

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE  
CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN  
ALUMINIUM  
Projet R787.1**

Julien Pedneault  
Cassandra Bayan  
Luca Sorelli  
Manuele Margni  
David Conciatori  
Victor Desjardins  
Mario Fafard  
Université Laval  
Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL

Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec

Juin 2019

La présente étude a été réalisée à la demande du Ministère des Transports du Québec (MTQ) et a été financée par la Direction de l'environnement et de la recherche à partir des fonds octroyés au ministère dans le cadre de la Stratégie Québécoise de Développement de l'Aluminium (SQDA).

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier les différentes personnes qui ont contribué à l'avancement et à la réalisation de ce projet de recherche. Plus spécifiquement au Ministère du Transport, merci à monsieur Dominic Fortin qui a su nous aider en début de projet, madame Marie-Hélène Tremblay pour les réponses aux questions, monsieur Daniel Lavallée et monsieur Abdelkader Laoubi pour leur intérêt et leurs interventions pertinentes.

## **SOMMAIRE**

Ce projet, visant à promouvoir l'utilisation de l'aluminium dans la construction et la réhabilitation de ponts routiers, s'inscrit dans le premier axe de la Stratégie québécoise de développement de l'aluminium (SQDA). Plus spécifiquement, l'objectif global de ce projet est d'évaluer les potentiels avantages économiques et environnementaux d'un pont de courte portée à platelage en aluminium en comparaison à un tablier de pont acier-bois dans un contexte rural, puis à un pont à dalle de béton sur poutres d'acier dans un contexte urbain.

Si l'utilisation de l'aluminium présente de nombreux avantages tels un rapport résistance-poids élevé, une mise en place rapide et surtout une excellente durabilité, son prix d'achat initial élevé demeure le principal inconvénient. Dans un contexte de prise de décision à court terme, le choix d'aluminium est nettement désavantagé par ce facteur. Toutefois, dans un contexte long terme, en accord avec le concept de développement durable, l'aluminium peut devenir un choix de matériau concurrentiel pour la construction ou la réhabilitation de pont au Québec.

Afin d'éviter ce biais, une nouvelle méthode d'arbitrage est nécessaire et sera utilisée : l'analyse du coût du cycle de vie (ACCV). Cette méthode comptabilise l'ensemble des coûts de la structure pour toutes les étapes du cycle de vie tel que l'extraction des matériaux, le transport, la construction, l'entretien, l'exploitation et la gestion en fin de vie. Parallèlement à cette analyse, une autre analyse du cycle de vie (ACV) portant sur les impacts environnementaux est effectuée. Les résultats de cette deuxième analyse compléteront ceux de l'analyse des coûts et pourront ajouter une dimension environnementale à la prise de décision future.

Les coûts du cycle de vie considérés dans l'étude ont été basés sur ceux définis par la norme ISO 15686-5 (2017). Selon cette norme, le coût global représente ceux associés à la construction, l'exploitation, l'entretien et la fin de vie du système étudié. Les coûts de construction et d'entretien directs sont tirés des listes de prix suggérés du MTQ en 2018. La longueur des détours considérés est de 7 km pour le contexte rural et de 25 km en milieu urbain, représentant 2 ponts sur le réseau routier actuel. La collecte de donnée et l'élaboration des scénarios d'entretien pour chacun des systèmes se sont faites de manière itérative avec l'équipe du MTQ. Un taux d'actualisation de 2,38% est utilisé pour l'ACCV.

Les profils d'impacts environnementaux sont déterminés conformément à la norme ISO 14040 et 14044 (2006) utilisant la base de données d'inventaire du cycle de vie *ecoinvent* enrichit avec les données spécifiques au Québec et la méthodologie d'évaluation des impacts IMPACT 2002+.

Les scores d'impact ACV ont également été traduits en externalités environnementales dans le but d'être directement comparés aux coûts totaux de possession. Pour ce faire, une monétarisation des résultats de l'ACV est réalisée à l'aide de la méthode StepWise2006.

Les résultats comparatifs de l'ACCV en milieu rural montrent que le tablier à platelage en aluminium est plus dispendieux que celui en acier-bois après 75 ans d'utilisation étant donné ses coûts de construction initiaux

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

doubles. Bien que le tablier en bois nécessite plus de travaux d'entretien et une reconstruction à l'année 45, il reste l'option la moins chère selon le contexte et les paramètres de détour étudiés.

Les coûts de de la structure en acier contribuent majoritairement aux coûts totaux du tablier acier-bois. Quant au platelage d'aluminium, il représente environ 60% des coûts totaux du tablier d'aluminium sur poutre d'acier. Il est à noter qu'aucune valeur résiduelle n'a été considérée en fin de vie.

Au niveau des indicateurs environnementaux, il est préférable d'opter pour l'option en aluminium, car les indicateurs qualité des écosystèmes (QE) et santé humaine (SH) sont favorables et que ceux de changement climatique (CC) et ressource (R) sont équivalents.

Les résultats comparatifs de l'ACCV en milieu urbain montrent que le tablier à dalle de béton est nettement plus dispendieux que celui à platelage d'aluminium dès sa phase de construction et l'écart augmente jusqu'à la fin de sa vie. Ce grand écart s'explique par un détournement de trafic plus important pour l'option de dalle de béton à cause d'une plus longue durée des travaux de construction et d'entretien. Bien que les coûts de construction initiaux du platelage d'aluminium soient presque 3 fois plus élevés que ceux de la dalle de béton, les gains associés à la diminution des temps de travaux de construction et d'entretien compensent largement ce surplus. Tous les indicateurs environnementaux, ainsi que les coûts sur l'ensemble du cycle de vie montrent qu'il est préférable de choisir l'option à platelage d'aluminium.

La monétarisation des impacts environnementaux peut représenter entre 10 et 30% des coûts totaux selon le cas. Toutefois, la prise en compte de ces coûts ne vient pas inverser les conclusions des comparaisons.

Des analyses de sensibilité ont été réalisées sur les paramètres les plus sensibles, identifiés par à l'aide d'une analyse de la qualité des données utilisées, d'une analyse de contribution, ainsi que d'informations issues de la revue de littérature.

Le DJMA et la longueur du détour sont deux paramètres contribuant considérablement aux résultats en plus d'être incertains. Une analyse paramétrée du DJMA et de la longueur de détour a permis de déterminer le point d'équilibre des coûts globaux entre l'option d'aluminium sur poutre d'acier et ses comparatifs. En milieu rural, ce point se situe à un DJMA de 1800 voitures avec un détour de 7 km (ou bien de 1000 voitures pour un détour de 12.6 km ou tout autre équivalent). En milieu urbain, ce point est atteint pour un DJMA de 467 pour un détour de 5 km.

Les analyses de sensibilité sur le taux d'actualisation utilisé pour l'ACCV ont montré la forte sensibilité de ce paramètre, ainsi qu'une possible inversion des conclusions dans le contexte rural.

Sur le plan environnemental, la provenance de l'aluminium a été identifiée comme un paramètre pouvant influencer significativement les résultats. Les impacts environnementaux des systèmes étudiés peuvent presque doubler si l'approvisionnement d'aluminium se fait aux États-Unis plutôt qu'au Québec.

## **ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

Cette étude combinant ACCV et ACV a permis de montrer que, dans le contexte rural spécifiquement étudié, le pont à platelage en aluminium affiche des coûts totaux de possessions plus élevés que celui bois-acier, mais que ce dernier est légèrement favorable d'un point de vue des indicateurs environnementaux.

En milieu urbain, selon des paramètres de détours et de trafic spécifiquement étudiés, l'option à platelage d'aluminium est clairement préférable à celle à dalle de béton au niveau des coûts et des indicateurs environnementaux.

Ces conclusions peuvent changer selon le DJMA, la distance de détour que les usagers doivent emprunter et le taux d'actualisation.

Finalement, l'analyse a permis de montrer l'importance d'une analyse holistique et de la prise en compte de l'entièreté du cycle de vie. Une vision à court terme considérant uniquement les coûts et les impacts de l'étape de construction initiale aurait généré des résultats incomplets et des conclusions biaisées masquant un risque de déplacement d'impact et de coûts dans le temps.

## SYNTHESE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce document présente le rapport final du projet de recherche R787.1 portant sur l'analyse du coût et l'analyse environnementale du cycle de vie d'un pont routier à platelage en aluminium.

Le premier objectif du projet est d'évaluer le coût total de possession à l'aide d'une analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) de 4 tabliers de pont :

- Tablier acier-bois en milieu rural (1rAB)
- Tablier à platelage en aluminium en milieu rural (2aAA)
- Tablier à dalle de béton sur poutre d'acier en milieu urbain (3uAB)
- Tablier à platelage en aluminium en milieu urbain (4uAA)

Le deuxième objectif est une analyse du cycle de vie environnementale (ACV) menée sur ces 4 mêmes tabliers, ajoutant ainsi la dimension environnementale, à celle des coûts totaux de possession, aux prises de décision futures.

Un pont spécifique a été étudié en milieu rural ayant comme paramètres de trafic un débit journalier moyen annuel (DJMA) de 200 et un détour de 7 km lors des travaux d'entretien. En milieu urbain, le DJMA considéré est de 2500 avec un détour de 25 km. Une valeur moyenne de 7% de camion a été considérée.

La collecte de données s'est faite de manière itérative avec l'équipe du MTQ. Un taux d'actualisation de 2,37% a été utilisé pour l'analyse des coûts.

Les résultats comparatifs de l'ACCV en milieu rural, selon les paramètres de détournement de trafic étudiés, ont montré que le pont acier-bois est préférable économiquement. Au niveau des indicateurs environnementaux, le pont à platelage en aluminium est préférable pour les indicateurs *Qualité des écosystèmes* et *Santé humaine* puis équivalent pour le *Changement climatique* et des *Ressources*.

Pour ce qui est de la comparaison en milieu urbain, toujours selon les paramètres de détournements de trafics utilisés, le pont à dalle de béton est nettement plus dispendieux que celui à platelage en aluminium dès sa phase de construction et l'écart augmente jusqu'à la fin de sa vie. Ce grand écart s'explique par un détournement de trafic plus important pour l'option de dalle de béton à cause d'une plus longue durée des travaux de construction et d'entretien. D'en point de vue environnemental, tous les indicateurs favorisent le tablier à platelage en aluminium.

L'intégration des coûts environnementaux, faits en monétarisant les impacts environnementaux calculés par l'ACV, a montré qu'il est possible que ces coûts puissent représenter jusqu'à 30% des coûts globaux. Toutefois, les conclusions des comparaisons ne changent pas malgré la prise en compte des coûts environnementaux.

## **ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

À la suite d'une évaluation de la qualité des données utilisées et des conclusions de la revue de littérature, des analyses de sensibilité ont été réalisées sur les paramètres les plus sensibles.

Le DJMA et le détour sont deux paramètres contribuant beaucoup aux résultats en plus d'être incertains. Pour cette raison, une analyse paramétrée du DJMA et de la longueur de détour a permis de trouver le point d'équilibre où l'option aluminium devient préférable au niveau des coûts. En milieu rural, ce point se situe avec un DJMA 1800 voitures avec un détour de 7 km ou de 1000 DJMA pour un détour de 12.6 km. En milieu urbain, ce point est atteint pour un DJMA de 467 et un détour de 5 km. La proportion de camion sur la route est également un paramètre sensible lorsqu'on quantifie les impacts économiques et environnementaux du détournement du trafic.

Les analyses de sensibilité sur le taux d'actualisation utilisé pour l'ACCV ont montré la forte sensibilité de ce paramètre, ainsi qu'une possible inversion des conclusions dans le contexte rural.

Sur le plan environnemental, la provenance de l'aluminium a été identifiée comme un paramètre pouvant influencer significativement les résultats. Les impacts environnementaux des systèmes étudiés peuvent presque doubler si l'approvisionnement d'aluminium se fait aux États-Unis plutôt qu'au Québec.

L'analyse a permis de montrer l'importance d'une analyse holistique et de la prise en compte de l'entièreté du cycle de vie. Une vision à court terme, considérant uniquement les coûts et les impacts de l'étape de construction initiale, aurait généré des résultats incomplets et des conclusions biaisées masquant un risque de déplacement d'impact et de coûts dans le temps.

## TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION.....	15
1.1	Mise en contexte.....	15
1.2	Problématique et objectifs.....	15
2.	REVUE DE LITTÉRATURE.....	17
2.1	Ponts au Québec.....	17
2.2	Ponts en aluminium.....	17
2.2.1	Avantages de l'utilisation de l'aluminium.....	17
2.2.2	Limites à l'utilisation de l'aluminium.....	18
2.3	Utilisation de l'aluminium dans les normes de conception..	19
2.3.1	Au Canada.....	19
2.3.2	Hors du Canada.....	19
2.4	Exemples de ponts à platelage en aluminium.....	19
2.4.1	Pont de Corbin, États-Unis.....	19
2.4.2	Pont de Little Buffalo Creek, États-Unis.....	20
2.4.3	Pont de Saint-Ambroise, Canada.....	21
2.4.4	Programme expérimental du Florida DOT.....	24
2.5	Analyse du coût du cycle de vie.....	26
2.5.1	Principes généraux.....	26
2.5.2	ACCV de ponts à platelage en aluminium.....	27
2.5.3	Étude du coût d'une passerelle piétonnière.....	29
2.6	Analyse environnementale du cycle de vie.....	30
2.6.1	Principes généraux.....	30
2.6.2	ACV appliqué aux ponts routiers.....	32
2.6.3	Objectif et champ de l'étude.....	32
2.6.4	Conclusions récurrentes.....	33
3.	MÉTHODOLOGIE.....	35
3.1	Définition des objectifs et champs de l'étude.....	35
3.1.1	Objectifs de l'étude.....	35
3.1.2	Champs de l'étude.....	35
3.1.3	Périmètres étudiés.....	36
3.1.4	Conception des tabliers étudiés.....	37
3.2	Analyse du coût du cycle de vie.....	40
3.2.1	Coûts de construction et d'entretien.....	40
3.2.2	Coûts de fermeture de route.....	40
3.2.3	Valeur résiduelle.....	41
3.2.4	Actualisation des coûts.....	41
3.3	Analyse du cycle de vie environnementale.....	42
3.3.1	Descriptions des systèmes.....	42
3.3.2	Traitement des processus multifonctionnels.....	45
3.3.3	Évaluation des impacts.....	46
3.3.4	Interprétation.....	48

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

3.3.5	Logiciel utilisé .....	49
3.4	Collecte de données .....	49
3.4.1	Localisation des ponts et données du site .....	50
3.4.2	Variation des DJMA dans le temps .....	50
3.4.3	Scénarios d'entretien .....	51
3.4.4	Données de coûts de construction et d'entretien ....	56
3.4.5	Données environnementales .....	56
3.5	Monétarisation .....	58
3.5.1	Polluants atmosphériques et gaz à effet de serre ...	59
3.5.2	Impacts environnementaux.....	59
4.	RÉSULTATS .....	61
4.1	Analyse comparative – milieu rural.....	61
4.2	Analyse comparative – milieu urbain.....	64
4.3	Monétarisation .....	66
4.3.1	Approche du Guide Avantages-Coûts du MTQ .....	66
4.3.2	Approche StepWise2006 .....	69
5.	INTERPRÉTATION .....	71
5.1	Qualité des données d'inventaires .....	71
5.2	Influence des détours.....	72
5.2.1	Influence des détours en milieu rural .....	72
5.2.2	Influence des détours en milieu urbain.....	75
5.2.3	Impacts de la proportion de camion .....	76
5.3	Analyses de sensibilité .....	77
5.3.1	ACCV .....	77
5.3.2	ACV .....	80
5.4	Analyse d'incertitude - ACV.....	86
5.5	Applications et limites.....	88
5.6	Recommandations et perspectives .....	90
5.6.1	Recommandations.....	90
5.6.2	Importance de la pensée cycle de vie .....	90
5.6.3	Perspectives .....	92
6.	CONCLUSION .....	93
7.	RÉFÉRENCE .....	94
	ANNEXE A.....	97
	ANNEXE B.....	99
	ANNEXE C.....	106
	ANNEXE D.....	112

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 3-1</b>	Hypothèses du temps d'utilisation des équipements par jour de travaux .....	43
<b>Tableau 3-2</b>	Hypothèses de distance de transport selon le type de matériau .....	44
<b>Tableau 3-3</b>	Rendements du tri et de recyclage utilisé.....	46
<b>Tableau 3-4</b>	Calendrier des opérations d'entretien et de remplacement pour le tablier acier-bois.....	51
<b>Tableau 3-5</b>	Scénario d'entretien pour le tablier acier-bois.....	52
<b>Tableau 3-6</b>	Calendrier des opérations d'entretien et de remplacement des tabliers à platelage en aluminium sur poutres d'acier .....	53
<b>Tableau 3-7</b>	Scénario d'entretien pour les tabliers à platelage en aluminium sur poutres d'acier .....	53
<b>Tableau 3-8</b>	Calendrier des opérations d'entretien et de remplacement pour le tablier à dalle de béton sur poutres d'acier.....	54
<b>Tableau 3-9</b>	Scénario d'entretien pour le tablier à dalle de béton sur poutres d'acier .....	55
<b>Tableau 3-10</b>	Modélisation de la peinture (pour 1 kg) .....	57
<b>Tableau 3-11</b>	Modélisation du Bimagrip (pour 1 kg).....	57
<b>Tableau 3-12</b>	Coûts des polluants atmosphériques .....	59
<b>Tableau 3-13</b>	Facteurs de monétarisation de la méthode Stepwise2006 (convertis en \$) .....	59
<b>Tableau 4-1</b>	Comparaison de la monétarisation du détournement et du cycle de vie .....	67
<b>Tableau 5-1</b>	Qualité des données principales .....	71
<b>Tableau 5-2</b>	Représentations diverses de 18 blocs détour.....	74
<b>Tableau 5-3</b>	Sensibilité du taux d'actualisation du CCV des tabliers en milieu rural .....	78
<b>Tableau 5-4</b>	Sensibilité du taux d'actualisation de l'écart entre les ACCV des tabliers en milieu rural .....	79
<b>Tableau 5-5</b>	Sensibilité du DJMA de l'ACCV des tabliers en milieu rural	79
<b>Tableau 5-6</b>	Influence du DJMA sur l'écart entre les ACCV .....	79
<b>Tableau 5-7</b>	Sensibilité à la longueur de détour de l'ACCV des tabliers en milieu rural .....	80
<b>Tableau 5-8</b>	Influence de la longueur de détour sur l'écart entre les ACCV .....	80
<b>Tableau 5-9</b>	Niveau d'incertitudes des données utilisées .....	87

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

<b>Tableau 5-10</b>	Paramètres de la loi de distribution probabiliste triangulaire des taux relatifs à la fin de vie utilisés dans l'analyse d'incertitude.....	87
<b>Tableau 5-11</b>	Résultats de la simulation de Monte-Carlo en milieu rural	87
<b>Tableau 5-12</b>	Résultats de la simulation de Monte-Carlo en milieu urbain . .....	88
<b>Tableau A-1</b>	Synthèse de la revue de littérature des ACV environnementales .....	98
<b>Tableau B-1</b>	Valeurs horaires du temps ( $\alpha_i$ ) selon le type de véhicules.... .....	101
<b>Tableau B-2</b>	Coûts en fonction de la vitesse et de la distance (carburant) ( $\beta_i$ ) .....	102
<b>Tableau B-3</b>	Coûts en fonction de la distance ( $\gamma_i$ ) .....	102
<b>Tableau B-4</b>	Taux moyen de polluants atmosphériques et d'émissions de GES - véhicules légers ( $t_i$ , véhicules) .....	103
<b>Tableau B-5</b>	Taux moyen de polluants atmosphériques et d'émissions de GES – camions réguliers ( $t_i$ , camion) .....	103
<b>Tableau B-6</b>	Coûts des polluants atmosphériques ( $\delta_i$ ).....	104
<b>Tableau B-7</b>	Coûts des émissions de GES ( $\delta_{GES}(a_i)$ ).....	105
<b>Tableau C-1</b>	Flux et processus utilisés en ACV - Tablier bois acier - Milieu rural .....	107
<b>Tableau C-2</b>	Flux et processus utilisés en ACV - Tablier à platelage en aluminium - Milieu rural.....	108
<b>Tableau C-3</b>	Flux et processus utilisés en ACV - Tablier à dalle de béton - Milieu urbain .....	109
<b>Tableau C-4</b>	Flux et processus utilisés en ACV - Tablier à platelage en aluminium - Milieu urbain .....	110
<b>Tableau C-5</b>	Flux et processus utilisés en ACV - Culées.....	111
<b>Tableau D-1</b>	Critère de qualification des données selon la fiabilité, la représentativité et la contribution .....	113
<b>Tableau D-2</b>	Qualification de la qualité de la donnée.....	113
<b>Tableau D-3</b>	Evaluation et qualification des qualités des données.....	114

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 2-1</b>	État des structures du réseau routier supérieur du MTQ ....	17
<b>Figure 2-2</b>	Tablier extrudé AlumaDeck.....	20
<b>Figure 2-3</b>	Coupe du tablier à platelage en aluminium du pont de Little Buffalo Creek .....	20
<b>Figure 2-4</b>	Usure de la surface de roulement du pont de l'US Route 58, après 19 ans de service.....	21
<b>Figure 2-5</b>	Corrosion des boulons du pont de l'US Route 58, après 19 ans de service .....	21
<b>Figure 2-6</b>	Chantier de l'installation du platelage du pont de Saint-Ambroise .....	22
<b>Figure 2-7</b>	Usure des poutres par frottement et début de corrosion sur les plaques en acier, octobre 2016 .....	22
<b>Figure 2-8</b>	Corrosion d'un boulon fixant une bride en acier au platelage en aluminium, juillet 2018 .....	23
<b>Figure 2-9</b>	Corrosion galvanique aux interfaces acier-aluminium, juillet 2018 .....	24
<b>Figure 2-10</b>	Cisaillement des appuis, juillet 2018 .....	24
<b>Figure 2-11</b>	Interface approche - platelage, juillet 2018.....	24
<b>Figure 2-12</b>	Panneaux testés par le Florida DOT .....	25
<b>Figure 2-13</b>	Panneaux soumis au simulateur de charge routière.....	25
<b>Figure 2-14</b>	Représentation du coût global et global étendu.....	26
<b>Figure 2-15</b>	Phases de la réalisation d'une ACCV .....	27
<b>Figure 2-16</b>	Coûts du cycle de vie par phase .....	29
<b>Figure 2-17</b>	Quatre phases de l'ACV.....	31
<b>Figure 2-18</b>	Cycle de vie simplifiée d'un pont .....	33
<b>Figure 3-1</b>	Représentation des 3 périmètres utilisés dans l'étude.....	37
<b>Figure 3-2</b>	Géométrie générale du tablier acier-bois.....	37
<b>Figure 3-3</b>	Géométrie générale du pont à platelage en aluminium en milieu rural .....	38
<b>Figure 3-4</b>	extrusion du platelage d'aluminium .....	39
<b>Figure 3-5</b>	Géométrie générale du pont à dalle de béton sur poutres d'acier .....	39
<b>Figure 3-6</b>	Géométrie générale du pont à platelage en aluminium en milieu urbain .....	40
<b>Figure 3-7</b>	Valeur actualisée nette de 1\$ en fonction du temps, avec un taux de 2,37%.....	42

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

<b>Figure 3-8</b>	Arbres des processus génériques des systèmes .....	43
<b>Figure 3-9</b>	Approche recyclage en fin de vie .....	45
<b>Figure 3-10</b>	Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002+ .....	47
<b>Figure 4-1</b>	Résultats comparatifs de l'ACCV en milieu rural .....	61
<b>Figure 4-2</b>	Analyse de contribution du milieu rural selon le périmètre 1... ..	62
<b>Figure 4-3</b>	Analyse de contribution du milieu rural selon le périmètre 2... ..	63
<b>Figure 4-4</b>	Analyse de contribution du milieu rural selon le périmètre 3... ..	63
<b>Figure 4-5</b>	Résultats comparatifs de l'ACCV en milieu urbain.....	64
<b>Figure 4-6</b>	Analyse de contribution du milieu urbain selon le périmètre 1 .....	65
<b>Figure 4-7</b>	Analyse de contribution du milieu urbain selon le périmètre 2 .....	65
<b>Figure 4-8</b>	Analyse de contribution du milieu urbain selon le périmètre 3 .....	66
<b>Figure 4-9</b>	Comparaison des coûts avec monétarisation des polluants atmosphériques - milieu rural.....	67
<b>Figure 4-10</b>	Comparaison des coûts avec monétarisation des polluants atmosphériques - milieu urbain.....	67
<b>Figure 4-11</b>	Comparaison des émissions produites sur 1 km en voiture selon ecoinvent v3.3 et le guide.....	68
<b>Figure 4-12</b>	Comparaison des émissions produites sur 1 km en camion selon ecoinvent v3.3 et le guide.....	68
<b>Figure 4-13</b>	Comparaison des coûts avec monétarisation des résultats ACV - milieu rural.....	69
<b>Figure 4-14</b>	Comparaison des coûts avec monétarisation des résultats ACV - milieu urbain.....	70
<b>Figure 5-1</b>	Comparaison des coûts du périmètre 2 et des blocs détour en milieu rural .....	73
<b>Figure 5-2</b>	Évolution des coûts selon le nombre de bloc détour en milieu rural .....	73
<b>Figure 5-3</b>	Comparaison pont et détour - milieu rural - Changement climatique .....	74
<b>Figure 5-4</b>	Comparaison pont et détour - milieu rural - Ressource .....	74
<b>Figure 5-5</b>	Comparaison pont et détour - milieu rural - Qualité des écosystèmes .....	75
<b>Figure 5-6</b>	Comparaison pont et détour - milieu rural - Santé humaine.....	75

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

<b>Figure 5-7</b>	Comparaison des coûts du périmètre 2 et de blocs détour en milieu urbain .....	76
<b>Figure 5-8</b>	Évolution des coûts selon le nombre de bloc détour en milieu urbain .....	76
<b>Figure 5-9</b>	Contribution des voitures et des camions aux coûts et résultats d'indicateurs environnementaux des détournements du trafic ....	77
<b>Figure 5-10</b>	Impacts environnementaux et émissions de GES de la production d'aluminium primaire liquide par pays.....	81
<b>Figure 5-11</b>	Analyse de sensibilité sur la provenance de l'aluminium selon le périmètre 2 en contexte rural.....	82
<b>Figure 5-12</b>	Analyse de sensibilité sur la provenance de l'aluminium selon le périmètre 2 en contexte urbain .....	82
<b>Figure 5-13</b>	Taille des culées modélisées .....	83
<b>Figure 5-14</b>	Comparaison des impacts selon le périmètre 2 des tabliers aux culées de béton dans un contexte rural.....	84
<b>Figure 5-15</b>	Comparaison des impacts selon le périmètre 2 des tabliers aux culées de béton dans un contexte urbain.....	84
<b>Figure 5-16</b>	Comparaison des impacts environnementaux en contexte rural - périmètre 3 - Méthode ReCiPe .....	85
<b>Figure 5-17</b>	Comparaison des impacts environnementaux en contexte urbain - périmètre 3 - Méthode ReCiPe .....	86
<b>Figure 5-18</b>	Exemple de distribution normale .....	86
<b>Figure 5-19</b>	Évolution des comparaisons selon le périmètre étudié – milieu urbain .....	91
<b>Figure 5-20</b>	Évolution des comparaisons selon le périmètre étudié – milieu rural .....	91

