ avec un écart-type de 115 310 \$. Le pont acier-aluminium a un CCV moyen de 640 003 \$ avec un écart-type de 120 870 \$.

On peut dresser les conclusions suivantes sur le scénario rural :

- Sur le cycle de vie, les deux solutions sont similaires. En effet, le CCV du pont bois-aluminium est légèrement inférieur à celui du pont acier-bois; cependant, compte tenu des incertitudes, il n'est pas possible de tirer de conclusion claire sur la compétitivité économique d'une des solutions par rapport à l'autre;
- Le coût de construction du pont acier-aluminium est presque deux fois supérieur à celui du pont acier-bois; cependant cet écart se creuse, puis s'inverse, vers l'année 45. Cela est dû aux faibles coûts (directs et indirects) d'entretien nécessités par l'aluminium, contrairement au bois qui requiert de nombreuses opérations d'entretien sur le platelage, ainsi que d'une reconstruction du tablier. Ainsi :

- 82 % du CCV pour le pont acier-aluminium est défrayé à la construction, tandis que seul 44 % du CCV est dépensé à la construction pour le pont acier-bois;
- 51 % du CCV pour le pont acier-bois est lié à la fermeture de route (coûts indirects), contre 34 % pour le pont acier-aluminium.

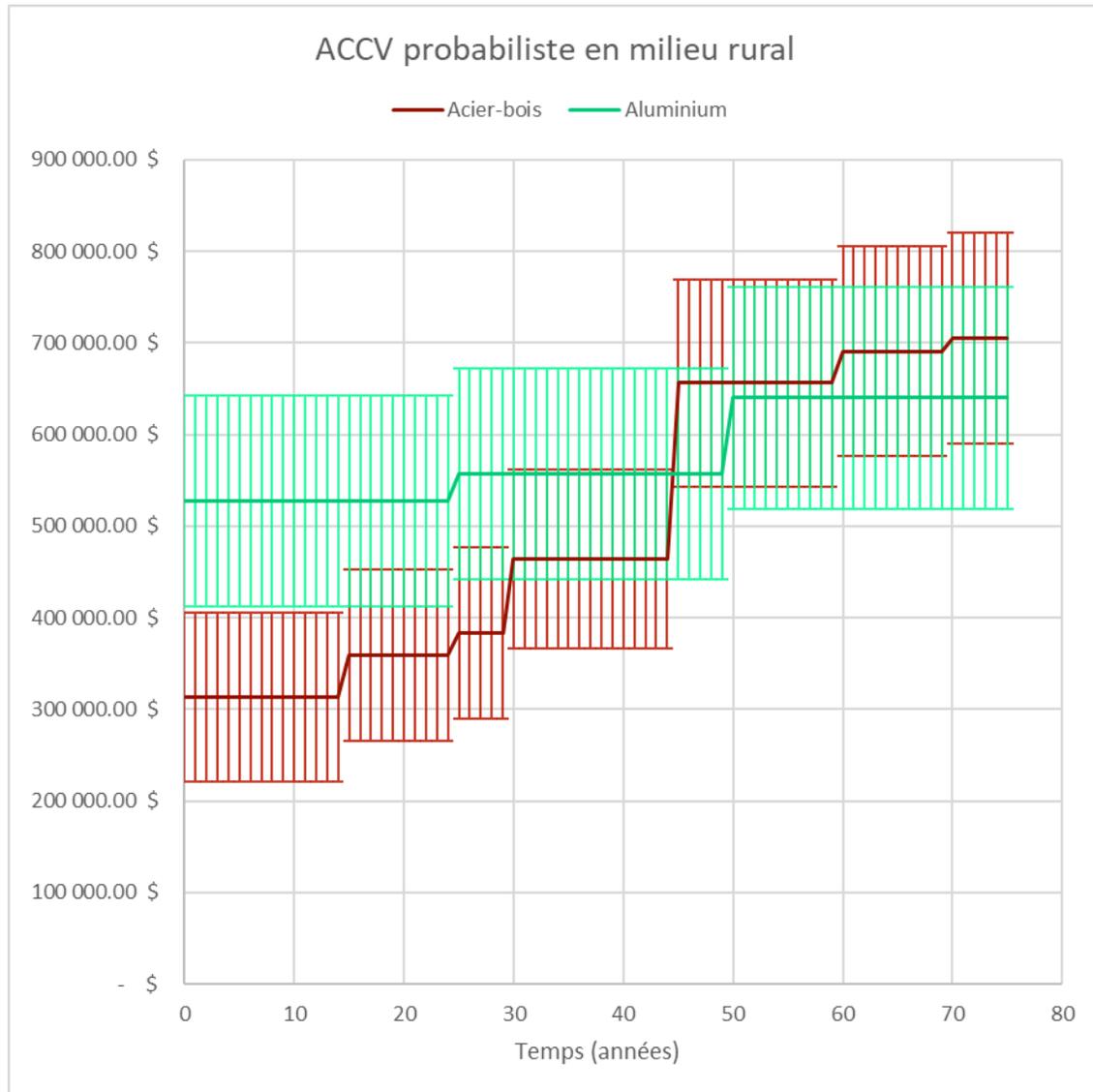


Figure 3-1 : Coût sur le cycle de vie pour les ponts du scénario rural.

3.2. En milieu urbain