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

1rAB	Tablier acier-bois en milieu rural
2rAA	Tablier à platelage en aluminium en milieu rural
3uAB	Tablier à dalle de béton sur poutre d'acier en milieu urbain
4uAA	Tablier à platelage en aluminium en milieu urbain
ACCV	Analyse du coût du cycle de vie
ACV	Analyse du cycle de vie
CC	Changement climatique
CCV	Coût du cycle de vie
DALY	<i>Disabled Adjusted Life Years</i> (Unité de mesure de la catégorie d'impact santé humaine pouvant être traduite par : espérance de vie corrigée de l'incapacité)
DJMA	Débit journalier moyen annuel
DJMA <sub>v</sub>	Débit journalier moyen annuel de véhicules légers
DJMA <sub>c</sub>	Débit journalier moyen annuel de camions
EICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
GES	Gaz à effet de serre
ICV	Inventaire du cycle de vie
MCS	Manuel de conception des structures
MTQ	Ministère des Transports du Québec
QE	Qualité des écosystèmes
R	Ressources
SH	Santé humaine
SQDA	Stratégie québécoise de développement de l'aluminium
UF	Unité fonctionnelle

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**LISTE DES SYMBOLES**

$r$	Taux d'actualisation
$h$	Taux de hausse du DJMA
$V_{rés}$	Valeur résiduelle de l'ouvrage à la fin du cycle étudié
$T_f$	Fin du cycle de vie étudié
$N$	Nombre de jours de construction
$N$	Nombre d'occupants dans le véhicule
$\alpha$	Valeur horaire du temps en \$ selon le type de véhicule, le motif du déplacement et le type d'occupants du véhicule
$\beta(v)$	Coût du carburant en fonction de la vitesse en \$/km
$\gamma$	Coûts en fonction de la distance pour la dépréciation, l'entretien et les pneus en \$/km
$t_i(v)$	Taux d'émission du polluant atmosphérique $i$ en fonction de la vitesse en g/km
$\delta_i$	Coût du polluant atmosphérique $i$ en \$/tonne métrique
$C_c$	Coût de construction initiale
$C_{fermeture,c}(t_0)$	Coût de fermeture de la route pendant la construction initiale
$C_{e_i}(t_i)$	Coût associé à l'entretien ( $e, i$ ) à la date $t_i$
$C_{fermeture,e_i}(t_i)$	Coût de fermeture de route lié à l'opération d'entretien $e_i$ à la date $t_i$
$L_{pont}$	Longueur du pont
$L_{détour}$	Longueur du détour
$v_{normale}$	Vitesse de circulation fluide sur le pont
$v_{détour}$	Vitesse de détour
$\sigma(L_{détour})$	Écart-type sur la longueur de détour
$\sigma(DJMA_V)$	Écart-type sur le débit journalier moyen annuel de véhicules
$\bar{L}_{détour}$	Longueur moyenne de détour selon le milieu
$\overline{DJMA}_V$	Valeur moyenne du DJMA <sub>V</sub> selon le milieu
$\eta_{tri}$	Rendement du système de tri en fin de vie
$\eta_{rec}$	Rendement des procédés de recyclage

## **1. INTRODUCTION**

### **1.1 Mise en contexte**

Ce projet s'inscrit dans la Stratégie québécoise de développement de l'aluminium (SQDA), qui s'étend sur la période 2015-2025. Cette stratégie se décompose en trois axes majeurs consistant à « mettre en place un environnement favorable à la transformation de l'aluminium », « renforcer l'ensemble de la filière québécoise » et enfin « assurer la compétitivité des entreprises de l'industrie ».

Plus spécifiquement, l'objectif de ce projet est de promouvoir l'utilisation de l'aluminium dans la construction et la réhabilitation de ponts routiers, s'inscrivant ainsi dans la neuvième mesure du premier axe de la SQDA.

L'utilisation de l'aluminium dans les ponts routiers peut prendre différentes formes ; il peut s'agir de réhabilitation, remplacement d'un platelage existant par un platelage en aluminium, ou bien de construction de ponts neufs. Cette étude s'intéresse à ce dernier aspect. Dans cette optique, un autre atout de l'aluminium, comparativement aux matériaux de construction usuels, est sa grande légèreté qui permet de concevoir des structures aisément transportables et assemblables en chantier puisque la phase de fabrication est réalisable en usine. Dans le cadre de ce projet, cette spécificité prendra toute son importance de par ses retombées sociétales et économiques.

### **1.2 Problématique et objectifs**

L'objectif global de ce projet est d'évaluer les potentiels avantages économiques et environnementaux d'un pont à platelage en aluminium. Si l'utilisation de l'aluminium présente de nombreux avantages tels un rapport résistance-poids élevé, une mise en place rapide et surtout une excellente durabilité. Toutefois, un inconvénient majeur demeure : le prix d'achat initial particulièrement élevé en comparaison avec les autres matériaux utilisés présentement dans les ponts routiers. Or la prise de décision repose trop souvent sur une analyse incomplète des situations et ne considère que les coûts de construction initiaux. De ce fait, de nombreux avantages potentiels de l'aluminium tels que le peu d'entretien nécessaire et le recyclage en fin de vie sont ignorés ce qui favorise les projets les plus classiques et « court-termistes » au détriment de ceux, plus innovants, s'inscrivant dans une logique de développement durable, dont les bénéfices seront par essence tangibles dans la durée. Afin d'éviter ce biais, une nouvelle méthode d'arbitrage est nécessaire et sera utilisée : l'analyse du coût du cycle de vie (ACCV). Cette méthode comptabilise l'ensemble des coûts de la structure sur l'intégralité de son cycle de vie : « du berceau à la tombe ». Dans cette approche globale, toutes les étapes engendrant des coûts seront ainsi couvertes : l'extraction des matériaux, le transport, la construction, l'entretien, l'exploitation et enfin la gestion en fin de vie (démolition, recyclage). Parallèlement à cette analyse, une autre analyse du cycle de vie (ACV) portant sur les impacts environnementaux sera effectuée. Les résultats de cette deuxième analyse compléteront ceux de l'analyse des

## **ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

coûts et pourront ajouter une dimension environnementale à la prise de décision future.

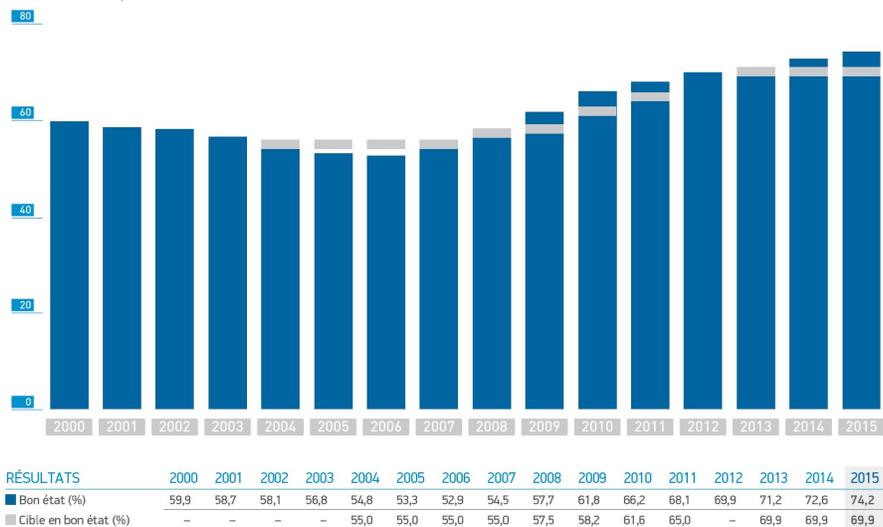
Plus précisément, le présent rapport vise à évaluer les tabliers conçus en début de projet par ces deux méthodes d'analyse et de les comparer à un pont acier-bois dans un contexte rural, puis à un pont à dalle de béton sur poutres d'acier dans un contexte urbain.

Ce présent rapport débute avec une revue de la littérature portant sur les ponts en aluminium, puis, plus spécifiquement, sur les ACV et les ACCV appliqués aux ponts. La méthodologie appliquée pour chacune des analyses sera par la suite expliquée au chapitre 3. Ceci englobe les objectifs et le champ de l'étude, les spécificités méthodologiques des deux types d'analyses, une présentation des hypothèses utilisées et une description de la collecte des données faites tout au long du projet. Par la suite, les résultats des analyses comparatives seront présentés au chapitre 4. L'interprétation des résultats sera faite au chapitre 5 avant de terminer par une conclusion au chapitre 6.

## 2. REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Ponts au Québec

Selon le rapport annuel de gestion 2015-2016 du MTQ (MTQ, 2015), le réseau routier sous la responsabilité du Ministère compte 5400 structures de 4,5 m ou plus. Près de 70 % de ces structures ont été construites au cours des années 1960 à 1980. Étant donné que des travaux de réfection sont généralement nécessaires après 30 ans de vie de l'ouvrage, le besoin d'entretien est très important. En effet, en 2015-2016, 849,6 millions de dollars ont été investis pour la réhabilitation des structures dans la province. La Figure 2-1 représente la proportion du nombre de ponts gérés par le MTQ considérés comme étant en bon état.



**Figure 2-1 État des structures du réseau routier supérieur du MTQ**

### 2.2 Ponts en aluminium

Dans ce contexte d'effort de réhabilitation de ponts, l'aluminium est un matériau intéressant, car il est léger, résistant, durable et entièrement recyclable. En outre, l'industrie de la production et de la transformation de l'aluminium est une des forces économiques du Québec ; en effet cette filière engendre près de 30 000 emplois, ainsi que des exportations d'une valeur de 6,9 milliards de dollars en 2014 (Gouvernement du Québec, Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation, 2015). L'utilisation de l'aluminium dans les ponts fournirait donc un débouché supplémentaire à l'industrie québécoise de l'aluminium.

#### 2.2.1 Avantages de l'utilisation de l'aluminium

Les alliages d'aluminium utilisés pour des applications structurales ont plusieurs avantages par rapport aux matériaux de construction usuels tels que le béton, l'acier ou le bois.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

L'aluminium a une faible masse volumique, environ trois fois inférieure à celle de l'acier (2,7 tonnes/m<sup>3</sup> contre 7,85 tonnes/m<sup>3</sup>). Cela permet de construire des structures plus légères. Ainsi, les platelages en aluminium extrudés pèsent en général 20% du poids d'une dalle de béton équivalente (Siwowski, 2006). En outre, la légèreté de l'aluminium permet de faciliter le transport, la manutention et l'installation en chantier. Le gain de productivité en usine des pièces d'aluminium par rapport aux pièces d'acier, du fait de la légèreté, est estimé à 20 % (Guillot, 2013).

La résistance à la corrosion atmosphérique de l'aluminium est excellente (hormis les alliages de la série 2000) ; même dans des conditions sévères d'humidité élevée ou de présence de sels de déglacage. En effet, il se forme naturellement, à la surface du matériau, une couche d'oxyde d'aluminium, l'alumine, qui protège le métal sous-jacent de la corrosion (Vargel, 1999). Cette résistance confère une plus grande durabilité aux structures d'aluminium et réduit les besoins en entretien, puisqu'il n'est pas nécessaire de peindre le matériau pour le protéger. L'aluminium est cependant vulnérable à la corrosion galvanique lorsqu'il entre en contact avec d'autres métaux, comme l'acier.

Le comportement à basse température de l'aluminium est avantageux dans un contexte nordique. En effet, la résilience du matériau s'accroît avec la diminution de la température (Denis Beaulieu, 2013). Cela réduit le risque de rupture fragile des structures.

La formabilité de l'aluminium permet d'extruder des pièces d'aluminium. Cela permet de réaliser des profilées ayant des géométries complexes, ce qui permet d'optimiser le ratio poids/résistance des structures (Denis Beaulieu, 2016).

Enfin, l'aluminium est un métal entièrement recyclable, ce qui en fait un matériau écologique et adapté aux préoccupations environnementales.

### **2.2.2 Limites à l'utilisation de l'aluminium**

Plusieurs éléments constituent des freins à l'utilisation de l'aluminium dans les infrastructures.

La première limite est le coût du matériau. En effet, il est estimé que le prix d'une pièce d'aluminium extrudée peut être supérieur de 25 % à 75 % à celui d'une pièce en acier équivalente (*Positionnement de l'aluminium dans la construction des ponts au Canada: répertoire, problématique et stratégie*, 2008). Ce coût est également fortement dépendant des capacités de production de pièces extrudées et de la facilité d'obtention de ces dernières à proximité du chantier. Selon les estimations du projet, le coût du platelage en aluminium proposé dans cette étude est 2,6 fois plus cher qu'une dalle de béton équivalente (Burgelin, 2017).

La faible expérience dans le domaine de l'application structurale de l'aluminium dans les ponts routiers, notamment en ce qui concerne les platelages extrudés, est un frein à l'utilisation de ce matériau par les ingénieurs. En effet, les normes de conception liées à l'utilisation de l'aluminium dans les ponts sont encore jeunes et par conséquent elles ne sont pas aussi complètes et précises que les codes en vigueur pour les structures de béton ou d'acier. En particulier, le chapitre 17 *Ouvrages en aluminium* de la norme S6-14 se montre restrictif et ne permet pas de tirer pleinement avantage des atouts de l'aluminium dans les ponts.

Le risque de corrosion galvanique entre acier et aluminium (ou entre béton et aluminium) nécessite de prendre des dispositions de protection de l'aluminium qui peuvent s'avérer coûteuses (Vargel, 1999).

La chaîne d'approvisionnement n'est pas encore bien adaptée à la production de platelages en aluminium. En effet, il n'existe pas, au Canada, de presses avec un diamètre supérieur à 14 pouces, selon les recherches effectuées par les membres de l'équipe de recherche du projet R786.1 *Développement d'une solution de platelage en aluminium pour pont routier à poutres d'acier, avec action composite* (Djedid, Desjardins, Guillot, & Fafard, 2018). La taille du diamètre des presses conditionne la matrice d'extrusion, et donc la taille des profilés extrudés. Ne pas disposer de presses de grandes dimensions au Canada implique soit de concevoir des petites extrusions, soit de devoir les faire fabriquer à l'extérieur du Canada et ainsi s'acquitter d'un surcoût de production. En outre, les extrudeurs avec les plus grosses capacités ont des coûts de fonctionnement très important, ce qui se répercute sur le coût des extrusions.

## **2.3 Utilisation de l'aluminium dans les normes de conception**

### **2.3.1 Au Canada**

Le dimensionnement des structures d'aluminium dans les ponts est entré dans la norme S6-14 en 2011, avec l'ajout du chapitre 17. Il existe également la norme S157-17 *Calcul de la résistance mécanique des éléments en aluminium (CAN/CSA-S157-17 : Strength Design in Aluminum, 2017)*.

### **2.3.2 Hors du Canada**

La conception d'ouvrages d'art faisant intervenir l'aluminium fait l'objet de normes dans d'autres pays :

- aux États-Unis : la section 7 de l'AASHTO ;
- dans les pays de l'Union européenne : l'Eurocode 9.

## **2.4 Exemples de ponts à platelage en aluminium**

### **2.4.1 Pont de Corbin, États-Unis**

Cet ouvrage est un pont suspendu de 98 m de longueur, construit en 1937 en Virginie (États-Unis) avec un tablier en acier. Il est rénové en 1996 par le remplacement de son platelage par un platelage en aluminium extrudé (Siwowski, 2006). Ce dernier est un platelage *AlumaDeck* de 5 pouces d'épaisseur (127 mm) en alliage 6061-T6 (*Positionnement de l'aluminium dans la construction des ponts au Canada : répertoire, problématique et stratégie*, 2008). La Figure 2-2 illustre la géométrie du platelage utilisé.

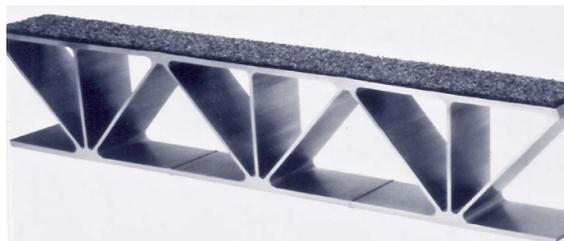


Figure 2-2 Tablier extrudé AlumaDeck.

Source : (Roche Ingénieurs-conseil, 2008)

### 2.4.2 Pont de Little Buffalo Creek, États-Unis

Ce pont était initialement un pont à dalle de béton sur poutres d'acier, construit en 1971 sur la route US 58, au-dessus du *Little Buffalo Creek*, en Virginie (États-Unis). Il a une longueur de 16,7 m et une largeur de 9,75 m. En 1996 la dalle de béton est remplacée par un platelage en aluminium de type *AlumaDeck* (voir Figure 2-3), identique à celui du pont de Corbin. Cette implémentation a été faite dans le cadre d'une étude du Virginia Transportation Research Council (conseil de recherche des transports de Virginie). Le platelage du pont a été instrumenté et un modèle éléments finis a été construit, ce qui a permis de conclure que le tablier *AlumaDeck* est une bonne alternative pour les ponts où il faut remplacer le tablier de béton et diminuer la charge morte afin d'augmenter la charge vive (Prince, 1997).

Le platelage est connecté aux poutres via des goujons soudés sur les poutres ; les cellules d'aluminium traversées par les goujons sont remplies d'un coulis cimentaire. Le pont est situé sur une route à fort trafic, empruntée par des camions et soumise à des sels de déglçage l'hiver.

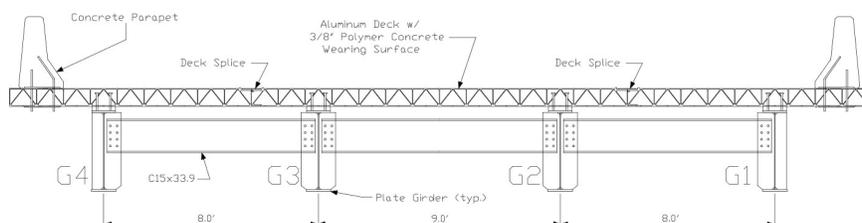


Figure 2-3 Coupe du tablier à platelage en aluminium du pont de Little Buffalo Creek

Source : (Prince R. , 1997).

Les essais initiaux, menés par le *Virginia Transportation Research Council* ont permis de conclure que le tablier *AlumaDeck* est une bonne alternative pour les ponts où il faut remplacer le tablier de béton et diminuer la charge morte afin d'augmenter la charge vive admissible (Prince, 1997).

La mission déléguée par AluQuébec et l'Association de l'aluminium du Canada a visité en 2015 ce pont, c'est-à-dire 19 ans après l'installation du platelage en aluminium. Le rapport fait objet des constatations suivantes (D. Beaulieu, Internoscia, & Hartileb, 2015) :

- le platelage en aluminium est en très bon état ;

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

- les boulons en acier galvanisé sont corrodés à un niveau assez avancé (voir Figure 2-4) ;
- la surface de roulement en époxy-granulat montre des signes d'usure (voir Figure 2-5).



**Figure 2-4** Usure de la surface de roulement du pont de l'US Route 58, après 19 ans de service

Source : (Beaulieu, Internoscia, & Hartlieb, Ponts et passerelles en aluminium - Rapport de visites et de rencontres en Suède, Hollande et aux États-Unis, 2015).



**Figure 2-5** Corrosion des boulons du pont de l'US Route 58, après 19 ans de service

Source : (Beaulieu, Internoscia, & Hartlieb, Ponts et passerelles en aluminium - Rapport de visites et de rencontres en Suède, Hollande et aux États-Unis, 2015).

### **2.4.3 Pont de Saint-Ambroise, Canada**

Ce pont est un projet pilote du MTQ mené à bien en 2015. Il visait à évaluer la facilité de construction d'un tablier de pont à platelage en aluminium au Québec, à étudier le comportement d'un tel platelage en hiver et à servir de banc d'essai pour la surface de roulement constituée d'un antidérapant mince. Il est situé sur le 9<sup>e</sup> rang, au-dessus du ruisseau Williams, au Saguenay ; son code de l'inventaire des structures du MTQ est P-17948.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Il s'agit d'un pont de 8,5 m de portée et d'une largeur carrossable de 6,7 m (2 voies). Sa conception a été basée sur celle d'un pont acier-bois standard. Le platelage utilisé est le platelage *AlumaBridge* constitué d'extrusion de 8 pouces (203,2 mm) de hauteur, soudée entre elles par friction-malaxage. La Figure 2-6 illustre le chantier de cet ouvrage.



**Figure 2-6** Chantier de l'installation du platelage du pont de Saint-Ambroise

Source : Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL

Ce pont a fait l'objet d'une inspection après un an de service, en octobre 2016. Les principales observations, concernant l'évolution de l'ouvrage, consignée dans le rapport d'inspection, sont les suivantes (Fortin, 2016) :

- le revêtement de surface Bimagrip apparaît en parfait état ;
- des traces d'usure par frottement sous la semelle inférieure des poutres, au niveau des brides de connexion avec le platelage (Figure 2-7) ;
- un début de corrosion a été constaté au niveau des plaques d'acier galvanisé en contact avec le platelage.



**Figure 2-7** Usure des poutres par frottement et début de corrosion sur les plaques en acier, octobre 2016

Source : (Fortin, 2016)

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Cet ouvrage a fait l'objet d'une visite de la part de l'équipe de l'Université Laval le 18 juillet 2018. L'état général du pont est excellent, avec cependant quelques traces de corrosion à certaines interfaces acier/aluminium, ainsi qu'une usure visible du revêtement époxy-granulats. Plus précisément, les observations suivantes ont été faites :

- état du tablier :
  - très bon état général ;
  - présence locale de corrosion à certaines interfaces de contacts entre acier et aluminium (boulons, notamment), voir la Figure 2-9 ;
  - trace de peinture à certains endroits de la charpente métallique ;
  - pas de corrosion au niveau des zones avec accumulation de débris (extrémités des panneaux) ;
  - ouverture d'environ 2 à 2,5 cm entre le platelage et la chaussée, espacement plus faible aux rives (voir Figure 2-11) ;
  - profondeur de cet espace : 6-7 cm
  - les appuis sont cisailés, dans un plan horizontal, ce qui indique un non-retour à zéro des déplacements du platelage au niveau des appuis (voir Figure 2-10).
- état de la surface de roulement :
  - irrégularités dues à la mise en place du revêtement ;
  - différence marquée de l'usure entre les zones de passage fréquent de roues (centre du platelage) et les zones sans passage de roues (sous les lisses de glissières) ;
  - présence de déformations laissées par les vis du platelage dans l'enrobé bitumineux, à la jonction entre les approches et le platelage.



**Figure 2-8** Corrosion d'un boulon fixant une bride en acier au platelage en aluminium, juillet 2018

Source : Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 2-9 Corrosion galvanique aux interfaces acier-aluminium, juillet 2018**

Source : Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL.



**Figure 2-10 Cisaillement des appuis, juillet 2018**

Source : Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL.



**Figure 2-11 Interface approche - platelage, juillet 2018**

Source : Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL.

**2.4.4 Programme expérimental du Florida DOT**

Le *Florida Department of Transportation* a mené en 2016 des essais expérimentaux sur des panneaux de platelage en aluminium fournis par AlumaBridge. Ces panneaux sont illustrés sur la Figure 2-12.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

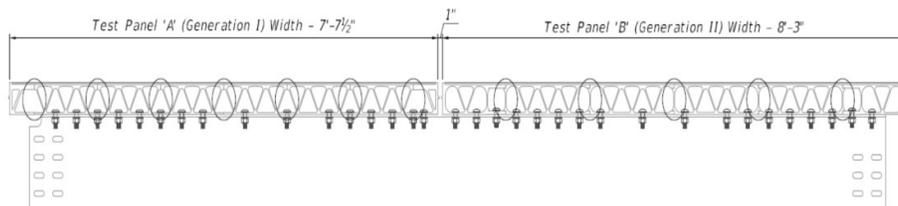


Figure 2-12 Panneaux testés par le Florida DOT

Source : (Freeman & Potter, 2017).

### 2.4.4.1 Surface de roulement

La surface de roulement des panneaux mis à l'essai était une couche de composite résine-granulats, le *Flexolith*, de la compagnie *Euclid Chemicals*. Ce revêtement a été testés avec un simulateur de charge routière. Le dispositif expérimental est illustré sur la Figure 2-13.

Les panneaux ont été soumis à 600 000 passages de roue, ce qui correspond à 75 jours d'usure, avec un ADTT à 4 000 véhicules/jours/voies, avec des véhicules de deux essieux uniquement. Lors des 300 000 premiers cycles, des dispositifs de chauffage ont maintenu la surface de roulement à une température comprise entre 40°C et 50°C. Durant les 300 000 cycles restants, les panneaux ont été recouverts d'eau. La charge de roue appliquée est celle d'une charge de roue unique du camion HL-93 de l'AASHTO : 49,4 kN (11,1 kip). Les conclusions de l'étude sont que l'adhérence du revêtement au platelage est bonne et que le coefficient de friction de la surface de roulement obtenu après les essais cycliques reste supérieur à ce qui est couramment attendu d'un pont à dalle de béton neuf.



Figure 2-13 Panneaux soumis au simulateur de charge routière

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Source : (Freeman & Potter, 2017).

### 2.4.4.2 Corrosion

Des essais de corrosion ont été menés sur les panneaux testés par le Florida DOT. Ces essais ont consisté à immerger pendant 11 mois des échantillons dans de l'eau salée. L'équipe de recherche a conclu les points suivants :

- il y a des traces de corrosion par piqûres, mais de faible importance ;
- les problèmes liés à la corrosion des boulons devraient être évités en faisant une inspection biannuelle des boulons et en les remplaçant au besoin.

## 2.5 Analyse du coût du cycle de vie

### 2.5.1 Principes généraux

L'analyse du coût du cycle de vie (ACCV) est un outil d'aide à la décision économique permettant de comptabiliser l'intégralité des coûts d'un produit ou d'un service sur son cycle de vie : « du berceau à la tombe ». L'ACCV d'une structure consiste ainsi à chiffrer tous les coûts apparaissant pendant sa durée en service : construction, entretien et éventuelles reconstructions et démolition.

Cette méthode d'arbitrage permet de considérer le plus objectivement possible une situation puisqu'une on évite ainsi l'écueil d'une analyse incomplète et biaisée qui ne considérerait que les coûts de construction.

La norme ISO 15686-5 (2017) définit le périmètre des coûts à considérer dans un calcul de coût global (Figure 2-14).

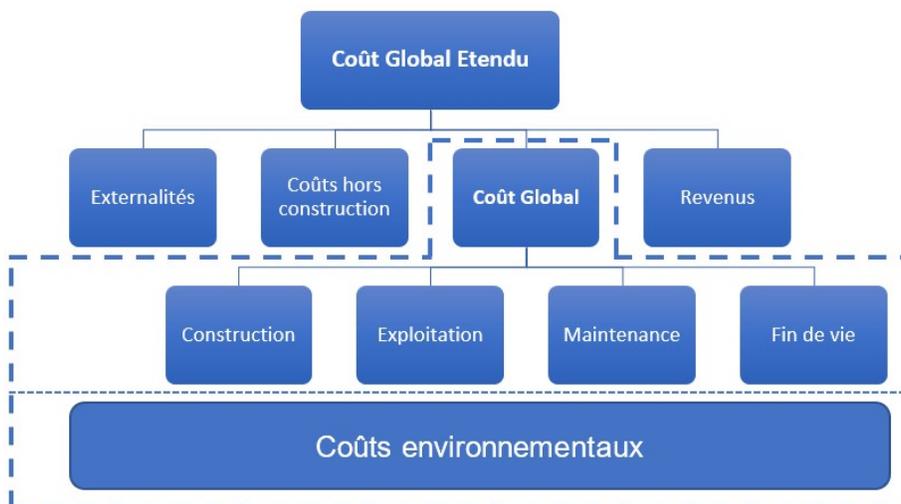


Figure 2-14 Représentation du coût global et global étendu

Le coût global étendu comprend tous les coûts techniques supportés par le maître d'ouvrage et les utilisateurs, mais intègre également un volet financier et fiscal, les revenus, les externalités positives ou négatives

générés pour des tiers. Des éléments intangibles tels que la qualité d'usage, la pollution sonore ou encore les impacts de la construction sur le paysage sont incorporés.

Le coût global, ou coût du cycle de vie, se restreint quant à lui aux coûts techniques supportés par le maître d'ouvrage et les utilisateurs.

La réalisation d'une ACCV se décompose, similairement à la procédure de l'analyse du cycle de vie, en 4 grandes étapes comme le montre la Figure 2-15.

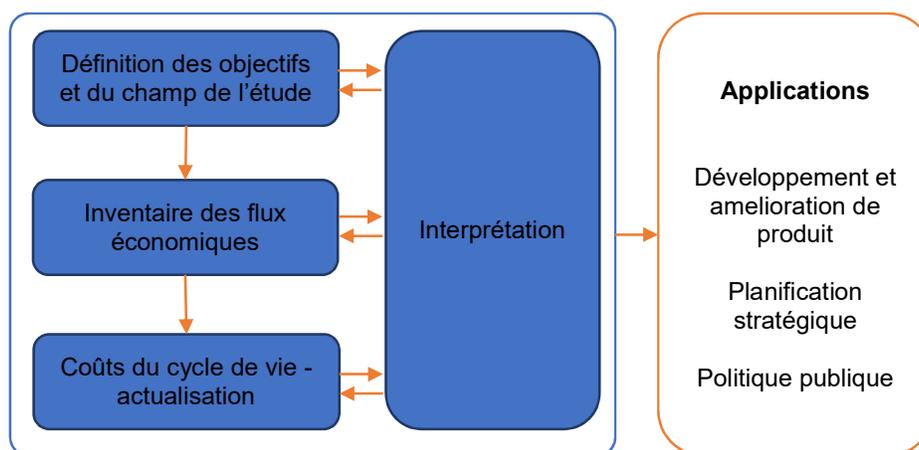


Figure 2-15 Phases de la réalisation d'une ACCV

Ces étapes se définissent comme suit :

- définition des objectifs et du champ de l'étude qui permet de poser le problème en définissant la fonction du système et l'unité fonctionnelle à laquelle tous les flux économiques seront ensuite rapportés. Les frontières de l'étude sont également définies ainsi que les différents scénarios à considérer ;
- inventaire des flux économiques qui consiste à quantifier tous les coûts apparaissant sur le cycle de vie ;
- analyse du coût du cycle de vie qui est ensuite réalisée en sommant tous les coûts rencontrés – via une actualisation – sur le cycle de vie ;
- interprétation qui consiste à évaluer les résultats puis de statuer sur l'option préférable de l'étude comparative tout posant un regard critique sur toutes les données récoltées et les hypothèses effectuées au cours de l'ACCV

### 2.5.2 ACCV de ponts à platelage en aluminium

À ce jour, très peu d'études ont réellement été menées sur le coût du cycle de vie des ponts à platelage en aluminium. La très grande majorité des études économiques réalisées ne sont en réalité pas des ACCV, mais de simples études du coût initial de construction, que l'on sait incomplètes selon une vision cycle de vie.

C'est notamment le cas de l'analyse faite par Carol Roy dans le cadre son mémoire de maîtrise sur l'évaluation du potentiel d'utilisation de l'aluminium

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

dans les ouvrages d'art (Roy, 1999). La nécessité d'une analyse sur le cycle de vie était mentionnée, mais les diverses conceptions n'étaient finalement soumises qu'à des analyses du coût initial de construction. Dans ce mémoire, le platelage était soit en aluminium soit en béton armé, mais le système porteur était toujours en aluminium. On retiendra que le coût de production des platelages en aluminium (Svensson et Alumadeck) était estimé 3 à 4,5 fois supérieur aux coûts de construction des dalles de béton. Ces données sont à considérer avec prudence, car elles ne mentionnaient aucune référence particulière ni détail des éléments pris en considération – le prix des armatures et du revêtement pour la dalle de béton ne semblent par exemple pas avoir été considérés.

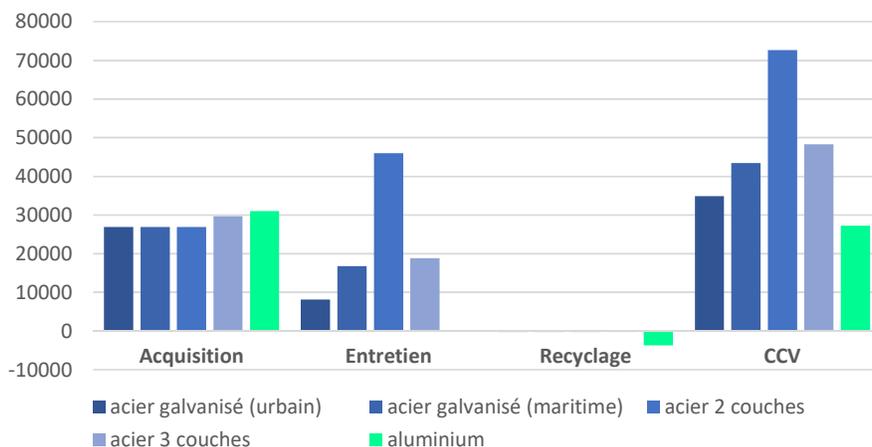
Par ailleurs le prix des platelages en aluminium a diminué de nos jours avec l'amélioration des extrudeurs et du procédé de soudage de l'aluminium. Cette assertion est corroborée par une récente étude des coûts de production d'un platelage en aluminium (Burgelin, 2017). Selon cette étude, le prix des extrusions était estimé à 778 CAN\$/m<sup>2</sup> et celui du soudage à 150 CAN\$/ m<sup>2</sup> soit un total de 925 CAN\$/ m<sup>2</sup>. Comparativement à une dalle de béton armé de dimension et résistance équivalente, le platelage en aluminium ne serait alors plus que 2,6 fois plus coûteux.

La réhabilitation de ponts avec des platelages en aluminium pour remplacer ceux en bois a fait l'objet d'une analyse économique proche d'une ACCV (Arrien, 1995). En effet, des scénarios d'entretien ont été établis sur une période de 40 ans qui était la durée de vie estimée du platelage en aluminium utilisé (Svensson). Cependant, le cycle n'était pas complet puisque les frais de fin de vie (recyclage, démolition) n'étaient pas considérés. Les coûts liés à l'entretien, se produisant à des périodes différentes, ont été ramenés à l'année initiale en utilisant un taux d'actualisation de 6 %. Les résultats de cette étude ont démontré que l'aluminium était sur un cycle de vie de 40 ans, dans le cadre d'une réhabilitation, 10 % plus avantageux économiquement qu'un pont à platelage en bois. Cet avantage résidait dans la fréquence de remplacement du platelage en bois, dû à sa grande perméabilité qui entraînait une détérioration des éléments porteurs – qui eux-mêmes devaient alors être réparés, augmentant encore les coûts associés.

D'autres études soulignent également que le principal avantage de l'utilisation de l'aluminium dans les ponts routiers réside dans la phase d'entretien où les coûts d'entretien sont bien moins élevés en raison des propriétés d'anticorrosion de l'aluminium qui ne nécessite pas de traitement et protège le système porteur (Siwowski, 2006; Walbridge & de la Chevrotière, 2012). Par ailleurs, des économies de coûts seraient également réalisées grâce aux phases de transport, où la légèreté de l'aluminium joue, et de mise en place où le pont peut être fabriqué en usine et très rapidement assemblé en chantier réduisant le temps de fermeture de route. Cependant ces avantages sont purement qualitatifs et n'ont pas été quantifiés. Il en va de même pour le gain de coût hypothétique qui serait réalisé sur les fondations grâce à la légèreté d'un platelage en aluminium – aucune donnée chiffrée n'est avancée pour appuyer ces assertions.

### 2.5.3 Étude du coût d'une passerelle piétonnière

Une étude évaluant les coûts totaux de possession d'une passerelle piétonnière menée par MAADI Group a montré que la durabilité et le peu d'entretien, qu'engendre un platelage en aluminium, seraient les deux - principaux avantages de l'aluminium (Maadi Group, 2015). Cette étude est l'ACCV la plus complète disponible actuellement sur un pont en aluminium. Les ponts comparés dans cette étude étaient des ponts piétonniers, conçus avec la norme CAN/CSA S6-2006, d'une portée de 21,3 m pour une largeur libre de 1,8 m. Cinq conceptions ont été comparées : une en aluminium, une en acier galvanisé à chaud en milieu urbain, une en acier galvanisé à chaud en milieu maritime, une en acier avec un système de peinture à 2 couches et enfin une en acier avec un système de peinture à 3 couches. Dans cette étude les coûts sur l'ensemble du cycle de vie ont été détaillés phase par phase – la méthodologie utilisée pour évaluer les phases postérieures à la construction initiale fut, comme dans l'étude de Arrien et al. (1995), l'actualisation des flux de trésorerie. Les résultats, en dollars canadiens, pour chaque phase du cycle de vie, pour un taux d'actualisation de 3,0 %, sont présentés en Figure 2-16.



**Figure 2-16 Coûts du cycle de vie par phase**

Source : (données issues de Maadi, 2015)

Il en ressort que :

- Le prix d'acquisition est sans surprise plus élevé pour la solution en aluminium avec un surcoût allant de 4 à 15 %.
- Les coûts liés à l'installation n'ont finalement pas été chiffrés en raison de leur très grande variabilité liée à l'emplacement, au climat, à la proximité des fournisseurs entre autres. Néanmoins, les auteurs soulignent que la légèreté de l'aluminium engendrerait *a priori* des économies de transport et de manipulation lors de la phase d'installation.
- Pour la phase d'entretien, les coûts ont été mis à zéro concernant la solution en aluminium, quel que soit le scénario de milieu envisagé. Ce choix est expliqué par l'état du pont d'aluminium d'Arvida, érigé en 1950, et où les seuls problèmes de corrosion qui ont été

observés l'ont été sur des membrures situées directement sous ou à proximité de la dalle et des trottoirs en béton armé, et donc soumis à la corrosion galvanique par contact direct ou suite à l'accumulation de matériaux granulaires provenant des opérations de déneigement. Ces problèmes pourraient être évités de nos jours grâce aux progrès réalisés en matière d'alliage (Siwowski, 2006; Tremblay, 2012). En revanche, pour les solutions en acier, des programmes d'entretien ont été définis et pouvaient générer des frais supérieurs à ceux de construction.

- Les coûts d'élimination ont, quant à eux, été comptabilisés en estimant un prix de revente après 50 ans. Pour les ponts en acier ce prix n'excédait pas 7 % du prix de revente de la conception en aluminium témoignant d'un net avantage pour cette dernière.

Les résultats finaux ont montré qu'indépendamment du milieu et du scénario, les coûts du cycle de vie étaient toujours inférieurs pour le pont en aluminium.

Des analyses de sensibilité ont montré l'influence du taux d'actualisation sur les résultats. Celui-ci apparaît particulièrement critique. En augmentant le taux d'actualisation de seulement 3 %, la valeur des coûts d'entretien, en dollars d'aujourd'hui, serait réduite de plus de 100 % et les bénéfices estimés du recyclage seraient réduits d'environ 300 % pour une durée de vie de 50 ans. Il est ainsi possible de favoriser des solutions peu durables nécessitant beaucoup d'entretien en augmentant le taux d'actualisation.

Des études plus approfondies sur la détermination de ce taux pourraient également éviter une fixation plus ou moins arbitraire d'un paramètre aussi décisif dans les conclusions de l'étude. En effet, il semble y avoir un consensus sur le fait que les taux d'actualisation utilisés sont trop élevés pour des projets de long-termes (Arrow et al., 2013; Gollier, 2015; Weitzman, 1998). De nombreux économistes avancent également que pour des projets d'une durée de vie supérieur à 30 ans, un taux d'actualisation décroissant devrait être utilisé – ce qui est d'ailleurs déjà le cas au Royaume-Uni (Arrow et al., 2014; Gollier, 2008; Lebègue, 2005).

## **2.6 Analyse environnementale du cycle de vie**

### **2.6.1 Principes généraux**

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthodologie permettant d'établir la performance environnementale d'un produit ou d'une activité sur l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agit donc d'une approche holistique, qui tient compte les étapes d'extraction et du traitement des ressources naturelles, des processus de fabrication, du transport et de la distribution, de l'utilisation et de la gestion du produit en fin de vie.

La réalisation d'une ACV d'un produit ou de l'ensemble des activités d'une industrie permet à cette dernière :

- d'entreprendre une réflexion rigoureuse menant à une meilleure compréhension des forces, faiblesses et opportunités d'améliorations environnementales de ses produits (établissement du profil environnemental) ;

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

- de communiquer à ses clients et à ses différentes parties prenantes les attributs environnementaux de ses produits ou services d'une manière objective et crédible ;
- de positionner (« *benchmarking* ») ses produits par rapport aux produits les plus performants du point de vue environnemental dans un secteur donné ;
- de démontrer aux différentes parties prenantes sa maîtrise et ses connaissances du cycle de vie de ses produits, incluant la chaîne d'approvisionnement ;
- de construire un argumentaire scientifique solide pour démontrer les attributs environnementaux d'un produit en réponse à des allégations de différentes parties prenantes (clients, concurrents, journalistes), ou en réaction à une décision réglementaire ou politique ;
- de faciliter les communications internes dans un processus d'amélioration continue et d'écoconception.

Reconnue internationalement, l'ACV est une méthodologie encadrée par la série de normes ISO 14040 (2006a) à ISO 14044(2006b) Ce cadre méthodologique constitué de 4 étapes est représenté à la Figure 2-17.

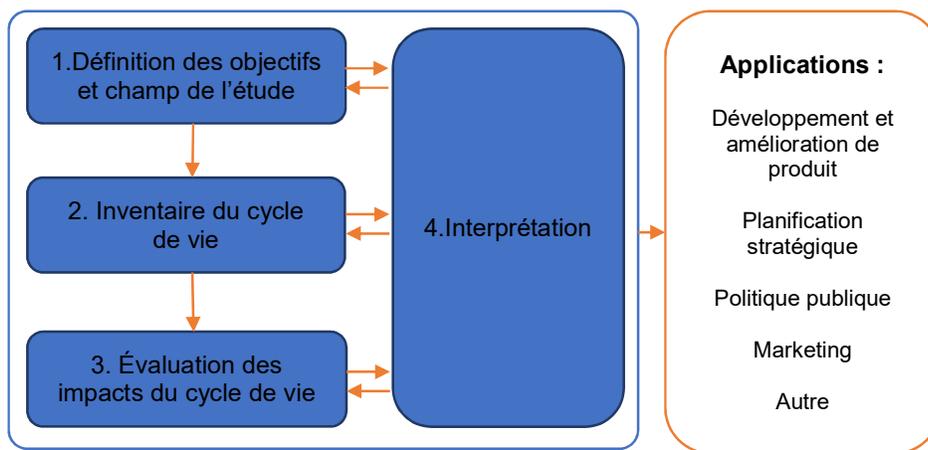


Figure 2-17 Quatre phases de l'ACV

Source : (ISO14040 :44)

La phase de définition des objectifs et du champ de l'étude établit les bases de l'étude. En effet, il est important de noter qu'une ACV porte sur une fonction remplie par un produit ou service, ce qui assure la comparabilité d'options alternatives ayant des performances différentes. Cette phase permet ainsi de définir la référence de calcul, l'unité fonctionnelle qui vient quantifier la fonction considérée et le système de produit qui représente l'ensemble des procédés et flux qui seront à l'étude.

La phase d'inventaire du cycle de vie (ICV) correspond à la collecte de données quantitatives concernant les flux de matière et d'énergie entrants et sortants des différents processus inclus dans l'analyse. Ces données sont ensuite rapportées à l'unité fonctionnelle et l'inventaire, ainsi obtenu, sert de base à la comparaison des options alternatives.

L'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) vise à comprendre et à analyser les impacts environnementaux potentiels des différentes options investiguées. L'évaluation des impacts utilise comme entrant l'inventaire obtenu précédemment. Les impacts potentiels sont calculés, pour chacune des catégories d'impacts ou de dommages considérés, à l'aide d'un facteur quantitatif (dit de caractérisation) représentatif de l'importance de l'impact potentiellement engendré par une substance extraite ou émise à l'environnement; l'option présentant le résultat d'indicateur de catégorie le plus élevé est celle qui est présente l'impact potentiel le plus grand pour cette catégorie.

Finalement, en colligeant tous les informations et résultats obtenus, la phase d'interprétation permet d'identifier, si possible, la ou les options investiguées qui sont préférables du point de vue environnemental. Il est pertinent de mentionner qu'en ACV, pour pouvoir conclure qu'un produit est favorable par rapport à un autre, il faut que *toutes* les catégories d'impacts environnementaux considérées favorisent ledit produit. Si ce n'est pas le cas, un compromis doit être fait entre les catégories d'impact.

### **2.6.2 ACV appliqué aux ponts routiers**

Une revue des publications pertinentes (études ACV ou autres) portant sur les ponts routiers a été effectuée dans ce projet. Ceci a permis de dresser un portrait des travaux déjà réalisés à l'échelle internationale. L'analyse des études pertinentes répertoriées a aussi permis de comparer divers choix méthodologiques et sources de données employées, ainsi que les principales conclusions. Un total de 16 études a été consulté et retenu. La synthèse des différentes études consultées lors de de la revue de littérature se retrouve dans le Tableau A-1 en annexe.

### **2.6.3 Objectif et champ de l'étude.**

Les objectifs des études peuvent énormément varier d'une étude à l'autre en ACV. Dans le cas plus spécifique des ponts routiers, il est possible de diviser ces études en deux grandes familles :

1. ACV d'application : Étude généralement mandatée par un décideur afin d'intégrer des critères environnementaux à la prise de décision par rapport au choix d'une nouvelle construction déjà prévue.
2. ACV d'innovation : Analyse ayant pour but d'évaluer les gains environnementaux potentiels d'un nouveau type de matériau ou d'une conception optimisée. Ces analyses sont habituellement réalisées dans un contexte académique. La présente étude s'inscrit dans cette famille.

Concernant le choix d'unité fonctionnelle, c'est-à-dire l'unité de base de l'analyse, trois types ont été observés:

1. 1 m<sup>2</sup> de pont
2. 1 m de section
3. Entièrement du pont

La période pour laquelle l'unité fonctionnelle est étudiée varie de 30 à 120 ans selon l'étude.

Toutes les études étaient de type « berceau à tombeau », c'est-à-dire qui prennent en compte l'entièrement du cycle de vie du produit étudié. Le cycle

de vie simplifié d'un pont est illustré à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Il est également pertinent de mentionner que plus de la moitié des études incluait dans leurs frontières d'étude le détournement du trafic causé par les travaux d'entretien.

---

**Figure 2-18 Cycle de vie simplifiée d'un pont**

Il existe plusieurs indicateurs différents permettant de quantifier les résultats environnementaux. Par exemple, les indicateurs suivants : CO<sub>2</sub> eq, énergie utilisée (MJ), quantité d'eau ou d'air polluée, quantité de déchets produits, SO<sub>2</sub>, CFC, Sb eq, PO<sub>4</sub> ainsi que les indicateurs traditionnels utilisés en ACV (le changement climatique, la qualité des écosystèmes, la santé humaine et les ressources utilisées). Le choix d'indicateur peut avoir des répercussions importantes sur les conclusions de l'étude. En effet, l'environnement est un système complexe qui est impossible à évaluer avec un seul indicateur. Par exemple, le CO<sub>2</sub> eq, permet d'exprimer les impacts relatifs par rapport aux changements climatiques, et néglige plusieurs autres enjeux environnementaux tels que l'épuisement des ressources, la biodiversité, l'acidification des sols et des eaux, etc.

À propos des analyses économiques, 11 des 16 études retenues comportaient également une analyse des coûts sur l'ensemble du cycle de vie.

#### **2.6.4 Conclusions récurrentes**

Il peut être difficile de tirer de grandes conclusions absolues à partir de plusieurs ACV puisque les objectifs, le contexte géographique et les frontières des systèmes étudiés changent d'une étude à l'autre. Également, puisque le choix d'indicateurs environnementaux s'avère généralement un choix arbitraire des chercheurs, il est difficile de comparer des études portant sur des sujets semblables, mais utilisant des indicateurs différents puisqu'ils dressent des portraits environnementaux trop différents les uns des autres (Niemeijer & De Groot, 2008).

Malgré tout, il est possible de tirer certaines conclusions récurrentes et génériques à partir de cette revue de littérature :

- dans le cas des analyses économiques et environnementales combinées, les coûts et les impacts environnementaux ne sont pas nécessairement corrélés ;

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

- les étapes du cycle de vie les plus contributrices au profil environnemental sont généralement la production des matériaux et le détournement du trafic ;
- il n'est pas possible d'affirmer qu'un type de matériau se démarque dans toutes les situations selon des critères environnementaux ;
- le système de produit nécessitant le moins d'activité d'entretien est généralement le meilleur choix ;
- le transport des matériaux a généralement une contribution négligeable au profil environnemental du pont ;
- un indicateur unique tel que le kg éq. CO<sub>2</sub> ne représente pas un profil environnemental complet de la situation étudiée ;
- les incertitudes associées aux données peuvent rendre les résultats non différenciés.

### 3. MÉTHODOLOGIE

#### 3.1 Définition des objectifs et champs de l'étude

##### 3.1.1 Objectifs de l'étude

Le **but de cette étude** est de comparer les coûts totaux de possession sur le cycle de vie d'un pont à platelage en aluminium à ceux d'autres types de pont plus standard. Une analyse des impacts environnementaux potentiels complète également la première analyse.

Plus spécifiquement, les objectifs de l'étude sont de :

1. Établir et comparer les coûts et le profil environnemental de différents types de tablier de ponts selon une perspective cycle de vie:
  - a. tablier acier-bois en milieu rural (1rAB) ;
  - b. tablier à platelage en aluminium sur poutre d'acier en milieu rural (2rAA) ;
  - c. tablier à dalle de béton sur poutre d'acier en milieu urbain (3uAB) ;
  - d. tablier à platelage en aluminium sur poutre d'acier en milieu urbain (4uAA).
2. Identifier les plus grands contributeurs aux coûts totaux et au profil environnemental et les paramètres qui influencent le plus les résultats propres aux différents systèmes à l'étude.
3. Intégrer les résultats de l'étude économique et environnementale pour dresser une situation complète de la situation.

##### 3.1.2 Champs de l'étude

###### 3.1.2.1 Unité fonctionnelle

Puisque les produits ne présentent généralement pas les mêmes caractéristiques de performance (par ex. durée de vie), l'ACCV et l'ACV ne considèrent pas les produits étudiés directement, mais plutôt les considèrent par l'entremise de la ou des fonctions qu'ils fournissent. Dans le cas présent, les systèmes étudiés fournissent la fonction d'*assurer le transport routier entre deux segments de route séparés par un obstacle*.

L'unité fonctionnelle (UF), c'est-à-dire la référence à laquelle se rapportent les calculs de l'inventaire et de l'évaluation des coûts et des impacts du cycle de vie, est la quantification de la fonction des produits étudiés.

Pour le contexte rural, elle a été définie comme suit : *assurer le transport routier avec un DJMA de 200 pendant 75 ans sur deux voies d'une portée de 20 m.*

Pour le contexte urbain, l'UF a été définie comme suit : *assurer le transport routier avec un DJMA de 2500 pendant 75 ans sur deux voies d'une portée de 20 m.*

### **3.1.2.2 *Processus inclus***

L'analyse du coût du cycle de vie ne portera que sur les tabliers de pont. Les culées et les fondations seront supposées identiques pour chacun des systèmes. Cette hypothèse permet de les exclure du champ de l'étude comparative. Tous les éléments relatifs aux approches sont également négligés pour les mêmes raisons.

Quant à l'étape d'entretien, les activités d'entretien régulier telles que les inspections, réparations mineures, nettoyage, etc. sont estimées similaires pour chacun des tabliers et seront exclues de l'étude.

De plus, tout ce qui concernerait des réparations occasionnées par des événements ponctuels, accidents de la route par exemple, est également exclu de l'étude. Ces événements ne sont pas inhérents à la nature des tabliers ce qui justifie l'exclusion bien que les dommages et les réparations nécessaires seraient potentiellement différents selon le type de tablier.

### **3.1.2.3 *Frontières temporelles***

La période considérée par l'unité fonctionnelle, soit 75 ans, correspond à la durée de vie minimale d'un pont prescrite par la norme canadienne CAN/CSA-S6-14 (*CAN/CSA-S6-14 : Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, 2014).