La Figure 3-2 représente l'évolution du CCV des ponts acier-béton et acier-aluminium, tout au long du cycle de vie. Le CCV à l'année 75 pour le pont acier-béton est de 8 281 404 \$, avec un écart-type de 3853 822 \$. Celui du pont acier-aluminium est de 1 731 609 \$, avec un écart-type de 712 182 \$.

Le CCV du pont acier-béton est clairement supérieur à celui du pont acier-aluminium, et ce dès l'année 0. Cet écart s'explique par l'importance des coûts de fermeture de route. En effet, le pont acier-béton

requiert certaines opérations qui nécessitent des fermetures de route longues (temps de coffrage, coulée, cure du béton). Ainsi, pour le pont acier-béton, 91 % des coûts sont des coûts indirects, tandis que ceux-ci ne représentent 65 % du CCV pour le pont acier-aluminium.

On identifie deux sauts dans le CCV du pont acier-béton : ils correspondent aux deux entretiens majeurs du tablier : le resurfaçage de la surface de roulement, à l'année 25, et la reconstruction de la dalle, à l'année 50. Comme cela a été mentionné plus haut, il est probable que pour les ponts construits récemment ou dans le futur, le remplacement de la dalle soit décalé dans le temps ou ne soit plus nécessaire. Cela ne changerait cependant pas les conclusions de l'étude, étant donné que le CCV du pont acier-béton est déjà, en moyenne, 3,6 fois plus élevé que celui du pont acier-aluminium, à l'année 49, juste avant le remplacement de la dalle.