### **3.1.3 *Périmètres étudiés***

Afin de faciliter la comparaison entre les systèmes étudiés, trois périmètres d'études différents seront utilisés. Les différents périmètres couvrent :

- périmètre 1 - Tous les matériaux et les travaux nécessaires pour la construction initiale du pont. Toutes les activités avant le jour de l'ouverture du pont sont prises en considération ;
- périmètre 2 – Tous les matériaux et les travaux nécessaires lors des travaux d'entretien sur la période de 75. Les activités de gestion en fin de vie des différents matériaux sont également incluses dans ce périmètre. Le premier périmètre est inclus dans celui-ci.
- périmètre 3 – En plus d'inclure les deux premiers périmètres, celui-ci inclut les détournements du trafic causé par les travaux de construction initiaux ainsi que d'entretien.

Une gradation entre les différents périmètres permettra de voir l'évolution des résultats, selon les étapes du cycle de vie pris en compte. Ces trois périmètres seront utilisés tout au long de l'analyse (Figure 3-1).

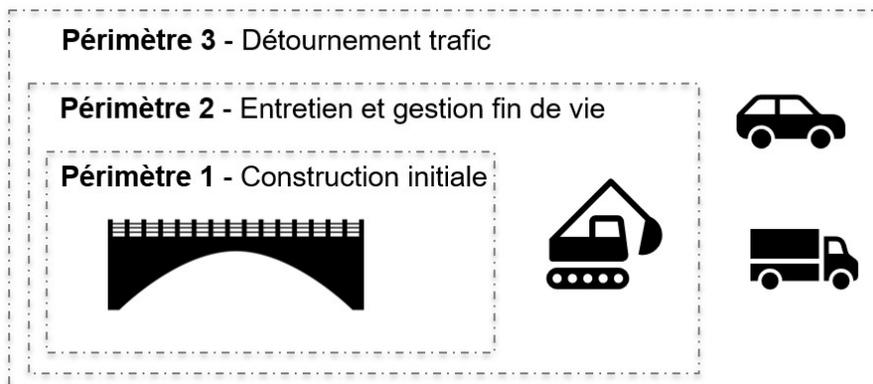


Figure 3-1 Représentation des 3 périmètres utilisés dans l'étude

### 3.1.4 Conception des tabliers étudiés

La conception des différents tabliers a été réalisée lors de la première étape du présent projet. Les conceptions ont été réalisées selon la norme CSA S6-14. Pour les platelages en aluminium, la conception reprend les résultats du projet de recherche R786.1 mené au sein du Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL avec la collaboration du MTQ (Djedid et al., 2018).

#### 3.1.4.1 Conception du tablier acier-bois en milieu rural

Selon le Manuel de conception des structures, le système structural d'un pont acier-bois comporte 5 poutres pour une route locale à 2 voies de circulation (Figure 3-2).

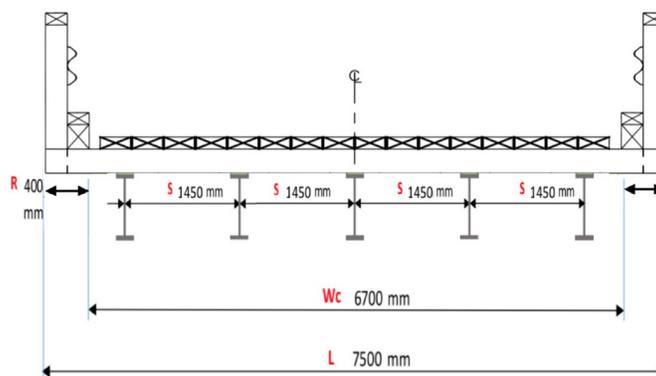


Figure 3-2 Géométrie générale du tablier acier-bois

Les poutres de portée de 20 m sont ainsi espacées de 1450 mm et le porte-à-faux est de 850 mm. Les poutres à utiliser sont des profilés soudés WWF900×192 fait d'acier de construction conformes à la norme CSA G40.21M.

Les poutres sont appuyées sur les culées et reliées par 5 contreventements espacés de 5000 mm.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Les traverses en bois sont considérées comme étant le platelage d'un pont acier-bois. Les traverses (h x L x l : 197 \* 203 \* 4268 mm) espacées de 406 mm sont simplement supportées par les poutres en acier et elles servent d'appui aux madriers de plancher (h x L x l : 96 \* 203 \* 1800 mm) qui sont disposés suivant l'axe du pont. Les madriers de plancher du platelage constituent la surface de roulement du pont.

Les chasse-roues en bois (L x h : 197 \* 96 mm) seront situés en avant de la glissière (minimum 120 mm) pour redresser la trajectoire des véhicules avant qu'ils n'heurtent la glissière de sécurité. Ils reposent sur des appuis de chasse-roues (L x h : 203 \* 197 mm) de 600 mm de longueur, espacés de 1,75 mètres tout le long du pont.

Le dispositif de retenu est composé de poteaux de glissières en bois (H x l x L : 1200 \* 203 \* 197 mm) espacés de 1,75 mètres tout au long du pont et d'une glissière fait d'un profilé d'acier galvanisé à double ondulation.

Il est pertinent de mentionner que tous les éléments du système structural en acier d'un pont acier-bois doivent être protégés contre la corrosion. Dans notre cas, la métallisation (projection de zinc en fusion sur la surface en acier) a été choisie comme protection.

Le bois utilisé est une combinaison d'essence d'épinette-pin-sapin de qualité n°1.

### 3.1.4.2 Conception du tablier à platelage d'aluminium en milieu rural

Le platelage en aluminium développé dans le projet de recherche R786.1 est conçu de façon à avoir une capacité structurale permettant des espacements de poutres significativement plus grands que ce que l'on peut obtenir avec des traverses de bois. Dans le cas présent, un système structural en acier comportant 4 poutres espacées de 2050 mm a été choisi (Figure 3-3). La longueur des porte-à-faux du platelage au-delà des poutres de rive est de 675mm.

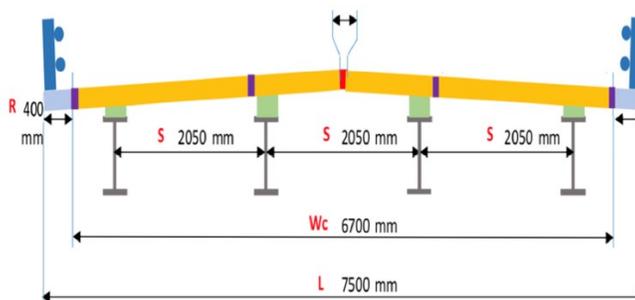
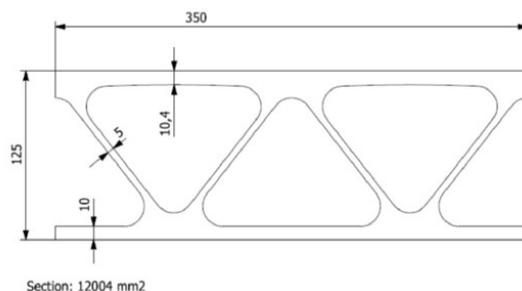


Figure 3-3 Géométrie générale du pont à platelage en aluminium en milieu rural

Les poutres de portée de 20 m sont faits de profilé soudé bi-symétrique ayant des semelles de 350 \* 25 mm, une âme de 850 \* 10 mm. Une configuration à 5 axes de contreventement espacés de 5000 mm a été choisie.

Les extrusions principales du platelage (Figure 3-4) ont une largeur de 350 mm et 125 mm de hauteur. L'alliage d'aluminium 6061-T6 a été choisi puisqu'il est facilement extrudable et soudable.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM



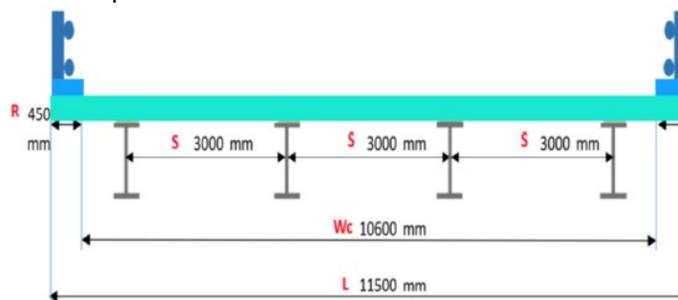
**Figure 3-4** extrusion du platelage d'aluminium

Le dispositif de retenue de niveau d'essai TL-1 est constitué de poteau en aluminium et d'une glissière en acier comme celui installé sur le point de Saint-Ambroise.

Le revêtement antidérapant Bimagrip LS, adapté au véhicule lourd, a été sélectionné. Ce type de revêtement est composé de polyuréthane et de granulats

### 3.1.4.3 Conception du tablier à dalle de béton sur poutre d'acier en milieu urbain

Le système structural du tablier à dalle de béton sur poutre d'acier est composé de 4 poutres espacées de 3000 mm et pour lequel les porte-à-faux de dalle ont une longueur raisonnable de 1250 mm au-delà des poutres extérieures (Figure 3-5). Les poutres ont une semelle supérieure de 300 mm de largeur et 30 mm d'épaisseur. La semelle inférieure a une largeur de 400 mm et une épaisseur de 30 mm. L'âme a une hauteur de 1000 mm et une épaisseur de 12 mm.



**Figure 3-5** Géométrie générale du pont à dalle de béton sur poutres d'acier

Les poutres de portée de 20 m sont simplement appuyées sur les culées et reliées par quatre contreventements espacés de 6667 mm. Le critère d'espacement est celui fixé par le MCS 2016.

La dalle de béton 35 MPa possède une épaisseur de 200 mm et une longueur totale 21,8 m. La superficie totale à bétonner est de 250,7 m<sup>2</sup>.

Des chasse-roues en béton standard (L x h : 450 \* 280 mm) sont également prévus de part et d'autre du tablier pour redresser la trajectoire des véhicules avant qu'ils ne heurtent la glissière de sécurité.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Comme dispositif de retenue, une glissière d'acier du type 210C, un type standardisé qui est fréquemment utilisé par le MTQ pour les ponts à dalle sur poutres, en milieu urbain.

### 3.1.4.4 Conception du tablier à platelage d'aluminium en milieu urbain

La géométrie générale du tablier de pont à platelage d'aluminium en milieu urbain est présentée à la Figure 3-6. Les poutres d'acier mono-symétriques de portée de 20 m ont une hauteur et largeur d'âme de 1300 mm et 12 mm respectivement. La semelle supérieure a une largeur de 350 mm et une épaisseur de 30 mm alors que la semelle inférieure a une largeur de 550 mm et une hauteur de 35 mm. Une configuration à 4 axes de contreventement espacés de 6667 mm a été choisie.

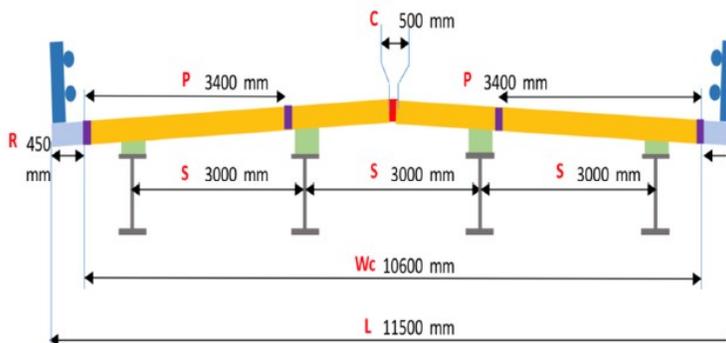


Figure 3-6 Géométrie générale du pont à platelage en aluminium en milieu urbain

Les autres éléments du tablier tels que le platelage, le dispositif de retenue et le revêtement antidérapant ont les mêmes spécificités que ceux du tablier à platelage d'aluminium en milieu rural décrit à la section 3.1.4.2.

## 3.2 Analyse du coût du cycle de vie

### 3.2.1 Coûts de construction et d'entretien

Les coûts de construction des tabliers seront calculés à partir de la conception et du dimensionnement des ponts réalisés en début de projet. Pour chaque configuration de tablier, des scénarios d'entretien, définissant toutes les opérations de remplacement et reconstruction à réaliser, sur le cycle de vie de 75 ans ont été établis avec le MTQ en incluant les temps de fermeture de route afin d'estimer les coûts qu'ils engendrent.

### 3.2.2 Coûts de fermeture de route

Les coûts liés aux fermetures de route sont des coûts indirects qui apparaissent à toutes les phases du cycle de vie d'un ouvrage d'art : construction, entretien, et démolition.

Ils sont dus au détournement du trafic qui augmente le temps de route des usagers, le nombre de kilométrages parcourus, la congestion, les émissions polluantes, la pollution sonore, etc.

Certains de ces coûts sont parfois difficilement quantifiables et les coûts générés par les fermetures de route seront les suivants :

- coûts des usagers :
  - o perte de temps,
  - o carburant,
  - o dépréciation des véhicules,
- coûts environnementaux.

Ce choix a été fait en accord avec le Guide avantage coûts du MTQ (2016a). Une description plus détaillée du calcul et des données utilisées est présente à l'ANNEXE B .

### **3.2.3 Valeur résiduelle**

À la fin du cycle de vie, si l'ouvrage demeure fonctionnel, il conserve une certaine valeur dite résiduelle. Dans le cadre de notre étude économique, on considère que tous tabliers atteindront leur fin de vie utile à 75 ans et aucune valeur résiduelle ne sera attribuée aux ouvrages. De plus, les coûts de démolition, estimés équivalents pour tous les tabliers et très faibles à cause de l'actualisation, sont également exclus de l'étude.

### **3.2.4 Actualisation des coûts**

Un calcul économique « inter-temporel » permet de cumuler et de comparer tous les coûts apparaissant sur le cycle de vie de l'ouvrage calculé.

Avec l'évolution temporelle de la valeur monétaire, les coûts ne peuvent pas être directement comparés entre eux à différents âges, puisque 1\$ d'aujourd'hui n'équivaut pas à 1\$ de demain. Tous les flux économiques doivent ainsi être convertis à une valeur monétaire équivalente reportée à un instant défini.

La méthode de la valeur actualisée nette (VAN) permet de prendre en considération cette fluctuation de la valeur monétaire. Cette méthode ramène tous les flux économiques à une seule et même date – l'année de construction de l'ouvrage – en appliquant un taux d'actualisation. Le taux d'actualisation fait ainsi office de taux de substitution entre le futur et le présent. La valeur actualisée nette se calcule selon la formule suivante :

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

Avec r le taux d'actualisation et n la dernière année du cycle étudié. Chacun des flux monétaires sont ainsi actualisés selon l'époque où le flux est dépensé ou encaissé durant les 75 ans de la durée de l'étude.

Un taux d'actualisation proposé par le MTQ de 2,37% sera utilisé dans l'étude. La Figure 3-7 montre l'évolution de la VAN avec le taux d'actualisation utilisé pour les 75 ans que dure l'étude.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

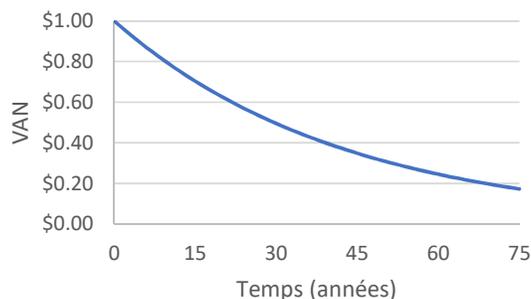


Figure 3-7 Valeur actualisée nette de 1\$ en fonction du temps, avec un taux de 2,37%.

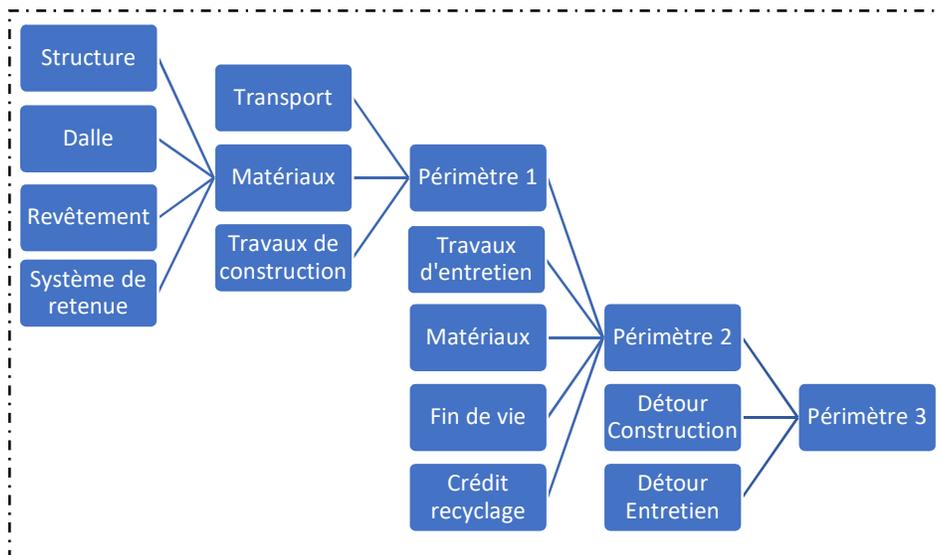
### 3.3 Analyse du cycle de vie environnementale

Les systèmes étudiés dans l'ACCV et l'ACV sont, dans l'ensemble, les mêmes. Toutefois, certains aspects méthodologiques spécifiques à l'ACV doivent être approfondis.

#### 3.3.1 Descriptions des systèmes

Les frontières des systèmes servent à identifier les étapes, processus et flux qui seront considérés dans l'ACV. Elles incluent toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et donc, nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée. Mentionnons également que les divers processus directement associés au cycle de vie des produits étudiés forment l'**avant-plan** des systèmes, tandis que tous les processus d'approvisionnement et de gestion des rejets impliqués par les processus d'avant-plan constituent l'**arrière-plan**. Une version simplifiée de l'avant-plan du modèle appliqué à chacun des types de ponts étudiés est représentée par la Figure 3-8.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 3-8 Arbres des processus génériques des systèmes**

Pour tous les systèmes, les processus en « amont » identifiables sont inclus de manière à fournir la vue la plus complète possible de la situation étudiée. Par exemple, dans le cas d'un transport, non seulement les émissions liées à la combustion de carburant sont considérées, mais aussi les processus et matières nécessaires à la production de ce carburant. De cette manière, les chaînes de production de tous les entrants sont remontées jusqu'à l'extraction des ressources naturelles. Les tableaux de l'ANNEXE C , regroupent les flux et processus utilisés ainsi que les quantités requises en avant-plan.

### 3.3.1.1 Scénario d'entretien et fermetures

Les scénarios d'entretien des ponts considérés pour l'ACV sont identiques à ceux utilisés pour l'ACCV. Ces scénarios seront définis au chapitre 3.4.3. Pour chacun des travaux d'entretien, des équipements mécanisés doivent être employés. Ces équipements ont été divisés en 3 catégories : faible puissance (< 18.64 kW), puissance moyenne ( $\geq 18.64$  kW et < 74.57 kW) et puissance élevée ( $\geq 74.57$  kW). Ces trois niveaux sont basés sur des processus déjà présents dans la base de données d'inventaire utilisée. Faut de données précises sur les équipements utilisés par les entrepreneurs en construction, des hypothèses ont été posées afin d'estimer la durée d'utilisation des différents types d'équipement selon le type de travaux effectués. Le Tableau 3-1 regroupe ces hypothèses par type de travaux. Les travaux de construction représentent les travaux initiaux et ceux de reconstruction complète. Les travaux majeurs représentent le remplacement du platelage ou un resurfaçage complet du tablier, alors que les travaux mineurs sont les remplacements de boulons du platelage en aluminium.

**Tableau 3-1 Hypothèses du temps d'utilisation des équipements par jour de travaux**

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

Type de travaux	Type équipement	h / jour
Construction du tablier	< 18.64 kW	12
	>= 18.64 kW et < 74.57 kW	6
	>= 74.57 kW	2
Travaux majeurs	< 18.64 kW	12
	>= 18.64 kW et < 74.57 kW	6
	>= 74.57 kW	0
Travaux mineurs	< 18.64 kW	12
	>= 18.64 kW et < 74.57 kW	0
	>= 74.57 kW	0

### 3.3.1.2 Modélisation du détournement de trafic

Comme l'a montré la revue de littérature, les détournements du trafic causés par les travaux d'entretien sont des contributeurs non négligeables aux résultats. En ce sens, les paramètres clés concernant ces détournements sont : le nombre et les types de véhicules détournés, et la distance de détournement et la proportion de camions. Les hypothèses concernant les détournements du trafic seront également identiques à celles utilisées pour l'ACCV.

Dans le rapport intermédiaire 3, l'incorporation de l'électrification des véhicules avait été faite de manière préliminaire. Cette piste n'a pas été poursuivie pour le rapport final étant donné que les incertitudes sur le taux de déploiement de cette technologie étaient élevées, que les conclusions n'étaient pas significativement influencées par cela et que cela sortait du champ de la présente étude.

### 3.3.1.3 Transport des matériaux

Des hypothèses concernant la distance parcourue par les matériaux entre l'usine de fabrication et le site de construction ainsi qu'entre le site et le lieu de traitement en fin de vie ont été faites. Le Tableau 3-2 regroupe ces hypothèses. La plus grande distance parcourue par le Bimagrip s'explique par le fait que ce matériau est fabriqué aux États-Unis et doit donc être importé.

**Tableau 3-2 Hypothèses de distance de transport selon le type de matériau**

Matériau	Distance Rurale [km]	
	Usine - Site	Site - FdV
Rural	250	250
Urbain	150	150
Bimagrip LS	3000	-

Mentionnons que le transport des matières premières jusqu'à l'usine est inclus dans les processus d'arrière-plan et représente des distances moyennes et génériques.

### 3.3.2 *Traitement des processus multifonctionnels*

La présence de processus multifonctionnels dans un système doit être traitée avec précaution puisque ceux-ci affectent la performance fonctionnelle globale du système et l'équivalence fonctionnelle des systèmes comparés. L'équivalence fonctionnelle est une condition nécessaire à la comparaison de ces derniers sur une même base.

Lorsqu'un processus est multifonctionnel (par exemple : il génère plus d'un produit ou qu'il participe au recyclage de matières résiduelles menant à la mise sur le marché de matières secondaires), il est nécessaire de répartir ses entrants et sortants entre ses différentes fonctions. Il s'agit en quelque sorte d'attribuer à chaque fonction sa part de responsabilité quant aux entrants et sortants du processus.

Dans le cas présent, les processus directement liés à la production et à l'utilisation des produits comparés ne présentent pas de caractère multifonctionnel. Par contre, certains matériaux des systèmes de produits sont considérés être recyclés en fin de vie. Ce recyclage constitue un processus multifonctionnel puisqu'il mène à la production de matières secondaires (acier, aluminium) en plus de fournir le traitement en fin de vie des matériaux des systèmes étudiés. Il y a donc non-équivalence fonctionnelle entre les systèmes et ces fonctions supplémentaires doivent être éliminées afin de pouvoir comparer les systèmes sur la base de la seule fonction définie par l'unité fonctionnelle.

Afin de traiter la multifonctionnalité du recyclage, l'approche recyclage en fin de vie a été priorisée. Cette approche consiste à faire l'extension des frontières du système afin d'inclure les processus affectés par la fonction de recyclage. Dans le cas présent, il est supposé que l'utilisateur de la matière secondaire issue du recyclage des produits évite d'utiliser de la matière primaire. Ceci correspond ainsi à donner au système étudié un crédit environnemental pour la production évitée de cette matière primaire (c'est-à-dire que cette dernière aura une contribution négative aux résultats d'indicateurs d'impacts et donc favorable au profil environnemental). Cette approche a été considérée pour chaque système à l'étude

(  
Figure 3-9).

---

#### Figure 3-9 Approche recyclage en fin de vie

Étant donné que le taux de recyclage n'est pas de 100% pour des raisons techniques et logistiques, la quantité de matière primaire évitée est modulée par différents taux. Le premier,  $\alpha$ , est le taux de collecte qui a lieu

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

directement sur le site. Selon les estimations de l'UNEP, 90% des matériaux des infrastructures seront recyclés à partir de 2050 (Reuter, 2013). Cette valeur a donc été considérée dans la modélisation. De plus, il faut également prendre en compte les rendements des procédés de tri ( $\eta_{tri}$ ) et de recyclage ( $\eta_{rec}$ ). Le Tableau 3-3 regroupe les valeurs utilisées pour l'analyse qui ont été tirées de la base de données d'inventaire *ecoinvent* v3.3 (Wernet et al., 2016).

Tableau 3-3 Rendements du tri et de recyclage utilisé

Matériaux	$\mu_{tri}$	$\mu_{rec}$
Acier	100%	89.5%
Aluminium	97%	80%

Également, il est possible de corriger la quantité de matière primaire évitée en prenant compte de la perte de qualité issue des procédés de recyclage et des réponses des marchés économiques à l'aide d'un taux  $\gamma$ . Toutefois, ce taux sera considéré égal à 100% dans cette étude faute de données fiables permettant de l'évaluer.

Dans le cas du traitement en fin de vie du bois, une approche similaire a été utilisée, mais la matière évitée n'est pas du bois vierge. En effet, le bois de construction en fin de vie au Québec est généralement acheté par des cimenteries, puis utilisé comme source d'énergie dans le four rotatif. Ainsi, le « recyclage » du bois en fin de vie est en fait une valorisation énergétique et permet d'éviter l'utilisation de combustibles fossiles qui auraient été brûlés par la cimenterie si elle n'avait pas eu accès à ce bois en fin de vie. Le taux de collecte de 90% a également été utilisé dans le cas du bois. La quantité de combustible fossile remplacé a été calculée selon un contenu énergétique du bois de 16 MJ / kg.

Finalement, il est important de rappeler que les autres matériaux considérés dans l'étude, tel que le béton, l'enrobé bitumineux et le Bimagrip LS ne sont pas recyclés, mais simplement enfouis. Il n'existe pas de multifonctionnalité dans le cas du procédé d'enfouissement.

### 3.3.3 Évaluation des impacts

La troisième phase de l'ACV est l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV). Cette étape permet de traduire l'inventaire, soit une liste de milliers d'émissions, en résultats d'indicateurs de catégories d'impacts à l'aide de facteur de caractérisation. Il existe plusieurs méthodes pour effectuer cette évaluation.

Dans notre cas, la méthode IMPACT 2002+ (Jolliet, Saadé, Crettaz, & Shaked, 2010), reconnue internationalement, a été choisie pour effectuer l'évaluation des impacts du cycle de vie des différents systèmes étudiés. L'agrégation des catégories d'impacts en quatre catégories de dommages fournit des résultats plus simples à comprendre et à interpréter, en plus de permettre une évaluation rapide des principaux enjeux environnementaux potentiels associés aux systèmes à l'étude. La Figure 3-10 montre l'agrégation faite par la méthode entre l'inventaire, les catégories d'impacts et les catégories de dommages.

---

**Figure 3-10 Catégories de dommage et catégories d'impacts de la méthode IMPACT 2002+**

Les catégories de dommage peuvent se résumer ainsi :

- Changement climatique : le potentiel de chaque gaz à effet de serre (GES) est calculé en kilogrammes de dioxyde de carbone équivalent (kg CO<sub>2</sub> éq.), basé sur les données sur le forçage radiatif infrarouge. La méthode IMPACT 2002+ évalue les effets potentiels des émissions sur une période de 500 ans.
- Qualité des écosystèmes : cette catégorie regroupe les impacts liés à la toxicité aquatique et terrestre, à l'acidification et à l'eutrophisation aquatique, à l'acidification et à la nutrification terrestre et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction d'espèces potentiellement disparues, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps (PDF\*m<sup>2</sup>\*an - *Potentially Disappeared Fraction of species*).
- Santé humaine : cette catégorie prend en compte les substances ayant des effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) et respiratoires, produisant des radiations ionisantes et qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone. Afin d'évaluer le facteur de dommage, la gravité de la maladie potentiellement causée par ces substances est exprimée en DALY - *Disabled Adjusted Life Years*, unité reflétant le dommage à la santé humaine.
- Ressources : cette catégorie prend en compte l'utilisation de ressources énergétiques non renouvelables et l'extraction de minéraux, quantifiés en mégajoules d'énergie (MJ).

Il est important de mentionner que les résultats de l'ÉICV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels. Il s'agit d'expressions

relatives (à l'unité fonctionnelle notamment) qui ne permettent pas de prédire les impacts finaux ou le risque sur les milieux récepteurs et le dépassement des normes ou marges de sécurité.

Une deuxième évaluation basée sur la méthode ReCiPe (Goedkoop, 2013) a été réalisée en analyse de sensibilité afin de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation avait une influence significative sur les conclusions et donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT 2002+.

### **3.3.4 Interprétation**

Cette dernière phase de l'ACV permet de discuter les résultats obtenus suite à l'ÉICV et de les mettre en perspective. Elle inclut une comparaison des systèmes en milieu rural et une en milieu urbain.

#### **3.3.4.1 Évaluation de la qualité de données**

La fiabilité des résultats et des conclusions de la modélisation du cycle de vie dépend de la qualité des données d'inventaire. Il est important de veiller à ce que les informations répondent à certaines exigences conformes aux objectifs de l'étude.

L'évaluation de la qualité d'une donnée devrait refléter la validité de celle-ci par rapport à sa représentativité quant à l'âge, la provenance géographique et la performance technologique. Ainsi, les données utilisées devraient être représentatives :

- de la période définie par l'unité fonctionnelle, soit de 2018 à 2093 (75 ans) ;
- du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les systèmes à l'étude : des lieux de production des matières premières, du lieu de fabrication et du lieu de fin de vie (au Québec);
- des caractéristiques technologiques des processus de fabrication des matériaux et des traitements en fin de vie.

Bien qu'aucune méthode particulière ne soit actuellement prescrite par l'ISO, deux critères ayant une influence sur la qualité de l'inventaire ont été choisis pour évaluer les données :

- fiabilité : concerne les sources, les méthodes d'acquisition et les procédures de vérification des données. Une donnée jugée fiable est une donnée vérifiée et mesurée sur le terrain. Ce critère se réfère principalement à la quantification des flux ;
- représentativité : traite des corrélations géographique et technologique. Est-ce que l'ensemble des données reflète la réalité? Une donnée est jugée représentative lorsque la technologie est en relation directe avec le champ de l'étude. Ce critère se rapporte principalement au choix des processus servant à modéliser le système.

En parallèle à l'évaluation de la qualité des données, une estimation de la contribution des processus (c'est-à-dire dans quelle mesure le processus modélisé contribue au score d'impact global du système étudié) a été effectuée. Des données de basse qualité peuvent être très appropriées dans le cas d'un processus dont la contribution est minimale. Au contraire,

des données de haute qualité devraient être collectées pour les processus ayant une grande influence sur les conclusions de l'étude.

Une description plus détaillée des critères d'évaluations et l'évaluation de la qualité des données sont présentées à l'annexe ANNEXE D .

#### **3.3.4.2 *Analyse de cohérence et de complétude***

Tout au long de l'étude, une attention a été portée à ce que les systèmes soient représentés d'une manière compatible avec l'objectif et la portée de l'étude. En outre, lors de la collecte des données et de la définition et de la modélisation des systèmes, les hypothèses et les méthodes ont été appliquées de manière similaire à tous les systèmes. Il existe une cohérence entre les systèmes étudiés, en ce qui concerne les sources de données, leur précision et leur représentativité technologique, temporelle et géographique.

La complétude a été assurée grâce à une définition attentive des frontières du(es) système(s) analysé(s). Lorsque des données étaient manquantes, des analyses de sensibilité ont été effectuées pour vérifier l'effet des hypothèses et des approximations employées.

#### **3.3.4.3 *Analyse de sensibilités***

Afin d'assurer une analyse complète et approfondie des résultats de l'ÉICV, des analyses de sensibilité et de scénarios ont été réalisées à partir des principaux processus/paramètres contributeurs identifiés.

- La méthode d'évaluation des impacts peut grandement influencer les résultats. Pour cette raison, une analyse utilisant la méthode ReCiPe a été effectuée afin de comparer les résultats à ceux générés avec la méthode IMPACT 2002+.
- Pour les systèmes de base, il a été considéré que les pièces en aluminium et en acier ont été produites au Québec. Or, il se peut que la production des extrusions des panneaux pour la production du platelage se fasse aux États-Unis comme dans le cas du pont de Saint-Ambroise (Association de l'aluminium du Canada, 2018). Une analyse a donc été réalisée pour évaluer l'effet de la provenance des matériaux sur les résultats.
- Les performances environnementales peuvent varier considérablement en fonction du taux de recyclage des matériaux.

#### **3.3.5 *Logiciel utilisé***

Le logiciel OpenLCA 1.7.2, développé par la société GreenDelta (<https://www.greendelta.com/>) a été utilisé pour faire la modélisation des systèmes et réaliser le calcul de l'inventaire et des impacts du cycle de vie.

### **3.4 Collecte de données**

L'objectif de cette section est de présenter toutes les données et hypothèses qui ont été collectées et qui seront utilisées pour la réalisation de l'analyse du coût du cycle de vie. La collecte de données s'est avérée être un long processus itératif afin de déterminer quelles étaient les données nécessaires et surtout celles qui requéraient une attention

particulière et devaient être affinées. En effet, au fil de la génération de résultats préliminaires, des paramètres que l'on aurait pu penser secondaires de prime abord, se sont avérés être ceux conditionnant complètement le résultat final de l'étude. L'étape de collecte de données fut ainsi continuellement affinée et ajustée aux besoins identifiés.

### **3.4.1 Localisation des ponts et données du site**

Un choix a été fait en collaboration avec l'équipe du MTQ afin de déterminer un emplacement des ponts spécifique pour chacun des systèmes afin d'être en mesure de calculer les coûts liés aux détournements du trafic. En effet pour calculer ces coûts, il est nécessaire de connaître les quatre paramètres suivants :

- longueur du détour
- vitesse pendant le détour
- vitesse normale (si l'on circule sur le pont)
- DJMA

Ainsi, pour l'étude déterministe deux ponts spécifiques sont étudiés :

- P-18823 pour le milieu rural
- P-17683 pour le milieu urbain

Leurs caractéristiques, tirées des fiches d'inventaire, sont les suivantes :

- P-18823
  - o longueur du détour : 7 km
  - o vitesse pendant le détour : 80 km/h
  - o vitesse normale : 70 km/h
  - o DJMA : 200
  - o DJMA<sub>C</sub> : 14 (7 %)
- P-17683
  - o longueur de détour : 25 km
  - o vitesse pendant le détour : 50 km/h
  - o vitesse normale : 50 km/h
  - o DJMA : 2500
  - o DJMA<sub>C</sub> = 175 (7 %)

Lorsque les résultats préliminaires pour l'étude ont été générés, il est apparu que les paramètres susmentionnés sont particulièrement influents, voire conditionnent complètement les résultats de l'étude. En effet, dans les systèmes en milieu urbain, les coûts liés aux détournements du trafic représentaient plus de 90 % du coût du cycle de vie total, écrasant ainsi complètement les coûts dits directs. Ces coûts liés aux détournements du trafic étaient très sensibles à la longueur du détour et au DJMA puisque directement proportionnels à ces deux paramètres potentiellement très élevés et très variables.

Le résultat de l'analyse du coût du cycle de vie est ainsi très dépendant du choix de ces paramètres et l'on serait incapable d'en dégager une tendance globale. Il est nécessaire d'approfondir l'analyse des résultats et d'identifier dans quel contexte de trafic l'option aluminium est préférable ou non.

### **3.4.2 Variation des DJMA dans le temps**

Le DJMA peut avoir une forte influence sur les résultats des analyses étant donné que les impacts associés aux détournements du trafic dus aux

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

travaux de construction et d'entretien sont pris en compte. Les unités fonctionnelles précédemment statué indique les DJMA initiaux en milieu rural et urbain.

Puisqu'on observe une augmentation générale des DJMA sur l'ensemble du réseau routier, celui de l'analyse sera également en hausse tout au long des 75 ans que durent les analyses suivant l'équation suivante :

$$(1 + h)^{(x_i - 2018)}$$

avec  $x_i$ , année de l'opération et  $h$  le taux de hausse du DJMA. Les statistiques de la SAAQ indiquent une hausse moyenne de 2,1% pendant les 38 dernières années. Cependant au vu de l'horizon temporel lointain et incertain de la présente étude, ce taux a été choisi à 1%.

### **3.4.3 Scénarios d'entretien**

#### **3.4.3.1 Tablier acier-bois**

Le scénario d'entretien du tablier acier-bois a été déterminé lors de discussions techniques avec le comité de suivi du projet R787.1 et différents intervenants experts du MTQ.

Pour le tablier acier-bois 5 types d'opérations seront considérés :

- remplacement de la surface de roulement (i.e. madriers)
- remplacement du platelage dans son intégralité (i.e. glissières, chasse-roues, madriers et traverses)
- remplacement du tablier dans son intégralité (i.e. glissières, chasse-roues, madriers, traverses et charpente d'acier)
- peinture de la charpente d'acier

Pour chacune des opérations, excepté le peinture de la charpente d'acier, la circulation sera entièrement fermée, car la largeur carrossable du tablier ne permet pas de maintenir de manière sécuritaire la circulation sur une seule voie. De plus, il est recommandé dans le MCS de privilégier une fermeture de pont lorsqu'une déviation est possible (MTQ, 2018e).

Le calendrier des opérations d'entretien et de remplacement pour le tablier acier-bois est présenté dans le Tableau 3-4.

**Tableau 3-4 Calendrier des opérations d'entretien et de remplacement pour le tablier acier-bois**

Éléments	Années															
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
<b>Madriers</b>				X			X			X			X			
<b>Traverses</b>							X			X						
<b>Chasse-roues</b>							X			X						
<b>Glissières</b>							X			X						
<b>Poutres</b>						X				X					X	

Les durées des travaux de construction et d'entretien ont été déterminées lors de discussions techniques avec le comité de suivi du projet R787.1 de

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

différents intervenants experts du MTQ (chargés de la reconstruction du tablier acier-bois) et sur la base des échéanciers de travaux disponibles. Le scénario d'entretien (opération, fréquence, fermeture, durée) pour le tablier acier-bois est résumé dans le Tableau 3-5.

**Tableau 3-5 Scénario d'entretien pour le tablier acier-bois**

<b>Opération</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Fermeture de route complète</b>	<b>Durée de l'opération</b>
Construction tablier		Oui	7 jours
Remplacement surface de roulement	15 ans	Oui	2 jours
Remplacement platelage	30 ans	Oui	4 jours
Reconstruction tablier	45 ans	Oui	8 jours
Peinturage charpente d'acier	25 ans	Non	

**3.4.3.2 Tablier à platelage en aluminium (milieu rural et milieu urbain)**

Le scénario d'entretien pour les ponts à platelage en aluminium, ainsi que les durées des travaux de construction et d'entretien, ont été déterminés au moyen de discussions techniques au sein du groupe de recherche du projet à l'Université Laval, en se basant sur :

- recherches bibliographiques sur la durabilité des ouvrages utilisant de l'aluminium en tant que matériau structural
- échanges avec des industriels pour obtenir des retours sur la durabilité de leur produits (Bimagrip)
- expérience de l'équipe de recherche acquise lors de projets antérieurs

Il en est ressorti que la structure en aluminium en tant que telle ne nécessiterait que peu d'entretien tout comme la charpente d'acier qui est protégée par l'imperméabilité du platelage.

Ainsi, pour les tabliers à platelage en aluminium, 3 opérations d'entretien seront considérées :

- remplacement de la surface de roulement (Bimagrip)
- remplacement des boulons pour la connexion poutres/platelage et des brides (dessous du platelage)
  - o boulons aveugles Hollo-Bolt LHBM10#2
  - o boulons aveugles Hollo-Bolt LHBM20#2
- remplacement des boulons intra-panneaux (dessus du platelage)
  - o boulons aveugles Hollo-Bolt LHBCSKM10#1

Pour chacune des opérations, excepté le remplacement des boulons situés sous le platelage, la circulation sera entièrement fermée tel que recommandé par le MCS (MTQ, 2018e). De surcroît, la largeur carrossable du tablier ne permet pas de maintenir de manière sécuritaire la circulation sur une seule voie.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

Le calendrier des opérations d'entretien et de remplacement pour les tabliers à platelage en aluminium est présenté dans le Tableau 3-6.

**Tableau 3-6 Calendrier des opérations d'entretien et de remplacement des tabliers à platelage en aluminium sur poutres d'acier**

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

Les durées des travaux pour les ponts à platelage en aluminium ont été déterminés au moyen de discussions techniques au sein du groupe de recherche du projet à l'Université Laval, en se basant sur :

- avancement des travaux de recherche du projet R786.1
- échanges avec des industriels pour obtenir des temps de pose (Bimagrip)
- expérience de l'équipe de recherche acquise lors de projets antérieurs

Les durées des opérations de construction et d'entretien sont les suivantes :

- 10 jours de construction :
  - o 3 jours pour la pose du platelage
    - 1 jour pose des panneaux
    - 1 jour boulonnage
    - 1 jour ajustement
  - o 1 jour pour la pose du Bimagrip
  - o 2 jours pour la pose des glissières
  - o 2 jours pour la charpente d'acier
  - o 2 jours de marge
- 5 jours pour le remplacement des boulons du dessus
- 2 jours pour le remplacement du Bimagrip

L'hypothèse du temps de construction a été évaluée de manière prudente en ajoutant 2 jours de marge au vu du manque d'expérience présentement dans l'installation de platelage en aluminium.

Ces temps de travaux pourront être affinés par l'équipe de recherche de l'Université Laval dans le cadre du projet R786.1, lorsqu'une procédure d'installation plus détaillée sera établie.

Le scénario d'entretien (opération, fréquence, fermeture, durée) pour les tabliers à platelage en aluminium est résumé dans le Tableau 3-7.

**Tableau 3-7 Scénario d'entretien pour les tabliers à platelage en aluminium sur poutres d'acier**

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

<b>Opération</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Fermeture de route complète</b>	<b>Durée de l'opération</b>
Construction tablier	-	Oui vs Non	10 jours
Remplacement surface de roulement	25 ans	Oui	1 jour
Remplacement boulons/brides dessous platelage	25 ans	Non	-
Remplacement boulons dessus platelage	50 ans	Oui	5 jours
Peinturage charpente d'acier	-	-	-

**3.4.3.3 Tablier à dalle de béton sur poutres d'acier**

Le scénario d'entretien du tablier à dalle de béton sur poutres d'acier a été déterminé lors de discussions techniques avec le comité de suivi du projet R787.1 et différents intervenants experts du MTQ.

Pour le tablier à dalle de béton sur poutres d'acier 5 opérations seront considérées :

- resurfaçage de l'enrobé bitumineux par ajout d'enrobé à chaud et avec planage
- remplacement de la surface de roulement (i.e. enrobé bitumineux et membrane d'étanchéité) associée à une réparation en surface de la dalle (20% pour un pont à dalle sur poutres à fort débit de circulation)
- remplacement de la dalle (glissières, chasse-roues, enrobé et membrane)
- peinture de la charpente d'acier
- protection des surfaces de béton avec enduit de surface et imperméabilisation (chasse-roues et dalle en porte-à-faux)

Pour chacune des opérations, excepté le peinture de la charpente d'acier et la protection des surfaces de béton, la circulation sera entièrement fermée, car dans la pratique, sur ce type d'ouvrage, la fermeture de route est recommandée et donc privilégiée à une circulation alternée.

Le calendrier des opérations d'entretien et de remplacement pour le tablier à dalle de béton sur poutres d'acier est présenté dans le Tableau 3-8.

**Tableau 3-8 Calendrier des opérations d'entretien et de remplacement pour le tablier à dalle de béton sur poutres d'acier**

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

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

Les durées des opérations ont été déterminées à partir d'échéancier de reconstructions de ponts à dalle de béton sur poutres d'acier, des procédures et temps à respecter dans le CCDG (MTQ, 2018a) et de discussions techniques avec les le comité de suivi du projet R787.1 et des différents intervenants experts du MTQ.

Les durées des opérations de construction et d'entretien sont les suivantes :

- 42 jours de construction
  - o 2 jours pour la charpente d'acier
  - o 19 jours pour coffrage/armature/bétonnage/nettoyage de la dalle et des chasse-roues
  - o 7 jours pour la cure de la dalle de béton
  - o 7 jours pour le séchage de la dalle de béton
  - o 1 jour pour les travaux de finition de béton durci
  - o 2 jours pour la pose de la glissière
  - o 1 jour pour la mise en place du liant d'accroche et de la membrane d'étanchéité
  - o 1 jour pour la pose de l'enrobé bitumineux
- 2 jours de resurfaçage
  - o 1 jour pour la découpe
  - o 1 jour pour la pose
- 21 jours de remplacement de l'enrobé avec réparation de 20 % de la dalle
  - o 1 jour de décapage
  - o 3 jours de démolition des surfaces endommagées, armatures et nouveau béton
  - o 7 jours de cure du nouveau béton
  - o 7 jours de séchage
  - o 1 jour pour le liant d'accroche et la membrane d'étanchéité
  - o 1 jour pour la pose du nouvel enrobé
- 55 jours de reconstruction de la dalle de béton
  - o 13 jours de démolition (opération délicate pour ne pas endommager la charpente d'acier, au moins aussi longue que le coffrage et la pose de béton d'une nouvelle dalle)
  - o 42 jours de construction
- Le scénario d'entretien (opération, fréquence, fermeture, durée) pour le tablier à dalle de béton sur poutres d'acier est résumé dans le Tableau 3-9.

**Tableau 3-9 Scénario d'entretien pour le tablier à dalle de béton sur poutres d'acier**

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

<b>Opération</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Fermeture de route complète</b>	<b>Durée de l'opération</b>
<b>Construction tablier</b>	-	Oui vs Non	42 jours
<b>Resurfaçage de l'enrobé</b>	12,5 ans	Oui	2 jours
<b>Remplacement de l'enrobé + réparation dalle</b>	25 ans	Oui	21 jours
<b>Remplacement dalle</b>	50 ans	Oui	55 jours
<b>Protection surfaces de béton</b>	10 ans	Non	-
<b>Peinturage charpente d'acier</b>	50 ans	Non	-

### **3.4.4 Données de coûts de construction et d'entretien**

Les données ont été collectées après un long processus itératif où des résultats préliminaires furent générés afin d'identifier les points sensibles de l'étude, c'est-à-dire les données clés qui affectent grandement le résultat de l'étude et donc d'améliorer la qualité des données utilisées.

Les coûts de construction et d'entretien directs sont tirés des listes de prix suggérés du MTQ (MTQ, 2018b, 2018d, 2018c) :

- liste des prix suggérés 2018 – Ponts acier-bois
- liste des prix suggérés 2018 – Construction et réparation
- liste des prix suggérés 2018 – Entretien préventif

Les données utilisées correspondent aux prix suggérés directement indiqués sur les listes prix. Le détail de ces données se trouve dans le complément du rapport d'étape 3 du projet de recherche R787.1. (Bayan et al., 2018).

### **3.4.5 Données environnementales**

Les données requises pour l'analyse environnementale concernent les matières premières utilisées, l'énergie consommée ainsi que les rejets générés à chaque étape du cycle de vie.

Comme cette étude a pour but de fournir des informations environnementales quant au cycle de vie complet d'un tablier de pont plutôt générique, elle a été réalisée à partir de données secondaires, c-à-d. des données génériques ou théoriques issues de bases de données d'inventaire commerciales, d'informations transmises par le MTQ, de rapports d'études divers, d'avis d'experts ou d'autres sources publiées.

Les données d'avant-plan, comme les quantités de matériaux nécessaires à la construction et à l'entretien du pont, sont basées sur les mêmes données que l'analyse économique pour assurer une cohérence entre les deux études.

#### **3.4.5.1 Base de données utilisée**

La modélisation des processus a été réalisée au moyen de données secondaires tirées de la base de données d'inventaire du cycle de vie *ecoinvent* version 3.3 *cut-off* ([www.ecoinvent.org/](http://www.ecoinvent.org/)). Cette base de données est particulièrement reconnue par la communauté scientifique

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

internationale, car elle surpasse de loin les autres bases de données commerciales tant du point de vue quantitatif (nombre de processus inclus) que qualitatif (qualité des procédés de validation, complétude des données, etc.).

**3.4.5.2 Adaptation des processus**

Les flux élémentaires associés à un processus varient d'un endroit à un autre par la différence des technologies utilisées, de la provenance de l'électricité utilisée par le procédé, des distances de transport nécessaires, etc. Pour avoir un portrait le plus juste possible des systèmes étudiés, il est nécessaire d'adapter certains entrants de procédés génériques selon les spécificités connues. De cette façon, les processus suivants ont été adaptés à la réalité québécoise par le changement de la provenance de l'électricité et du gaz naturel entrants :

- Production d'acier
- Laminage d'acier
- Travail moyen d'acier
- Traitement de surface
- Soudure d'acier
- Tri acier - fdv
- Recyclage acier
- Production d'aluminium
- Laminage d'aluminium
- Tri aluminium - fdv
- Recyclage aluminium
- Production de béton
- Production de bois
- Récupération d'énergie

**3.4.5.3 Création de processus**

Certains flux ont dû être créés puisqu'ils sont absents de la base de données utilisée. C'est le cas du Bimagrip LS et de la peinture. La peinture a ainsi été modélisée comme un mélange de peinture alkyde et de solvant organique comme le résume le Tableau 3-10. Les noms exacts des flux d'ecoinvent3.3 (Wernet et al., 2016), en anglais, ont été conservés dans le tableau pour assurer une reproductibilité et par souci de transparence.

**Tableau 3-10 Modélisation de la peinture (pour 1 kg)**

Flux	Qté	
alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state (traduction libre: peinture alkyde, sans solvant, en solution 60%)	0.60	kg
solvent, organic (traduction libre : solvant organique)	0.40	kg

Pour ce qui est du Bimagrip, les informations ont été trouvées sur le site internet du fabricant. Le Bimagrip est un mélange de résine, d'agrégat et d'un adhésif de polyuréthane. La modélisation a été faite selon les informations présentées au Tableau 3-11. Encore une fois, les noms exacts des flux (en anglais) ont été conservés dans le tableau.

**Tableau 3-11 Modélisation du Bimagrip (pour 1 kg)**

Flux	Qté	
gravel production, crushed (Traduction libre: production de gravier, concassé)	0.31	kg

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

<i>polymer foaming</i> (Traduction libre: polymère moussant)	0.31	kg
<i>epoxy resin production liquid</i> (Traduction libre: production de résine epoxy liquide)	0.38	kg

### 3.4.5.4 Omission dans le modèle environnemental

Alors que les données de coûts sont assez agrégées, la nature de l'ACV fait en sorte que l'on doit construire les systèmes de produits processus par processus ce qui demande une grande quantité de données. Ceci fait en sorte que certains flux, qui ont été considérés dans l'ACCV ont été négligés dans l'ACV faute de données. La liste suivante indique ces omissions :

- Brides du platelage en aluminium
- Membrane d'étanchéité de la dalle en béton
- Activités de nettoyage de la dalle en béton
- Drains en acier de la dalle en béton

Ces omissions font partie des limites de l'ACV bien que l'on peut supposer que la contribution de ces éléments aux résultats d'indicateurs environnementaux soit négligeable.

## 3.5 Monétarisation

La monétarisation consiste à convertir des mesures d'impact environnemental en valeur économique afin d'identifier la valeur de ces biens sans marché réel (Pizzol, Weidema, Brandão, & Osset, 2015).

D'un point de vue éthique, il peut être délicat de monétariser la valeur d'un écosystème, d'une vie humaine, d'un paysage, etc. Toutefois, il faut comprendre qu'un tel procédé ne consiste pas à évaluer la valeur monétaire absolu de l'environnement. La monétarisation concerne plutôt, l'évaluation monétaire d'un changement marginal d'une quantité ou de la qualité d'un bien sans marché économique (Pizzol et al., 2015). De ce fait, on mesure plutôt la propension à payer ou la propension à être compensé pour un changement. Par exemple, l'évaluation absolu de la valeur d'une vie humaine n'est pas l'objectif de la monétarisation, mais plutôt la valeur que les individus soient prêts à payer ou à être compensés pour un petit changement de l'espérance de vie ou de la qualité de vie. Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluer (Pizzol et al., 2015).

Une certaine monétarisation d'impact a déjà été prise en compte dans l'ACCV, lorsque les coûts reliés à la pollution du détournement de trafic ont été considérés. Toutefois, la méthode utilisée ne couvre qu'une faible partie des types de polluants en plus de couvrir qu'une seule étape du cycle de vie du pont. Des calculs de monétarisation supplémentaires sont nécessaires, afin de considérer l'entièreté du cycle de vie des systèmes étudiés.

Deux approches différentes seront utilisées et leurs résultats comparés. Cela permettra d'évaluer la pertinence et les limites de la monétarisation dans ce genre d'analyse des coûts.

Il est pertinent de mentionner que les facteurs de conversion utilisés en monétarisation ne sont généralement pas actualisés. Ainsi, la mise en commun des coûts actualisés de l'ACCV et des coûts environnementaux non actualisés sera faite malgré tout.

### 3.5.1 Polluants atmosphériques et gaz à effet de serre

La première approche s'inscrit directement dans la démarche conseillée par le Guide avantages-coûts MTQ (2016b). En effet, le guide indique de monétariser les émissions de différents polluants atmosphériques selon différents prix comme le montre le Tableau 3-12.