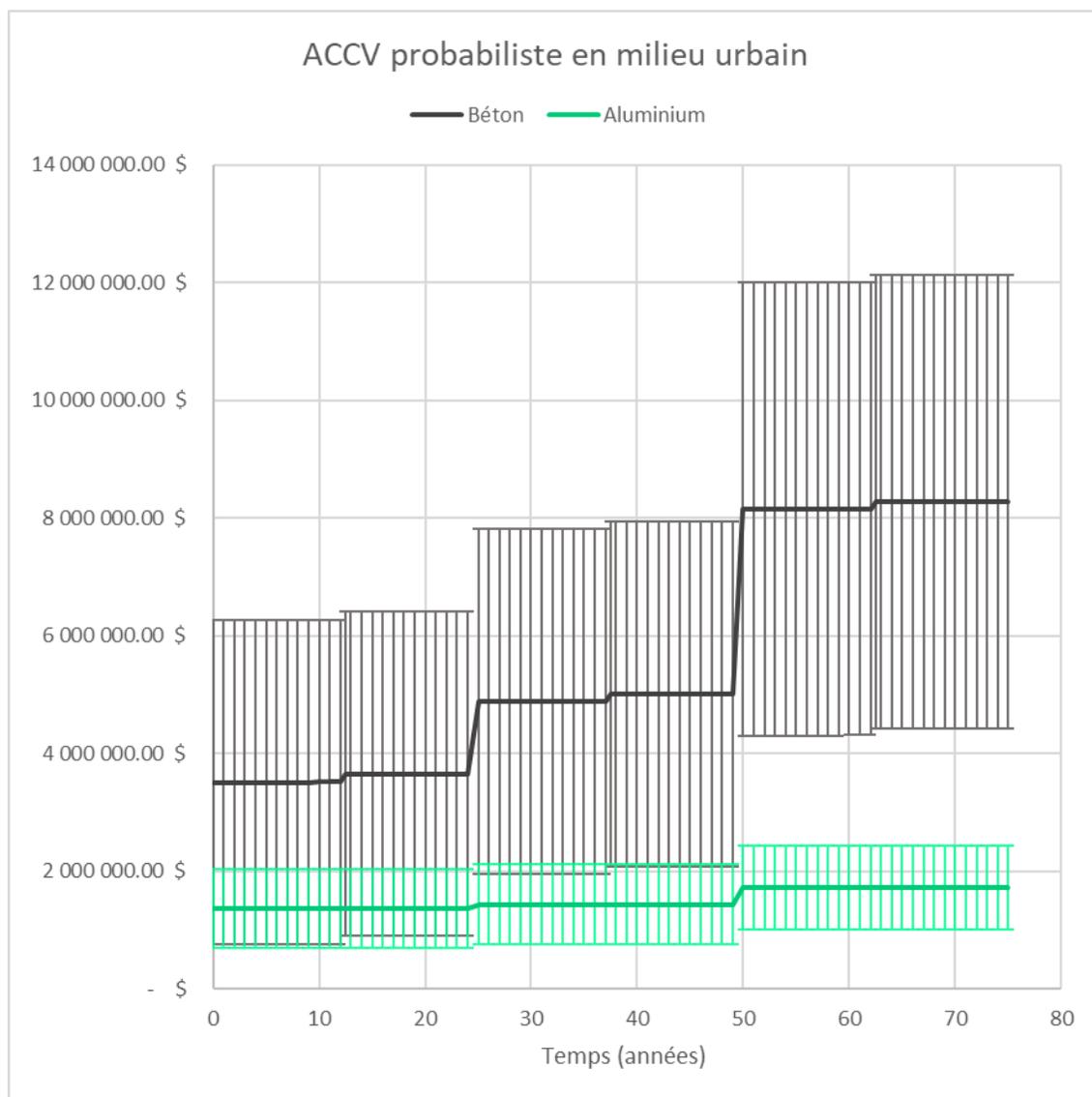


Figure 3-2 : Coût sur le cycle de vie pour les ponts du scénario rural.

4. Conclusion

L'étude permet de conclure qu'en milieu rural, les solutions acier-bois et acier-aluminium sont équivalentes sur leur cycle de vie, tandis qu'en milieu urbain la solution acier-aluminium est plus économique que la solution acier-béton.

Les analyses ont mis en évidence que les paramètres clefs de l'étude du CCV sont les caractéristiques du site. En effet, la solution la plus économique sera celle qui occasionne le moins de fermetures de route pendant la construction et les différentes phases d'entretien. En outre, l'optimisation du dimensionnement en vue de réduire les quantités de matériaux n'est pas une priorité, car le coût des matériaux de construction ne représente qu'une très faible part du CCV total.