**Tableau 3-12 Coûts des polluants atmosphériques**

	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>SOx</b>	<b>PM<sub>2,5</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>
\$/tonne métrique	437 \$	2008 \$	14 786 \$	17 151 \$	213 696 \$	85 482 \$

Toujours selon ce guide, les coûts relatifs aux émissions de gaz à effet de serre (GES) doivent également être pris en compte. Par contre, le prix à considérer varie dans le temps. La valeur d'une tonne de CO<sub>2</sub> augmente donc linéairement de 82,79\$ en 2015 et 334,66 \$ en 2093 (Voir Tableau B-7 en annexe).

La première approche utilise donc ces taux pour monétariser les impacts reliés aux émissions de ces polluants atmosphériques et de GES sur l'ensemble des émissions des systèmes et non seulement sur ceux engendrés par le détournement du trafic.

Pour ce faire, la quantité de polluants atmosphériques émis a été obtenue à l'aide de l'inventaire de l'ACV. Ces quantités ont ensuite été multipliées par les coûts de polluants, puis additionnées aux résultats de l'ACCV.

### 3.5.2 Impacts environnementaux

La deuxième approche de monétarisation utilisée consiste à monétariser directement les résultats d'ACV obtenus. La méthode utilisée, Stepwise2006 (Weidema, 2009), fournit directement des facteurs de monétarisation par catégorie de dommage.

Les catégories de dommages utilisées par la méthode Stepwise2006 sont les mêmes que celles de la méthode IMPACT 2002+ , sauf pour la catégorie de dommage *Ressources*, exclue de l'étape de monétarisation puisqu'elle n'est pas prise en compte par la méthode Stepwise2006.

L' unité utilisée par la méthode Stepwise2006 pour la catégorie de dommage *Qualité des écosystèmes* (BAHY) a dû être convertie en PDF.m<sup>2</sup>.an, l'unité utilisée par IMPACT 2002+.

Finalement, puisque les facteurs de monétarisation de la méthode Stepwise2006 sont en euro de l'année 2003, un taux de conversion de 1.5 \$/euro a été utilisé.

Le Tableau 3-13 regroupe les facteurs de monétarisation utilisés pour la deuxième approche de monétarisation de l'étude.

**Tableau 3-13 Facteurs de monétarisation de la méthode Stepwise2006  
(convertis en \$)**

<b>Catégorie de dommage</b>	<b>Facteur de monétarisation</b>	
Changement climatique	0,1245	\$ / kg éq. CO <sub>2</sub>
Qualité des écosystèmes	0,21	\$ / PDF.m <sup>2</sup> .an

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

Santé humaine	111000	\$ / DALY
---------------	--------	-----------

## 4. RÉSULTATS

### 4.1 Analyse comparative – milieu rural

Les résultats comparatifs pour les deux types de tabliers de ponts sont présentés à la Figure 4-1. A titre de rappel, le cas particulier étudié implique un DJMA de 200 avec 7% de camions sur deux voies et une longueur du détour de 7 km.

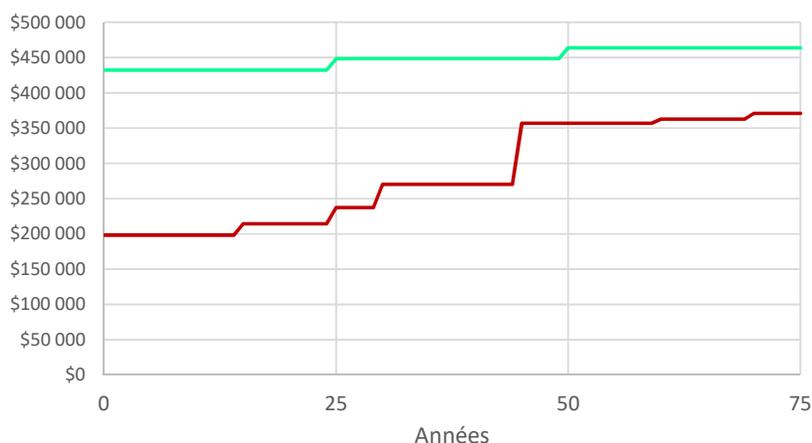


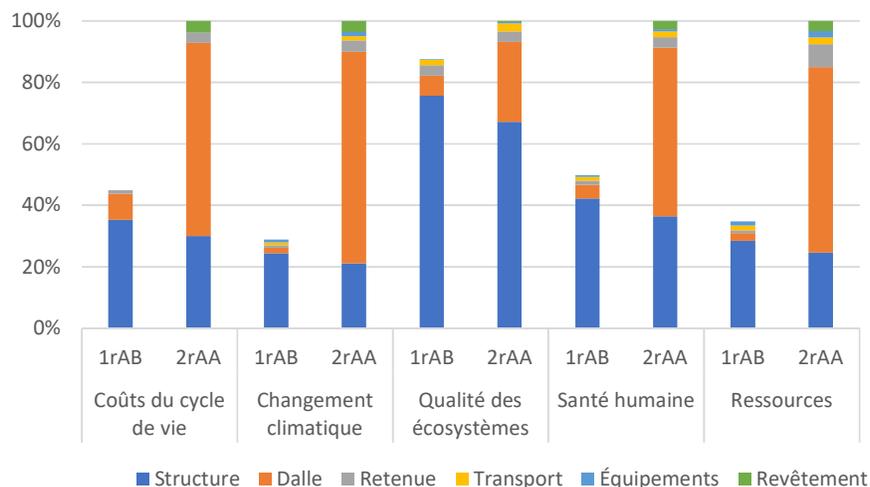
Figure 4-1 Résultats comparatifs de l'ACCV en milieu rural

On constate que le coût initial de la construction du tablier à platelage en aluminium (2rAA) est grandement supérieur à celui acier-bois (1rAB). Le coût total, observé après 75 ans, est toujours supérieur, bien que les coûts d'entretien soient plus faibles sur la période de 75 ans considérée.

L'analyse des contributions des différents éléments des systèmes comparés pour chaque indicateur, soit le coût du cycle de vie et les 4 indicateurs de l'ACV et les 4 indicateurs environnementaux, permet de mieux comprendre les systèmes. Une telle analyse de contribution sera faite pour chacun des périmètres de notre étude, ce qui permet de comprendre l'évolution des conclusions selon les éléments pris en compte.

La Figure 4-2 montre les contributions relatives des éléments des systèmes au coût du cycle de vie et au profil environnemental pour les deux types de ponts selon le périmètre 1, c'est-à-dire, qui ne couvre que l'étape de construction initiale (éléments présentés : structure en acier, dalle, retenue, transport des matériaux, équipements et revêtement). Les résultats sont normalisés par indicateur par rapport au résultat total des deux systèmes le plus élevé (qui devient 100%) ; les unités des indicateurs étant différentes, il est ainsi possible de présenter les résultats pour tous les indicateurs sur une même figure. On remarque que pour chacun des indicateurs, autant monétaire qu'environnementaux, le pont à tablier à platelage en aluminium est celui avec le coût du cycle de vie et les résultats d'indicateurs environnementaux les plus élevés.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

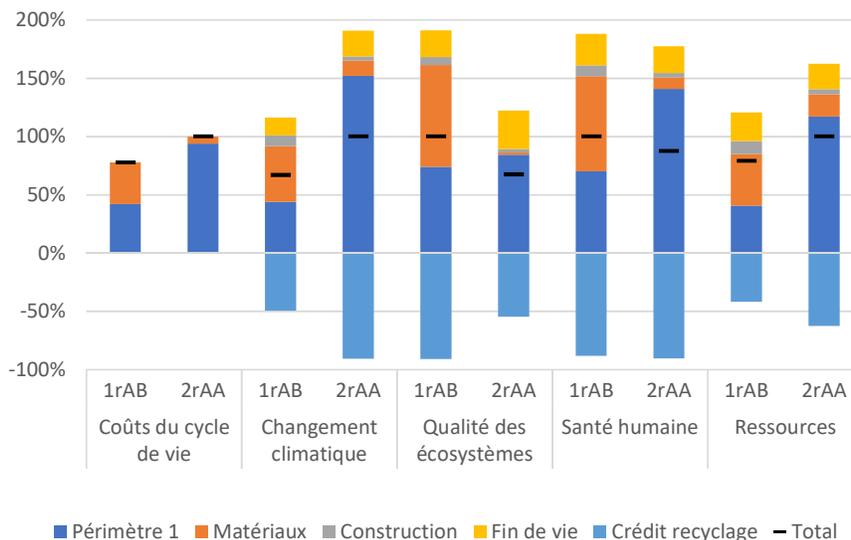


**Figure 4-2 Analyse de contribution du milieu rural selon le périmètre 1**

La structure en acier contribue significativement au total pour chacun des indicateurs. Cela s'explique par la grande quantité d'acier nécessaire comparativement aux autres matériaux. La dalle du platelage en aluminium est beaucoup plus dispendieuse et montre des résultats d'indicateurs environnementaux plus élevés que celle en bois. Les autres éléments des tabliers tels que le système de retenue et le revêtement, le transport des matériaux et les équipements pour les travaux de construction ont des contributions beaucoup plus faibles aux résultats. Il est tout de même pertinent d'ajouter que le Bimagrip, le revêtement utilisé pour le platelage en aluminium, ne représente que 3% du coût total.

Les résultats selon le périmètre 2, c'est-à-dire en ajoutant les matériaux et équipements pour les travaux d'entretien, et la fin de vie des matériaux des ponts (incluant le crédit pour recyclage) sont présentés à la Figure 4-3.

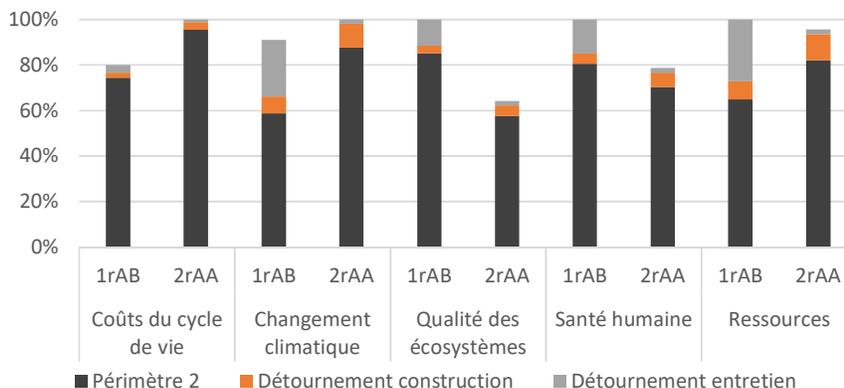
**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 4-3 Analyse de contribution du milieu rural selon le périmètre 2**

Le coût du cycle de vie reste encore plus élevé pour le pont à tablier à platelage en aluminium, bien que les coûts d'entretien soient nettement plus bas pour celui-ci que ceux pour le pont à tablier acier-bois. Au niveau des indicateurs environnementaux, les crédits associés au recyclage des matériaux des ponts en fin de vie ont une grande contribution aux résultats. On remarque une inversion des conclusions pour les catégories de dommages *Qualité des écosystèmes* et *Santé humaine*. En effet, la contribution de la production des matériaux pour la reconstruction du tablier acier-bois après 45 ans est telle que le total surpasse celui pour le pont à tablier à platelage en aluminium.

Finalement, les résultats selon le périmètre 3, c'est-à-dire en ajoutant les détournements du trafic pour la construction initiale et l'entretien sur la période de 75 ans considérée, sont montrés à la Figure 4-4.



**Figure 4-4 Analyse de contribution du milieu rural selon le périmètre 3**

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Dans ce cas précis en milieu rural, les contributions des véhicules détournés ne représentent pas plus de 35% du total pour tous les indicateurs. Ainsi, en prenant en compte l'entièreté du cycle de vie, le pont à tablier acier-bois est préférable dans ce contexte à celui à platelage en aluminium au niveau du coût du cycle de vie. Du point de vue environnemental, il n'est pas possible de déterminer clairement quel pont privilégier étant donné que le pont à tablier acier-bois est préférable pour les catégories *Changement climatique* et *Ressources*, mais pire pour *Qualité des écosystèmes* et *Santé humaine*.

### 4.2 Analyse comparative – milieu urbain

Les résultats de la comparaison entre le tablier à dalle de béton et celui à platelage en aluminium sur l'entièreté du cycle de vie incluant le détournement du trafic sont montrés à la Figure 4-5. Ce cas spécifique représente un cas réel de pont avec un détour de 25 km et un DJMA de 2500 dont 7% camion.

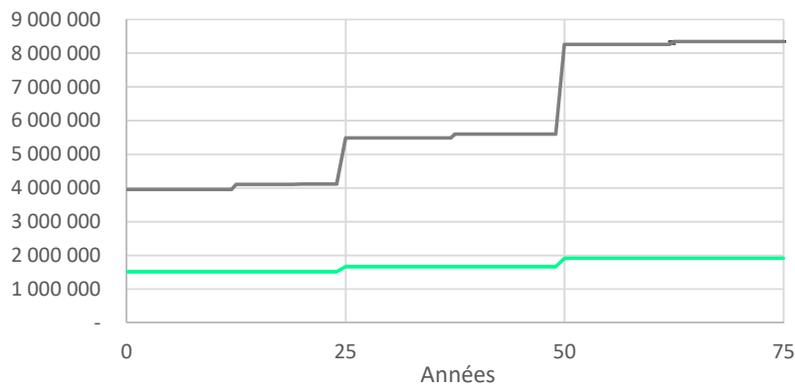
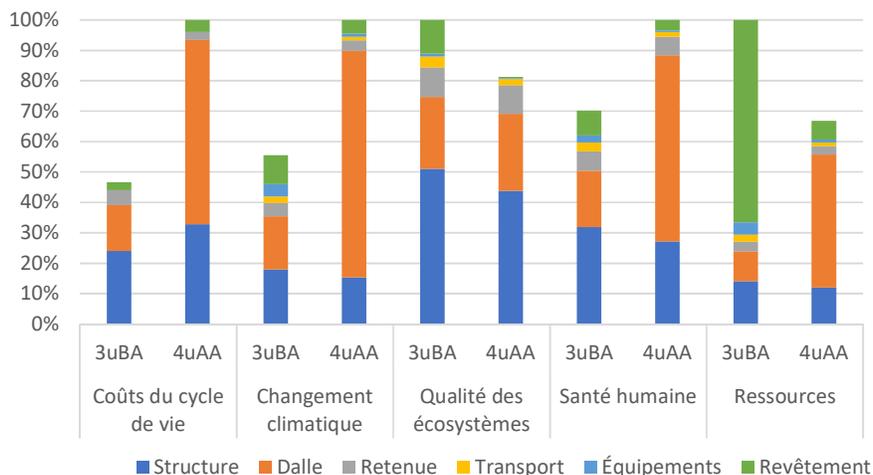


Figure 4-5 Résultats comparatifs de l'ACCV en milieu urbain

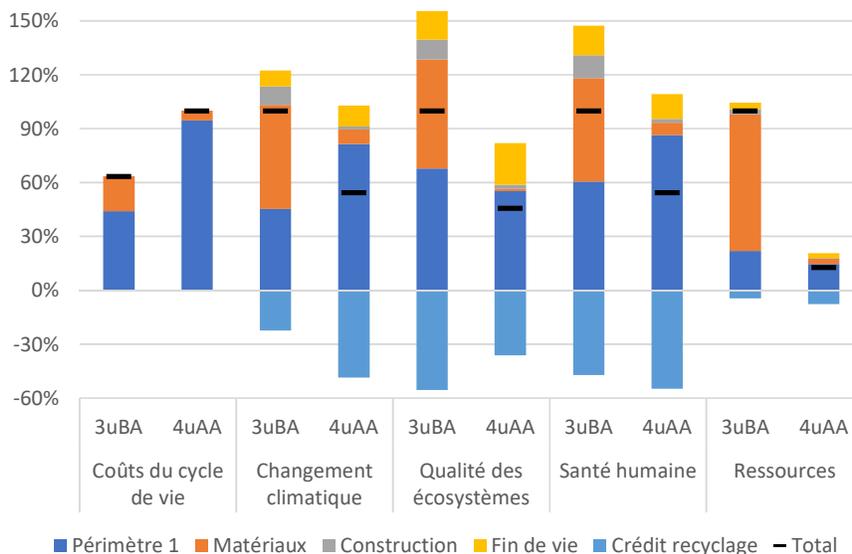
Le pont à tablier à platelage en aluminium est moins dispendieux que celui à tablier à dalle de béton dès l'année 0, c.-à-d. dès la construction. Cet écart s'explique par les coûts associés au détournement de trafic dû à la construction qui est beaucoup plus longue dans le cas du pont acier-béton. La Figure 4-6, qui combine les résultats comparatifs de l'ACCV et de l'ACV selon le périmètre 1, c'est-à-dire seulement les étapes de construction initiale sans détournement de trafic, montre que le pont à tablier à dalle de béton est moins cher selon ces frontières. En ce qui a trait aux indicateurs environnementaux, cette option est préférable pour les catégories *Changement climatique* et *Santé humaine* alors qu'elle est pire pour *Qualité des écosystèmes* et *Ressources*, faisant en sorte qu'il n'est pas possible de tirer des conclusions environnementales claires. La structure en acier ainsi que la dalle – le platelage en aluminium et la dalle de béton – contribue majoritairement au coût du cycle de vie et aux résultats d'indicateurs environnementaux. A noter que le revêtement en bitume du tablier à dalle de béton contribue majoritairement à la catégorie *Ressources*.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 4-6 Analyse de contribution du milieu urbain selon le périmètre 1**

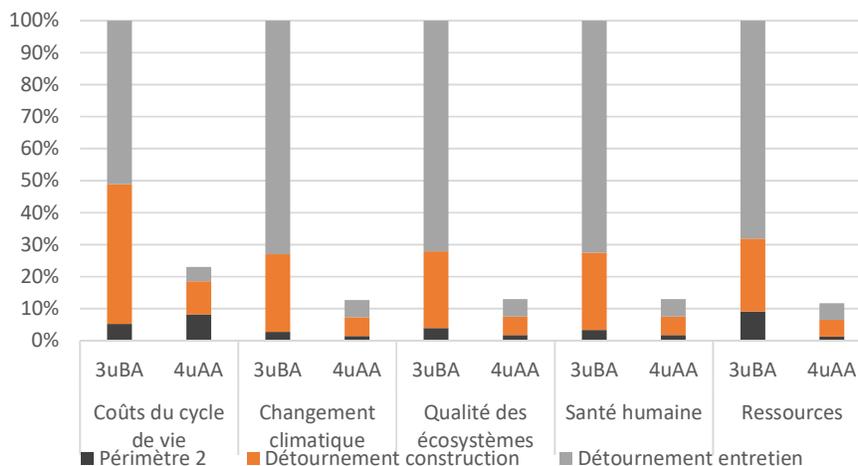
Les résultats selon le périmètre 2, comme le montre la Figure 4-7, indiquent que le pont à tablier à platelage en aluminium reste l'option la plus chère, bien que les coûts d'entretien soient plus faibles que ceux pour le pont à tablier à dalle de béton. Au niveau environnemental, la prise en compte de la gestion de fin de vie et du recyclage de l'acier et de l'aluminium contribue au fait que l'option à platelage en aluminium est préférable pour toutes les catégories. La plus faible quantité de matériaux nécessaire lors des travaux d'entretien pour le platelage en aluminium contribue également à cette conclusion.



**Figure 4-7 Analyse de contribution du milieu urbain selon le périmètre 2**

La Figure 4-8 montre la contribution très importante des détournements du trafic autant pour le coût du cycle de vie que pour les catégories de

dommages environnementaux. En prenant en compte cet aspect, l'option à platelage en aluminium devient nettement préférable à cause de sa rapidité de construction et du faible besoin d'entretien faisant en sorte que le trafic est moins perturbé.



**Figure 4-8** Analyse de contribution du milieu urbain selon le périmètre 3

### 4.3 Monétarisation

Grâce à la monétarisation des résultats environnementaux obtenus par l'ACV, il est possible d'intégrer les coûts environnementaux au coût du cycle de vie calculé par l'ACCV.

Il est pertinent de rappeler que ces coûts n'ont pas été actualisés comparativement à ceux de l'ACCV. Il est toutefois difficile de dire l'impact de cette omission sur les valeurs puisque d'un côté, les impacts associés à l'entretien et la reconstruction engendreraient des coûts actualisés plus faibles, mais d'un autre côté, les crédits recyclage qui se traduisent en flux monétaires négatifs, se font à la toute fin et leur valeur se verrait fortement diminué par l'actualisation. Ceci est une limite évidente aux méthodes d'actualisation utilisées.

#### 4.3.1 Approche du Guide Avantages-Coûts du MTQ

La première approche de monétarisation est celle à partir des coûts associés aux GES et autres polluants atmosphériques identifiés et quantifiés par le Guide Avantages-Coûts du MTQ.

Alors que le guide ne donne que des informations sur les émissions associées au détournement du trafic, l'inventaire de l'ACV a permis d'obtenir l'ensemble des polluants atmosphériques et des GES des systèmes étudiés.

Les Figure 4-9 et Figure 4-10 présentent la comparaison des coûts incluant la monétarisation des polluants atmosphériques et des GES.

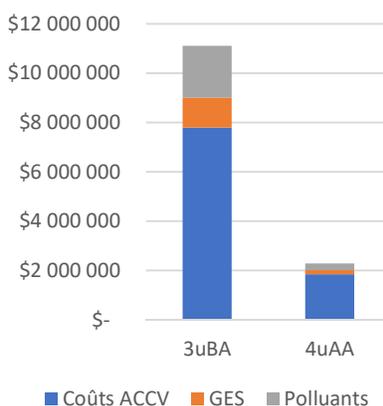
Les coûts environnementaux représentent entre 11 et 30% des coûts totaux des ponts selon cette méthode.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

Les polluants atmosphériques qui contribuent le plus à ces coûts sont les PM2.5 et PM10. Ce sont aussi ceux qui ont le plus grand coût par tonne émise selon le guide.



**Figure 4-9** Comparaison des coûts avec monétarisation des polluants atmosphériques - milieu rural



**Figure 4-10** Comparaison des coûts avec monétarisation des polluants atmosphériques - milieu urbain

La comparaison des coûts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie et de ceux strictement associés aux émissions des véhicules lors des détournements du trafic comme le recommande le guide, présentés au Tableau 4-1, montre qu'en ne prenant que des coûts associés au trafic détourné, on réduit d'un facteur pouvant varier entre 6 et 45 fois les coûts environnementaux totaux.

**Tableau 4-1** Comparaison de la monétarisation du détournement et du cycle de vie

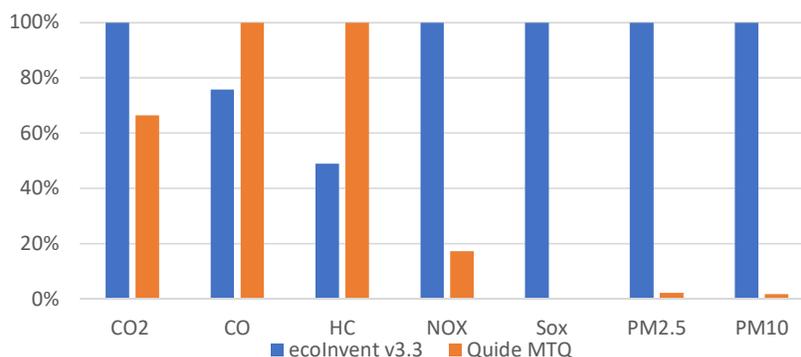
Monétarisation [\$]	1RB	2RA	3UB	4UA
Détournements du trafic	2,014	1,217	576,758	68,218

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

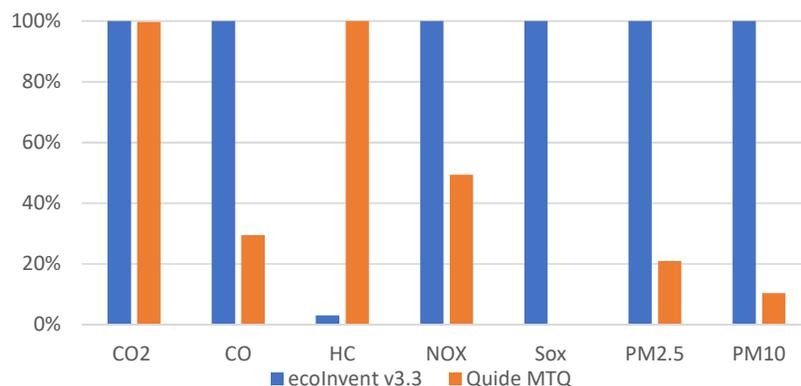
Cycle de vie	64,727	55,202	3,322,683	440,138
Ratio cycle de vie/détournements	32.1	45.4	5.8	6.5

Cet écart s'explique évidemment par le fait que les émissions sur le cycle de vie sont plus complètes étant donné qu'elles prennent en compte celles associées à la production des matériaux et leur transport, celles des équipements utilisés pour construire le pont, celles associées à la construction des véhicules, etc.

Par contre, l'écart s'explique également par la différence entre les inventaires utilisés par le guide et par l'ACV. Une comparaison des émissions produites sur un 1 km par les voitures et camions selon la base de données *ecoinvent* v3.3 le guide montrent des écarts significatifs pour certains polluants atmosphériques. La Figure 4-11 et la Figure 4-12 montrent ces écarts.



**Figure 4-11 Comparaison des émissions produites sur 1 km en voiture selon ecoinvent v3.3 et le guide**



**Figure 4-12 Comparaison des émissions produites sur 1 km en camion selon ecoinvent v3.3 et le guide**

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

On constate que les SO<sub>x</sub> ainsi que les PM sont grandement sous-estimés par le guide en comparaison avec *ecoinvent*. À l'inverse, les HC (hydrocarbures) sont surestimés par le guide.

Ces écarts s'expliquent par le fait que le guide ne prend en compte que les émissions directes de la combustion du carburant (essence et diesel) par les véhicules alors qu'*ecoinvent* englobe l'entièreté du cycle de vie du transport, donc les émissions associées à la fabrication des véhicules, leur utilisation et leur fin de vie. Ces écarts s'expliquent également par le fait que, dans les deux cas, des données génériques sur des voitures et des camions moyens sont utilisées. Il n'est donc pas possible d'affirmer que le guide est incomplet par rapport à *ecoinvent* ou vice-versa.

### 4.3.2 Approche StepWise2006

La seconde approche utilisée pour la quantification des coûts environnementaux des systèmes permet de monétariser directement les impacts environnementaux potentiels calculés par l'ACV.

La Figure 4-13 et la Figure 4-14 montrent la comparaison des coûts totaux des ponts selon cette approche (CC : *Changement climatique*, QÉ : *Qualité des écosystèmes*, SH : *Santé humaine*). Les coûts environnementaux représentent entre 8 et 26 % des coûts totaux, soit un ordre de grandeur similaire à celui pour la première approche utilisée.

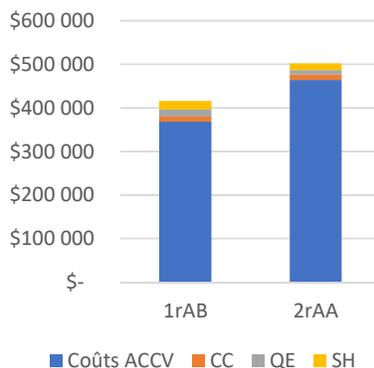
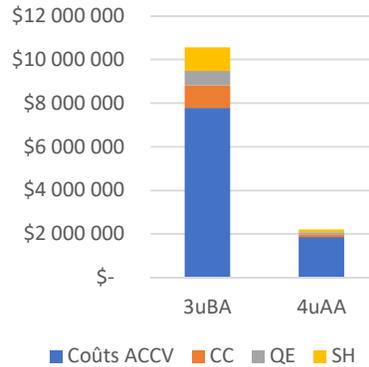


Figure 4-13 Comparaison des coûts avec monétarisation des résultats ACV - milieu rural

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 4-14 Comparaison des coûts avec monétarisation des résultats  
ACV - milieu urbain**

A la lumière des résultats des deux approches de monétarisation, on peut affirmer que la contribution des coûts environnementaux est non négligeable. En effet, dans notre contexte, ils représentent entre 10 et 25% des coûts totaux des systèmes étudiés.

## **5. INTERPRÉTATION**

### **5.1 Qualité des données d'inventaires**

Une évaluation de la qualité des données utilisées pour l'ACV a été réalisée afin d'orienter les analyses d'incertitude et de sensibilité réalisées dans le cadre de l'interprétation des résultats.

Les résultats de l'analyse de la qualité des principales données d'inventaire sont résumés au Tableau 5-1. La qualité de chacune des données a été qualifiée à partir de sa fiabilité, sa représentativité et sa contribution aux résultats. Le calcul ayant permis de qualifier la qualité est présenté à l'ANNEXE D.

La colonne « Améliorations/Adaptations » montre comment le processus a été modélisé. Ainsi, certains processus déjà adaptés pour la province de Québec dans la base de données *ecoinvent* v3.3 ont été utilisés. D'autres ont été adaptés en modifiant la provenance de l'électricité et du gaz naturel (G.N) alimentant le processus pour l'adapter à la réalité énergétique québécoise. D'autres données globales ont aussi été utilisées.

**Tableau 5-1 Qualité des données principales**

<b>Procédé</b>	<b>Source de donnée</b>	<b>Qualité</b>	<b>Améliorations /Adaptations</b>
Production d'acier	Conception	Bonne	Données Qc
Métallisation	Conception	Bonne	Élec. et G.N. Qc
Laminage	Conception	Bonne	Élec. et G.N. Qc
Soudure	Conception	Bonne	Élec. et G.N. Qc
Travail d'acier		Bonne	-
Bois	Conception	Bonne	Données Qc
Traitement du bois	Ecoinvent	Bonne	-
Aluminium	Conception	Bonne	Données Qc
Extrusion d'aluminium	Conception	Bonne	Élec. et G.N. Qc
BimaGrip	Fiche technique	Bonne	-
Peinture	Estimation	Faible	-
Béton	Conception	Très bonne	Données Qc
Enrobé bitumineux	Conception	Très bonne	Données Qc
Transport	Calcul / hypothèses	Faible	-
Équipement mécanisé	Estimation	Faible	-
Tri de la ferraille d'acier	Hypothèse / ecoinvent	Faible	Élec. et G.N. Qc
Tri de l'aluminium	Hypothèse / ecoinvent	Faible	Élec. et G.N. Qc
Recyclage de l'acier	Hypothèse / ecoinvent	Faible	Élec. et G.N. Qc
Recyclage d'aluminium	Hypothèse / ecoinvent	Faible	Élec. et G.N. Qc
Enfouissement	Hypothèse / ecoinvent	Bonne	-
Détournement voiture	Calcul / MTQ	Faible	-
Détournement camion	Calcul / MTQ	Faible	-

À partir de ces analyses, il a été possible de constater :

- que dans l'ensemble, les données utilisées pour l'ACV sont jugées acceptables;
- que certains processus présentent cependant une forte/très forte contribution aux résultats et ont été modélisés à l'aide de données dont la qualité pourrait ou devrait être améliorée. Ces processus

représentent par le fait même une limite et diminuent la certitude avec laquelle les conclusions peuvent être tirées de cette analyse ;

- que certaines données jugées comme étant de faible qualité ne devront pas faire l'objet d'efforts supplémentaires de collecte, puisque leur influence sur les résultats est faible et que l'effort prodigué ne modifierait probablement pas les résultats.

A la suite de cette analyse de qualité, certains processus et leur paramètre associé, jugés particulièrement influents sur les résultats, ont été testés par des analyses de sensibilité. C'est le cas des détournements du trafic ainsi que la provenance de l'aluminium. Ces choix sont en accord avec les conclusions obtenues à la suite de la revue de littérature.

## **5.2 Influence des détours**

Face au constat que l'emplacement du pont a une aussi grande influence sur les résultats et que ce sont des paramètres très incertains, une analyse plus poussée de l'influence des détournements du trafic a été réalisée.

Les deux paramètres influençant les coûts et les résultats d'indicateurs environnementaux des détournements du trafic sont le DJMA et la longueur du détour. Ainsi, une mise en perspective des résultats associés aux détournements du trafic a été faite en isolant ces deux paramètres.

Pour ce faire, nous avons créé arbitrairement un « bloc détour » représentant le produit d'un DJMA et d'une longueur du détour prédéterminés selon le contexte rural et urbain. L'unité de ces blocs est le  $\text{voiture} \cdot \text{km} / \text{jour}$ . Ainsi, deux « blocs détour » correspondraient à un scénario où le DJMA est doublé pour la même distance, ou alors la distance doublée pour le même DJMA.

En multipliant un bloc par le nombre de jours de fermeture du pont de chacun de nos systèmes, il est possible de quantifier les coûts et les impacts environnementaux d'un bloc.

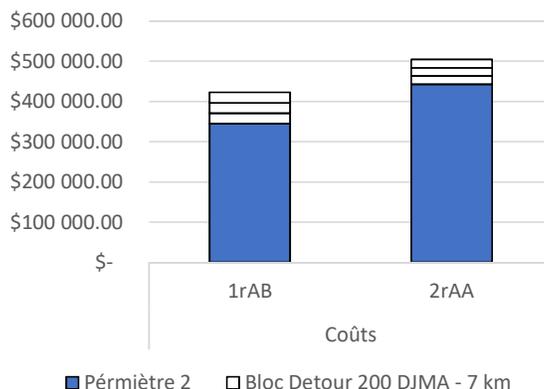
A partir de l'addition des coûts et des impacts environnementaux associés à différents nombres de blocs détour, il est possible de trouver le point de bascule où une option de tablier de pont devient favorable à l'autre. De ce nombre, il est ensuite possible d'identifier les différentes équivalences DJMA et distance de détour représentant ce point de bascule.

### ***5.2.1 Influence des détours en milieu rural***

Pour l'analyse en milieu rural, le « bloc détour » a été arbitrairement défini comme étant un DJMA 200 et d'un détour de 7 km.

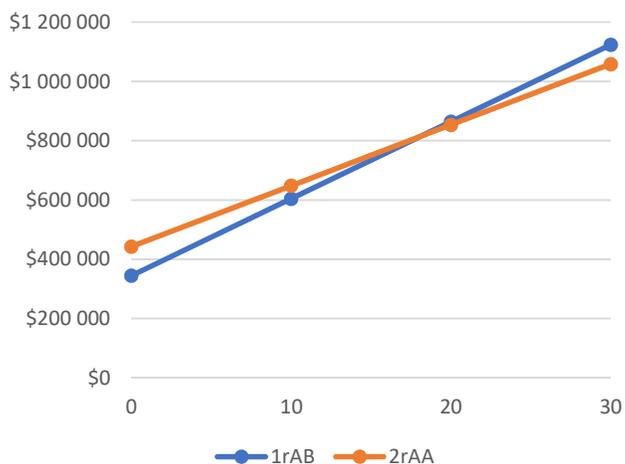
La Figure 5-1 montre la comparaison entre les coûts des tabliers étudiés selon le contexte rural aux coûts de blocs détour.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 5-1 Comparaison des coûts du périmètre 2 et des blocs détour en milieu rural**

On constate, que malgré le fait que les coûts d'un bloc détour du tablier bois-acier soit plus cher que celui du tablier à platelage en aluminium, car la nombre de jours de travaux d'entretien est plus élevé pour ce type de tablier, il reste préférable au niveau économique d'opter pour l'option acier bois. Il existe toutefois un point où les coûts seraient équivalents et où, dépassé ce point, l'option du platelage en aluminium serait préférable. La Figure 5-2 permet de trouver ce point de bascule qui se situe à 18 blocs.



**Figure 5-2 Évolution des coûts selon le nombre de bloc détour en milieu rural**

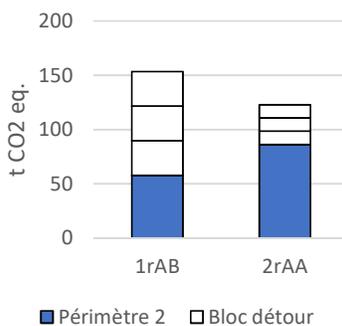
Cela veut dire qu'en-dessous de 18 blocs, il préférable de choisir le tablier acier-bois alors qu'au-dessus, l'option de platelage en aluminium est préférable. Le Tableau 5-2 représente différentes configurations possibles équivalentes à 18 blocs détours, soit le point de bascule des coûts.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

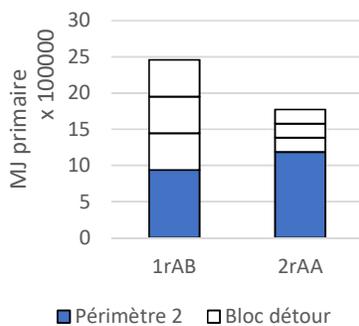
**Tableau 5-2 Représentations diverses de 18 blocs détour**

DJMA	Longueur du détour [km]
2500	5
1800	7
1000	12.6
500	25.2

Un exercice similaire a été réalisé pour les indicateurs environnementaux comme le montre les figures ci-dessous.

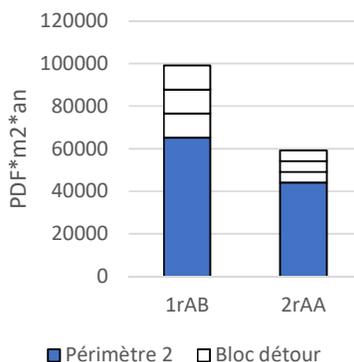


**Figure 5-3 Comparaison pont et détour - milieu rural - Changement climatique**

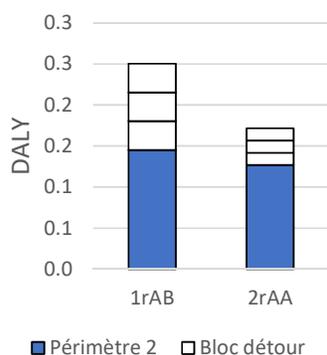


**Figure 5-4 Comparaison pont et détour - milieu rural - Ressource**

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 5-5 Comparaison pont et détour - milieu rural - Qualité des écosystèmes**



**Figure 5-6 Comparaison pont et détour - milieu rural - Santé humaine**

Puisque les indicateurs santé humaine et qualité des écosystèmes sont déjà préférables au périmètre 2, il n'existe que des points de bascule pour le changement climatique et les ressources équivalent à 1.44 et 0.8 blocs respectivement où l'option platelage en aluminium devient plus favorable. L'isolation de bloc détour a permis de montrer qu'à partir de 1.44 blocs détour, il est environnementalement préférable d'opter pour l'option aluminium en contexte rural. Au niveau des coûts, ce constat débute à 18 blocs soit l'équivalent d'un DJMA de 1000 pour un détour de 12.6 km.

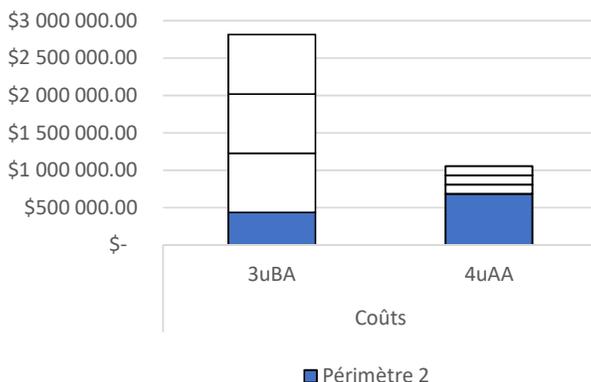
**5.2.2 Influence des détours en milieu urbain**

Pour le cas urbain, un bloc détour de DJMA de 2500 et de longueur de 2.5 km a été utilisé.

Seule la partie des coûts a été faite puisque tous les indicateurs environnementaux sont favorables à l'option à platelage en aluminium selon le périmètre 2, soit sans détour. La prise en compte du détournement ne fait qu'accentuer l'écart en faveur du platelage en aluminium au niveau des impacts environnementaux.

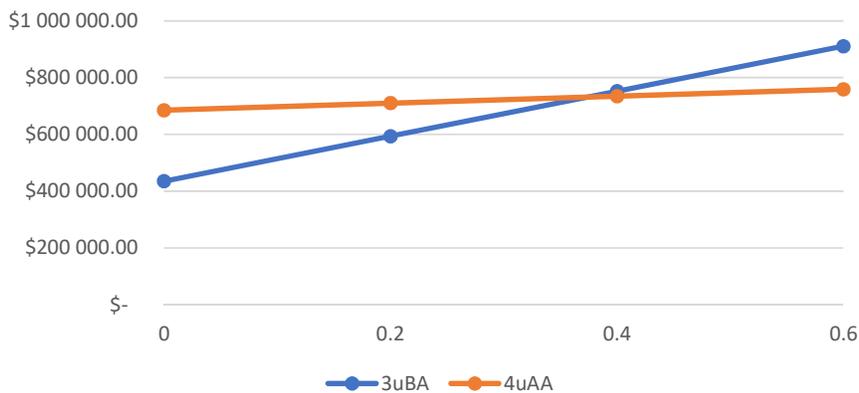
**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

La Figure 5-7 montre la comparaison des deux options en milieu urbain en y intégrant quelques blocs détour. Un seul bloc détour suffit pour que les coûts associés au tablier à platelage en aluminium deviennent plus faibles que celui à dalle de béton.



**Figure 5-7** Comparaison des coûts du périmètre 2 et de blocs détour en milieu urbain

Le point de bascule, où le tablier à platelage en aluminium devient préférable au niveau des coûts, est montré à la Figure 5-8. Ainsi, à partir de 0.375 blocs, les coûts du tablier à dalle de béton sont supérieurs à celui à platelage en aluminium. Ceci équivaut à un DJMA de 938 et un détour de 2.5 km.



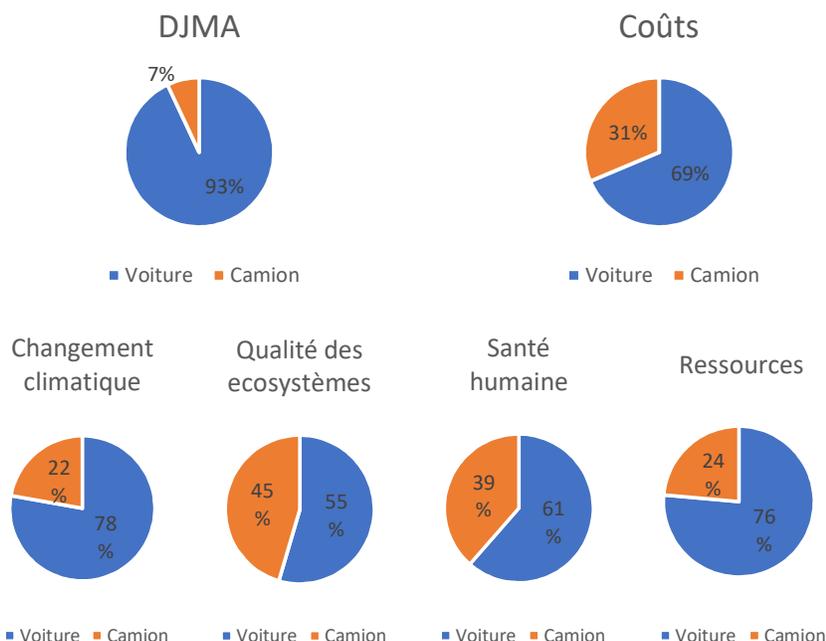
**Figure 5-8** Évolution des coûts selon le nombre de bloc détour en milieu urbain

**5.2.3 Impacts de la proportion de camion**

Les analyses précédentes étaient basées sur l'hypothèse que 7% des véhicules représentés par le DJMA étaient des camions. Comme le montre les diagrammes de la \_\_\_\_\_

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

Figure 5-9, la contribution des camions aux coûts et aux résultats d'indicateurs environnementaux est bien plus que 7%. En effet, 31% des coûts des détournements du trafic sont associés aux camions et ces derniers contribuent entre 22 et 45 % du total selon la catégorie de dommage.



**Figure 5-9 Contribution des voitures et des camions aux coûts et résultats d'indicateurs environnementaux des détournements du trafic**

Cette conclusion indique que pour un cas où une route aurait une plus grande proportion de camion, les impacts et les coûts seraient fortement augmentés comparativement au cas moyen de 7%.

### 5.3 Analyses de sensibilité

#### 5.3.1 ACCV

Afin de tester la robustesse des résultats de l'analyse des coûts, des analyses de sensibilité ont été réalisées sur différents paramètres d'entrée du modèle et hypothèses faites.

Seules les analyses portant sur les paramètres ayant une influence certaine sur les résultats sont présentées dans ce rapport.

Les analyses de sensibilité sont effectuées en faisant varier uniquement la valeur de référence d'un paramètre, alors que les autres paramètres demeurent fixes. La variation des résultats permet d'indiquer sensibilité au paramètre testé.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**5.3.1.1 Taux de croissance du DJMA**

En premier lieu, l'hypothèse faite sur ce paramètre, fixé à 1 %, a été testée. Pour cela on regarde les résultats de l'ACCV lorsque l'on ne considère aucune hausse du trafic soit 0 %.

Le CCV du tablier acier-bois diminue de 2 % tandis que celui du tablier à platelage en aluminium diminue de 1 %. L'écart entre les CCV augmente alors de 6 %. Les conclusions de l'analyse restent inchangées, mais on voit tout de même une certaine sensibilité de ce paramètre.

**5.3.1.2 Taux d'actualisation**

Le taux d'actualisation est varié de plus ou moins 1% et l'effet sur le CCV des deux tabliers est observé (Tableau 5-3).

**Tableau 5-3 Sensibilité du taux d'actualisation du CCV des tabliers en milieu rural**

<b>Type de tablier</b>	<b>r</b>	<b>% variation</b>
Acier-bois	-1%	22%
	-0,5 %	10%
	+0,5 %	-8%
	1%	-14%
Platelage en aluminium	-1%	3%
	-0,5 %	1%
	+0,5 %	-1%
	+1%	-2%

Il ressort de ces résultats que :

- La variation du taux d'actualisation a une plus grande influence sur le tablier acier-bois, car il y a plus d'opérations durant l'étape d'utilisation, c'est-à-dire ayant lieu plus loin dans le temps. Lorsque le taux d'actualisation diminue, cela implique donc que le poids des coûts futurs associés à ces opérations augmente. De même, si le taux augmente, le poids des opérations diminue.
- Un taux d'actualisation élevé favorise l'importance du coût initial de construction tandis qu'un taux d'actualisation faible favorise l'importance accordée au futur.
- Le taux d'actualisation n'a quasiment aucune influence sur le tablier à platelage en aluminium puisqu'il n'y a presque pas de coûts d'entretien.

On calcule alors la variation sur l'écart des CCV à l'année 75 (Tableau 5-4). L'écart est calculé en soustrayant le CCV du tablier à platelage aluminium à celui du tablier acier-bois. La variation est relativement importante avec une diminution jusqu'à 72 % de l'écart de référence, mais sans modification des conclusions, le tablier acier-bois reste plus avantageux économiquement. Le fait de diminuer le taux d'actualisation aura plus d'impact sur le résultat final que le fait de l'augmenter.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**Tableau 5-4 Sensibilité du taux d'actualisation de l'écart entre les ACCV des tabliers en milieu rural**

<b>r</b>	<b>% variation</b>
-1%	-72%
-0,5%	- 32%
+0,5%	26%
+1%	47%

**5.3.1.3 DJMA**

Le DJMA de véhicules est varié avec la valeur minimale, maximale et moyenne d'un échantillonnage statistique d'un groupe de ponts en milieu rural, données en provenance du Ministère (Tableau 5-5, Tableau 5-6).

**Tableau 5-5 Sensibilité du DJMA de l'ACCV des tabliers en milieu rural**

<b>Type de tablier</b>	<b>DJMA</b>		<b>% variation ACCV</b>
<b>Acier-bois</b>	Min.	130	-2%
	Moy.	571	+13%
	Max.	1950	+61%
<b>Platelage en aluminium</b>	Min.	130	-2%
	Moy.	571	+8%
	Max.	1950	+39%

**Tableau 5-6 Influence du DJMA sur l'écart entre les ACCV**

<b>DJMA</b>		<b>% variation de l'écart du ACCV</b>
Min.	130	2%
Moy.	571	-11%
Max.	1950	-51%

À partir de ces résultats, les conclusions suivantes sont déduites :

- La variation du DJMA peut avoir une grande influence sur le résultat de l'ACCV. Le prix du tablier acier-bois peut augmenter de 61%.
- La variation du DJMA a une plus grande influence sur le pont acier-bois, car il y a plus de coûts liés aux fermetures de route dans le cas du tablier acier-bois.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

- La balance reste inchangée et toujours en faveur du tablier acier-bois. Pour le débit maximum de l'échantillon statistique, elle peut tout de même diminuer de moitié.
- Le pont déterministe était à 70 véhicules proches de la valeur minimale possible de l'échantillon en termes de DJMA ; il n'est ainsi pas très représentatif du milieu rural en général.

Finalement, les coûts liés aux fermetures de route sont directement proportionnels au DJMA, par conséquent il s'agit d'un paramètre clé qui influence grandement le résultat de l'étude et pourrait en combinaison avec d'autres paramètres clés, inverser la conclusion de l'étude.

#### 5.3.1.4 *Longueur de détour*

La sensibilité à la longueur de détour est testée en prenant en considération la borne minimale, la borne maximale et la moyenne de l'échantillon statistique du milieu rural (Tableau 5-7 et Tableau 5-8).

**Tableau 5-7 Sensibilité à la longueur de détour de l'ACCV des tabliers en milieu rural**

	<b>Détour</b>		<b>% variation</b>
Acier-bois	Min.	0,7	-10%
	Moy.	27	+30%
	Max.	74	+102%
Aluminium	Min.	0,7	-6%
	Moy.	27	+19%
	Max.	74	+62%

**Tableau 5-8 Influence de la longueur de détour sur l'écart entre les ACCV**

	<b>DJMA</b>	<b>% variation de l'écart du ACCV</b>
Min.	0,7	5%
Moy.	27	-17%
Max.	74	-56%

Les mêmes conclusions que pour le DJMA peuvent être tirées étant donné que les coûts liés aux fermetures de route sont également directement proportionnels à la longueur de détour.

#### 5.3.2 **ACV**

Les limites de cette analyse sont essentiellement liées au caractère incomplet et plus ou moins valide de l'inventaire. En effet, plusieurs processus initialement inclus dans le cycle de vie des ponts ont dû être exclus ou estimés, principalement par manque d'informations les concernant. L'inclusion et/ou l'augmentation de la validité de certains processus dans l'inventaire modifieraient assurément les résultats de l'analyse. Il est donc important d'évaluer dans quelle mesure ces

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

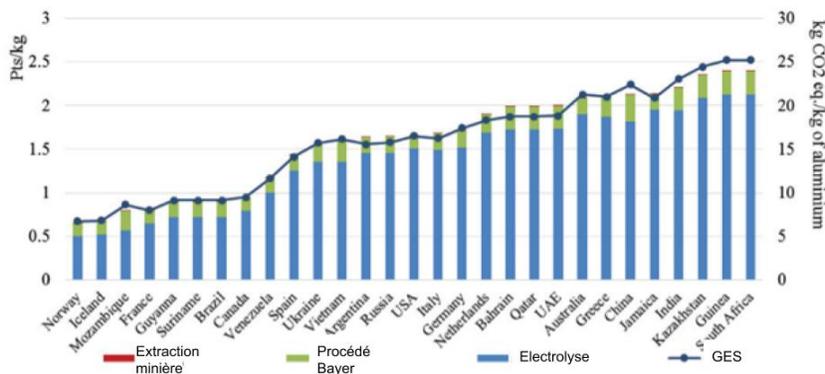
modifications pourraient inverser les conclusions obtenues, en particulier si les processus exclus ou estimés sont différents pour les alternatives comparées et/ou concernent des éléments qui semblent avoir le plus d'influence sur les résultats.

Trois analyses de sensibilité ont été effectuées pour vérifier l'influence des hypothèses de modélisation sur les conclusions de cette étude.

### 5.3.2.1 Provenance de l'aluminium

Les ACV portant sur la production d'aluminium primaire montrent que l'étape du cycle de vie la plus contributrice aux résultats d'indicateurs environnementaux est celle de l'électrolyse de l'alumine puisqu'elle consomme une grande quantité d'électricité. La grande variabilité géographique du profil environnemental du mix électrique alimentant les cellules d'électrolyse, explique la grande variabilité du profil de la production d'aluminium selon la région de production.

En ce sens, Paraskevas et al. (2016) ont évalué le profil environnemental de la production d'aluminium primaire en 2012 par pays, les résultats obtenus sont présentés à la Figure 5-10.