Références

- [1] J. Pednault, C. Bayan, L. Sorelli, M. Margni, D. Conciatori, V. Desjardins et M. Fafard, «Rapport final du projet R787.1 - Analyse du coût total de possession sur le cycle de vie d'un pont routier à platelage en aluminium,» Québec, 2019.
- [2] D. Beaulieu, Calcul des charpentes d'aluminium, Québec, Canada: Les Presses de l'aluminium, 2003, p. 810 pages.
- [3] C. Vargel, La corrosion de l'aluminium, Paris: Dunod, 1999.
- [4] D. Beaulieu, J. Internoscia et M. Hartlieb, «Ponts et passerelles en aluminium : Rapport de visites et rencontres en Suède, en Hollande et aux États-Unis,» 2015.
- [5] G. A. Alison, «Evaluation of Seven Aluminum Highway Bridges After Two to Three Decades of Service,» *Transportation Research Record*, n° 1950, 1984.
- [6] W. Mader et A. Pieper, «Schwansbell Bridge celebrating 50th birthday,» *Structural Engineering International*, vol. 4, pp. 356-359, 2006.
- [7] T. Siwowski, «Aluminum Bridges - Past, Present and Future,» *Structural Engineering International*, vol. 4, pp. 286-293, 2006.
- [8] Ministère de l'économie, de l'innovation et des exportations, *Stratégie québécoise de développement de l'aluminium 2015-2025*, Québec, Canada, 2015.
- [9] M. Fafard, M. Guillot, C.-D. Annan et L. Sorelli, «L'utilisation structurale de l'aluminium,» *L'ingénieur civil canadien*, vol. 35, n° 11, pp. 26-28, 2018.
- [10] J.-B. Burgelin, «Nouveau concept modulaire de tablier de pont tout aluminium à portée simple et assemblable en chantier,» Québec, 2017.
- [11] J. Leclerc, «Utilisation innovatrice de l'aluminium dans les ponts : effets de la variation de la température sur le comportement structural d'un tablier à platelage d'aluminium sur poutres d'acier, à action composite,» Québec, 2018.
- [12] V. Desjardins, «Connecteurs en cisaillement pour développer l'action composite dans les ponts aluminium/acier,» Québec, 2017.
- [13] D. Charron-Drolet, «Comportement des assemblages antiglisement dans les ponts de type platelage en aluminium sur poutres en acier,» Québec, 2018.
- [14] A. Djedid, M. Guillot, V. Desjardins et M. Fafard, «Conception of an Aluminium Deck for Highway Bridges,» chez *INALCO 14th International Aluminium Conference*, Tokyo, Japon, 2019.

- [15] M. Cormier, «Développement d'assemblages de dispositif de retenue pour les ponts à platelage en aluminium,» Québec, 2019.
- [16] C. Bayan, V. Desjardins, L. Sorelli, D. Conciatori et M. Fafard, «Life-cycle cost analysis of three deck technologies: aluminium, timber and concrete decks,» chez *INALCO 14th International Aluminium Conference*, Tokyo, Japon, 2019.
- [17] J.-B. Burgelin, M. Fafard et M. Guillot, «Rapport final du projet de recherche R777.1 - Nouveau Concept de tablier de pont tout aluminium à portée simple et assemblable en chantier,» Québec, 2017.
- [18] T. Siwowski, «The whole life costing of bridge deck replacement – a case study,» chez *The Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Stresa, Italie, 2012.
- [19] International Organization for Standardization, ISO 15686-5:2017 Bâtiments et biens immobiliers construits — Prévion de la durée de vie — Partie 5: Approche en coût global, Genève, Suisse, 2017.
- [20] Association canadienne de normalisation, CAN/CSA-S6-14 Code canadien sur le calcul des ponts routiers, Mississauga, ON, Canada, 2014.
- [21] Ministère des transports du Québec, Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier., Québec, Canada, 2016.
- [22] D. Conciatori, Notes du cours GCI-7091 : Conception avancée de structures en béton mixte et structures composite, Québec, 2017.
- [23] C. Gollier, *Princing the Planet's Future : The Economics of Discounting in an Uncertain World*, 2012.
- [24] K. J. Arrow, M. L. Cropper, C. Gollier, B. Groom, G. M. Heal, R. G. Newell, W. D. Nordhaus, R. S. Pindyck, W. A. Pizer, P. R. Portney, T. Sterner, R. S. Tol et M. L. Weitsman, «Should Governments Use a Declining Discount Rate in Project Analysis ?,» *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 8, n° 12, pp. 145-163, 2014.