**Figure 5-10 Impacts environnementaux et émissions de GES de la production d'aluminium primaire liquide par pays**

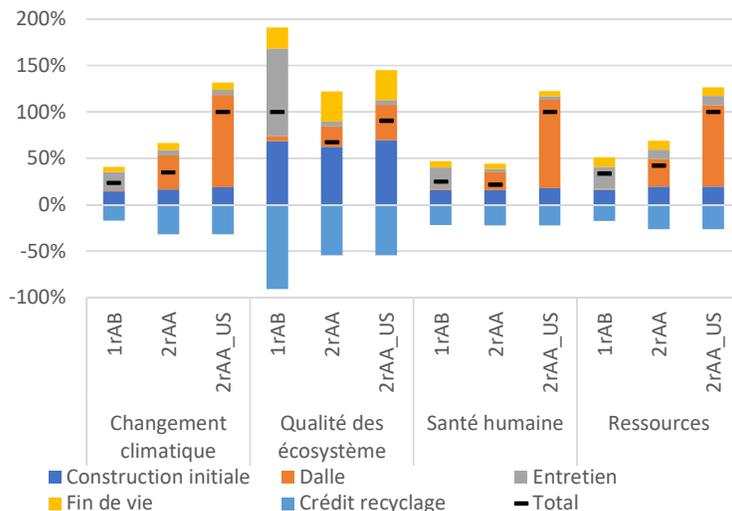
Source : (Paraskevas et al., 2016)

Face à ces écarts, on comprend que dans le cadre de notre étude, l'hypothèse de base voulant que les matériaux proviennent tous d'un fournisseur québécois a certainement influencé les résultats. Pour cette raison, un scénario où l'aluminium proviendrait des États-Unis plutôt que du Québec a été analysé.

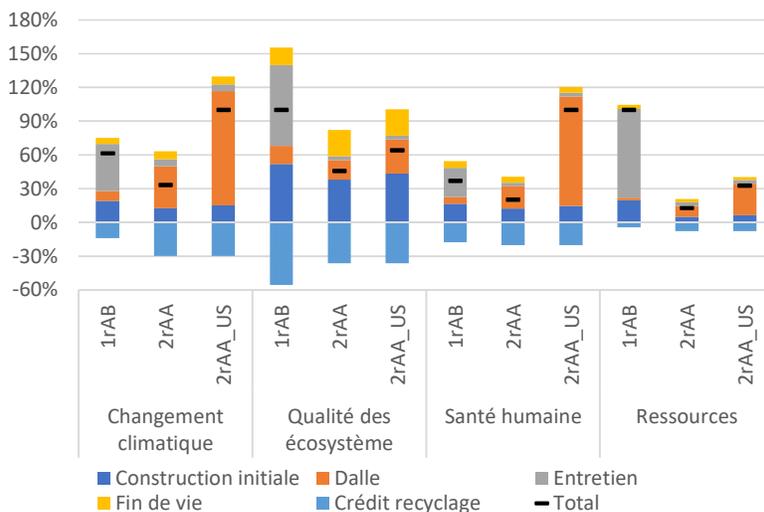
Puisque les technologies de production d'aluminium peuvent différer et que l'électricité utilisée présente un profil environnemental pire qu'au Québec, les résultats d'indicateurs devraient être plus grands. Il faut également considérer une plus grande distance de transport des matériaux entre l'usine et le site de construction. Une distance de 3000 km a été supposée. Le reste du modèle est resté inchangé.

Les résultats pour le milieu rural sont présentés à la Figure 5-11 tandis que ceux pour le milieu urbain sont présentés à la Figure 5-12. Les résultats montrés ne couvrent que le périmètre 2 afin d'isoler l'analyse des incertitudes inhérentes au détournement de trafic et ainsi ne se concentrer que sur les impacts directs associés à la construction et l'entretien.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 5-11** Analyse de sensibilité sur la provenance de l'aluminium selon le périmètre 2 en contexte rural



**Figure 5-12** Analyse de sensibilité sur la provenance de l'aluminium selon le périmètre 2 en contexte urbain

Pour chacune des comparaisons, les résultats d'indicateurs pour les catégories *Changement climatique*, *Santé humaine* et *Ressources* sont particulièrement affectés par ce changement.

En milieu rural, un tablier de pont à platelage en aluminium serait bien pire que celui en acier-bois selon toutes les catégories sauf *Qualité des écosystèmes*, pour laquelle il serait préférable de très peu. Cette tendance est maintenue avec l'ajout des impacts du détournement de trafic.

En milieu urbain, alors que toutes les catégories étaient favorables au tablier à platelage en aluminium, un changement de conclusion est observé pour les catégories *Changement climatique* et *Santé humaine*. Toutefois, la

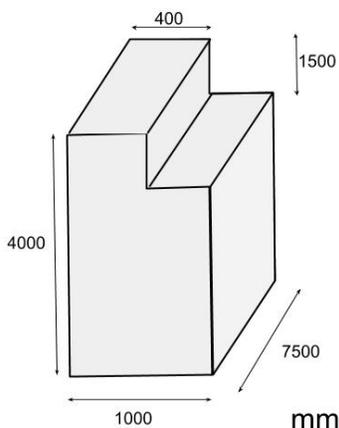
prise en compte du détournement du trafic rend le tablier à platelage en aluminium significativement favorable même si l'aluminium provient des Etats-Unis.

Cette analyse de sensibilité montre l'importance du choix du fournisseur d'aluminium sur le profil environnemental du produit étudié.

### 5.3.2.2 *Mise en perspective en considérant la culée*

Une hypothèse de base a été que l'analyse ne portait que sur le tablier du pont et que les culées étaient exclues puisqu'elles sont identiques, peu importe le type de tablier. Afin de confirmer que cette hypothèse est valable, il est pertinent de mettre en perspective les profils environnementaux des culées à ceux du tablier. Si la contribution des culées est faible par rapport à celle du tablier, l'hypothèse de base est alors justifiable et n'influence pas les conclusions de l'étude.

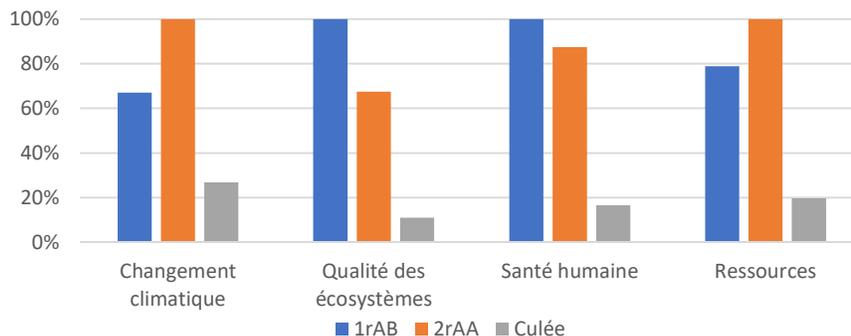
Une comparaison des profils environnementaux des tabliers et des culées a donc été faite. La taille des culées modélisées est montrée à la Figure 5-13. Cette géométrie de culée ne représente pas un modèle standard utilisé par le ministère et n'est utilisé qu'à titre indicatif. Ce modèle sur-simplifié permet seulement d'approximer la quantité de béton nécessaire pour notre analyse de sensibilité. En ce sens, on suppose que les culées sont faites de 46.5 m<sup>3</sup> de béton 35 MPa produits au Québec. La description des flux et des processus modélisés pour les culées est présentée au Tableau C-5.



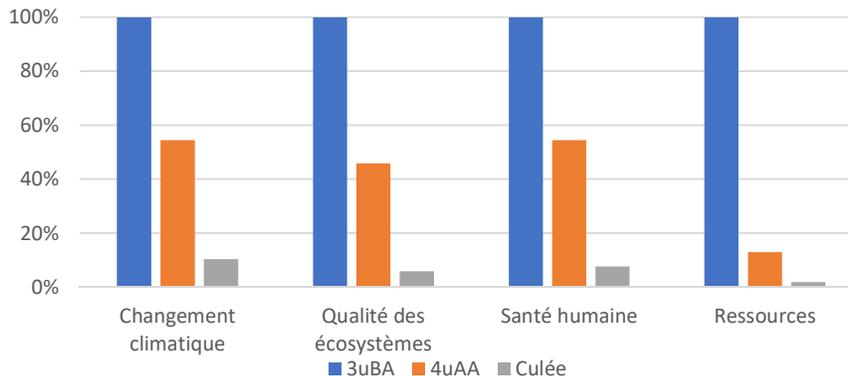
**Figure 5-13 Taille des culées modélisées**

Les Figure 5-14 et Figure 5-15 montrent la comparaison des profils environnementaux des coulées et tabliers selon le périmètre 2 afin d'éviter les incertitudes et la contextualisation nécessaires inhérentes au détournement de trafic.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**



**Figure 5-14** Comparaison des impacts selon le périmètre 2 des tabliers aux culées de béton dans un contexte rural



**Figure 5-15** Comparaison des impacts selon le périmètre 2 des tabliers aux culées de béton dans un contexte urbain

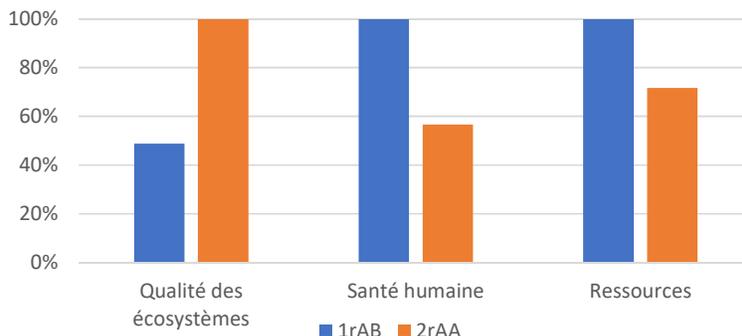
Les résultats d'indicateurs pour les culées sont relativement faibles pour toutes les catégories en comparaison avec ceux pour les tabliers. Ils ne dépassent pas 25% en milieu rural et 10% en milieu urbain. Cette analyse vient confirmer que l'amélioration relative de la performance environnementale des systèmes en ne tenant compte uniquement que des tabliers ne serait diminuée que de très peu si les culées étaient incluses dans l'analyse, et leur exclusion est donc justifiée.

### 5.3.2.3 Méthode d'évaluation des impacts

Comme mentionné précédemment, l'ÉICV a été réalisée avec une seconde méthode, ReCiPe (Goedkoop, 2013) afin de vérifier si la variabilité des modèles de caractérisation avait une influence significative sur les conclusions et donc, de tester la robustesse des résultats obtenus à partir d'IMPACT 2002+.

Pour l'analyse des ponts en milieu rural, la Figure 5-16 montre les profils environnementaux obtenus à l'aide de la méthode ReCiPe selon le périmètre 3.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM



**Figure 5-16 Comparaison des impacts environnementaux en contexte rural - périmètre 3 - Méthode ReCiPe**

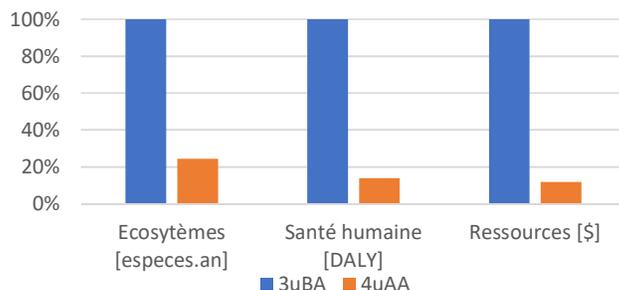
Il n'est pas possible de choisir laquelle des options est meilleur d'un point de vue environnemental, car une inversion de la préférence est observée selon la catégorie. En comparant aux résultats obtenus avec la méthode IMPACT 2002+, les catégories *Santé humaine* et *Ressources* restent favorables au pont à platelage en aluminium. On voit une inversion des tendances pour la catégorie *Qualité de écosystèmes*.

Il est pertinent de mentionner que la caractérisation de la catégorie *Ressources*, se fait selon une approche différente. Alors qu'IMPACT 2002+ quantifie l'énergie primaire dissipée par le système, ReCiPe quantifie les coûts additionnels marginaux pour exploiter les ressources.

En ce qui a trait à la catégorie *Qualité des écosystèmes*, ReCiPe y intègre la catégorie *Changement climatique* (qui était favorable au tablier acier-bois). Également, cette méthode est reconnue pour surévaluer, en comparaison aux autres méthodes, le résultat d'indicateur pour la catégorie d'impact *Occupation des terres* (Bulle et al., 2019). Le résultat pour cette catégorie d'impact, qui contribue à la catégorie de dommage *Qualité des écosystèmes*, est très élevé pour le système 2rAA à cause de sa grande consommation d'hydroélectricité pour la production d'aluminium. Cela explique en grande partie l'inversion de la tendance selon la méthode d'évaluation.

La Figure 5-17 montre la comparaison selon le périmètre 3 en milieu urbain. Cette fois-ci, des conclusions identiques à ceux calculés avec Impact2002+ sont obtenues, c'est-à-dire, une nette préférence pour le tablier à platelage en aluminium.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM



**Figure 5-17 Comparaison des impacts environnementaux en contexte urbain - périmètre 3 - Méthode ReCiPe**

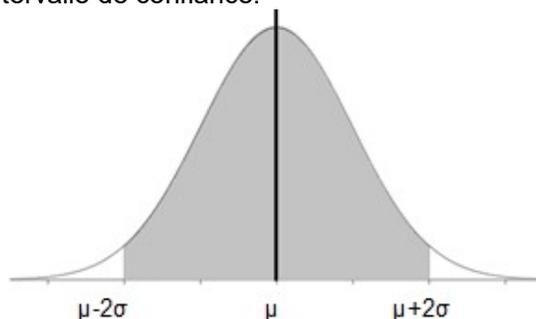
Malgré les inversions des conclusions de l'indicateur Qualité de écosystèmes pour la comparaison en milieu urbain, l'analyse de sensibilité avec la méthode ÉICV ReCiPe (E) confirme les résultats de l'étude et atteste de leur robustesse.

### 5.4 Analyse d'incertitude - ACV

L'incertitude inhérente au modèle ACV est de l'ordre des données d'inventaire et des modèles de caractérisation qui traduisent l'inventaire en indicateurs environnementaux.

Une analyse d'incertitude de type Monte-Carlo a été réalisée afin de tester la robustesse des résultats en tenant compte des incertitudes associées aux données d'inventaire. Elle constitue une étude de propagation de cette dernière lors des calculs. Le nombre d'itérations lors de la simulation de Monte Carlo a été fixé à 1 000.

Seule la variabilité des données d'avant-plan a été étudié selon une distribution normale, où 95% de probabilité que la valeur soit comprise entre  $\mu \pm 2\sigma$ , où  $\mu$  représente la moyenne et  $\sigma$  l'écart type (Figure 5-18). Le domaine balayé autour de la moyenne par l'écart proposé vaut environ 95%, appelé intervalle de confiance.



**Figure 5-18 Exemple de distribution normale**

Trois niveaux relatifs de variabilité ont été utilisés selon la fiabilité des données utilisées dans le modèle en utilisant un coefficient de variation (cov) de : 2.5%, 12.5% et 25% comme l'indique le Tableau 5-9. Les écarts types sont ensuite calculés à partir de coefficient de variation et de la moyenne de chacun des paramètres.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**Tableau 5-9 Niveau d'incertitudes des données utilisées**

<b>Fiabilité</b>	<b>cov</b>	<b>Justification</b>	<b>Exemples</b>
<b>Haute</b>	2.5%	Données obtenues directement de la conception du tablier	Quantité de béton de la dalle, masse d'acier de la poutre
<b>Moyenne</b>	12.5%	Données dérivées de la conception à partir d'une hypothèse	Transport des matériaux, surface de métallisation
<b>Faible</b>	25%	Estimation	Temps d'utilisation d'équipement mécanisés pour la construction

Une loi de distribution probabiliste triangulaire a été utilisée pour certains paramètres précis à la fin de vie tel que le taux de collecte, le rendement des usines de tri et de recyclage. Ce choix a été fait puisqu'une distribution normale peut mener à des rendements plus grands que 1, donc impossible. Le Tableau 5-10 regroupe les paramètres de la loi de distribution probabiliste triangulaire utilisés.

**Tableau 5-10 Paramètres de la loi de distribution probabiliste triangulaire des taux relatifs à la fin de vie utilisés dans l'analyse d'incertitude**

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur moyenne</b>	<b>Unité</b>	<b>Intervalle triangulaire</b>
Taux de collecte	0.9	-	0.81 - 0.99
Energie bois	16	GJ/tonne	14.40 - 17.60
Perte recyclage acier	1.105	kg/kg rec	1.05 - 1.16
Perte tri aluminium	1.25	kg/kg rec	1.13 - 1.38
Perte recyclage aluminium	1.03	kg/kg rec	1.01 - 1.05

La variabilité des données d'arrière-plan n'a pas été prise en compte dans l'analyse d'incertitudes, puisque ce genre d'analyse peut engendrer un niveau de confiance faussé dans les résultats et sous-estimer ce type d'incertitude (Kuczynski, 2019). Ainsi, seulement l'incertitude des paramètres intrant des systèmes ont été évalué ce qui limite le champ de cette analyse d'incertitude.

La simulation Monte-Carlo a été réalisée sur la soustraction des deux systèmes comparés. Cela permet de prendre en compte la dépendance de certains paramètres qui sont communs aux deux systèmes comparés.

Dans un premier temps, la simulation Monte-Carlo a été réalisée sur la soustraction du système à tablier à platelage en aluminium au système à tablier acier-bois selon le périmètre 2, c'est-à-dire l'entièreté du cycle de vie mais en excluant les détournements du trafic. Ce choix a été fait puisque les incertitudes liées aux détournements du trafic sont difficiles à quantifier et il a été jugé plus pertinent d'évaluer l'influence des détournements spécifiquement comme cela a été fait au chapitre 5.2.

Si le résultat est positif, cela indique que le pont à platelage en aluminium est favorable. Le Tableau 5-11 montre les résultats médians ainsi que les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles des 1000 itérations de la simulation Monte-Carlo en milieu rural.

**Tableau 5-11 Résultats de la simulation de Monte-Carlo en milieu rural**

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

<b>Catégorie d'impact</b>	<b>CC [kg CO<sub>2</sub> eq.]</b>	<b>QE [pdf*m<sup>2</sup>*an]</b>	<b>SH [DALY]</b>	<b>R [MJ]</b>
Médiane	-2.88E+04	2.27E+04	1.92E-02	-2.53E+05
5 <sup>e</sup> percentile	-3.47E+04	1.37E+04	8.97E-03	-3.28E+05
95 <sup>e</sup> percentile	-2.22E+04	4.11E+04	3.23E-02	-1.80E+05

On constate donc la même tendance entre les résultats déterministes et les résultats probabilistes. Entre les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles, les catégories de dommages *Changement climatique* et *Ressources* sont favorables au tablier acier-bois alors que les catégories *Qualité des écosystèmes* et *Santé humaine* sont favorables au tablier à platelage en aluminium.

Dans un deuxième temps, la simulation Monte-Carlo a été réalisé sur la soustraction du système à tablier à platelage en aluminium au système à tablier à dalle de béton, toujours selon le périmètre 2.

Encore une fois, une valeur négative indique que l'option en aluminium est pire. Le Tableau 5-12 montre les résultats médians ainsi que les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles des 1000 itérations de la simulation Monte-Carlo en milieu urbain.

**Tableau 5-12 Résultats de la simulation de Monte-Carlo en milieu urbain**

<b>Catégorie d'impact</b>	<b>CC [kg CO<sub>2</sub> eq.]</b>	<b>QE [pdf*m<sup>2</sup>*an]</b>	<b>SH [DALY]</b>	<b>R [MJ]</b>
Médiane	1.01E+05	6.79E+04	1.45E-01	1.13E+07
5 <sup>e</sup> percentile	9.03E+04	5.94E+04	1.29E-01	1.09E+07
95 <sup>e</sup> percentile	1.11E+05	8.36E+04	1.61E-01	1.18E+07

Les conclusions avec la prise en compte des incertitudes, restent les mêmes que ceux de l'analyse déterministe. En effet, tous les indicateurs favorisent l'option à platelage en aluminium, puisque toutes les valeurs sont positives.

En ce qui a trait à l'incertitude des modèles de caractérisation, elle ne peut pas être quantifiée à l'aide d'une analyse statistique. Ainsi, seule l'analyse de sensibilité sur la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie couvre cette forme d'incertitude.

## **5.5 Applications et limites**

Ces ACCV et ACV visent à comparer le coût du cycle de vie ainsi que les profils environnementaux de différents types de tabliers de pont. Toutes conclusions tirées de cette étude hors de son contexte original doivent être évitées.

Ses résultats pourront être utilisés pour :

- Caractériser le profil économique et environnemental des différents tabliers de pont étudiés, en identifier et en comparer les principaux contributeurs et les paramètres clés ;
- Cibler les forces et les faiblesses de chacune des alternatives et identifier les conditions pour lesquelles une alternative semble préférable à l'autre.

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Les principales limites pouvant cependant être soulevées concernent :

- La validité des hypothèses relatives au cycle de vie des systèmes étudiés ;
- La variabilité actuelle et future des prix unitaires des différents éléments concernant l'ACCV.
- Les hypothèses de construction et d'entretien des tabliers à platelage en aluminium étant donné que ce type de technologie ne soit pas déployé à grande échelle.
- L'incertitude inhérente aux méthodes et technologies utilisées en gestion de fin de vie des matériaux de construction dans 50 et 75 ans.
- La complétude et la validité des données d'inventaire. En particulier,
  - l'utilisation de données secondaires provenant d'une base de données d'inventaire à l'origine européenne peut influencer la validité des résultats dans un contexte nord-américain et québécois.
  - le nombre important d'estimations et d'hypothèses quant à la caractérisation du trafic empruntant le pont au cours de la période de 75 ans considérée;
- Concernant l'ACV, la complétude et la validité de la méthode d'évaluation des impacts utilisée, entre autres parce qu'elle ne couvre pas toutes les substances inventoriées ni tous les impacts environnementaux associés aux activités humaines. Notamment :
  - Les catégories d'impact « toxicité cancer », « toxicité non-cancer » et « écotoxicité » ne sont pas des mesures du risque associé aux systèmes évalués. En effet, les différentes émissions sont agrégées dans le temps et l'espace afin de constituer un inventaire dans lequel un seul flux est associé à chacune des substances répertoriées (c.-à-d. la masse totale émise par l'ensemble des processus qui la produisent). Il n'est donc pas possible de connaître le lieu, ni le moment où ont lieu les émissions et donc, d'identifier la quantité à laquelle est exposée une région donnée, l'information sur laquelle repose l'appréciation du risque pour une population donnée.
  - L'interprétation des résultats de la caractérisation ne peut se baser que sur les résultats obtenus, c'est-à-dire sur les substances pour lesquelles il existe, dans la base de données des méthodes, des facteurs de caractérisation qui convertissent les flux élémentaires inventoriés en unités d'indicateurs d'impact et de dommage. Or plusieurs flux élémentaires n'ont pu être convertis en scores d'impact puisqu'aucun facteur de caractérisation n'était disponible. Ils n'ont donc pas été considérés lors de la phase d'évaluation des impacts potentiels.
  - Contrairement à l'analyse de risque environnemental conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible, En effet, l'ÉICV tente de représenter le

cas le plus probable, c.-à-d. que les modèles utilisés, soit les modèles de transport et de devenir des contaminants dans l'environnement et d'effet toxique sur les récepteurs biologiques ne tentent pas de maximiser l'exposition et le dommage environnemental (approche du pire scénario), mais bien d'en représenter un cas moyen

Il convient enfin de rappeler que les résultats de l'ACV présentent des impacts environnementaux potentiels et non réels.

## **5.6 Recommandations et perspectives**

### **5.6.1 *Recommandations***

À la lumière des résultats de l'ACCV et de l'ACV, la construction de ponts à platelage en aluminium devrait être privilégiée en milieu urbain alors que le tablier acier-bois est préférable en milieu rural selon les paramètres de DJMA et de longueur du détour utilisé dans l'étude. Avec un DJMA de plus de 1000 pour un détour de 12.7 km, il devient alors préférable d'opter pour l'option à platelage en aluminium en milieu rural.

L'avantage majeur des tabliers à platelage en aluminium est que le temps de construction et le besoin d'entretien se voient grandement diminués en comparaison aux autres matériaux. Ceci fait en sorte que les coûts et les impacts environnementaux potentiels associés aux détournements du trafic sont ainsi diminués ce qui compense les coûts d'achat initiaux plus élevés du platelage.

Globalement, les résultats permettent d'affirmer qu'il est possible de diminuer les coûts totaux ainsi qu'améliorer la performance environnementale d'un pont en :

- priorisant des modèles de pont pour lesquels le nombre et la durée des travaux d'entretien sont le plus petit et courte possible afin de minimiser les détournements des véhicules empruntant normalement le pont ;
- diminuant le temps des travaux de construction et d'entretien des tabliers de ponts ;
- continuant l'optimisation du platelage en aluminium pour diminuer la quantité d'aluminium requise ;
- assurant le recyclage des matériaux métalliques présents dans la structure ;
- s'approvisionnant en matériaux produits au Québec.

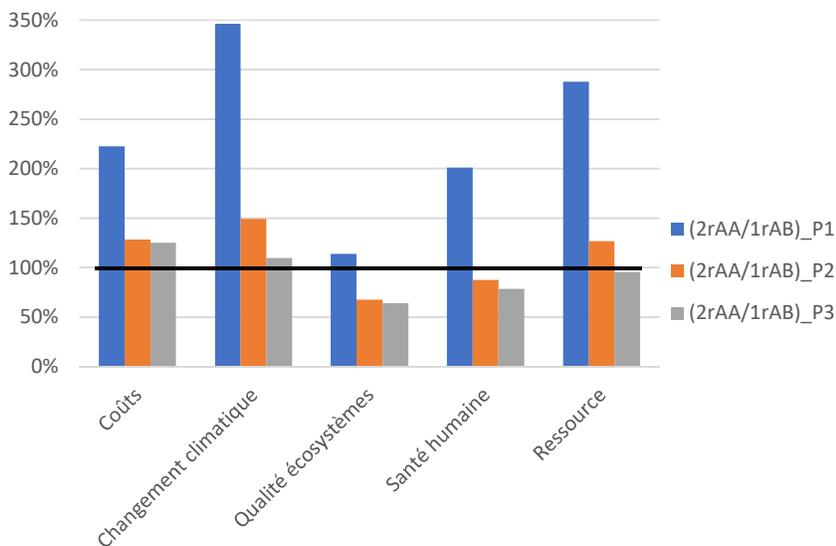
Les résultats obtenus sont cohérents avec les conclusions de la revue de littérature voulant que l'option ayant la meilleure performance environnementale soit l'option nécessitant le moins de matières et d'entretien sur l'ensemble du cycle de vie du pont.

### **5.6.2 *Importance de la pensée cycle de vie***

La pensée cycle de vie est au cœur de ce projet de recherche. La manière, dont les résultats ont été présentés, ont permis de montrer l'évolution des résultats comparatifs selon les étapes du cycle de vie prises en compte. La Figure 5-19 montre les résultats normalisés par rapport à l'option à tablier acier-bois pour les différents périmètres. Si le résultat diagramme est au-

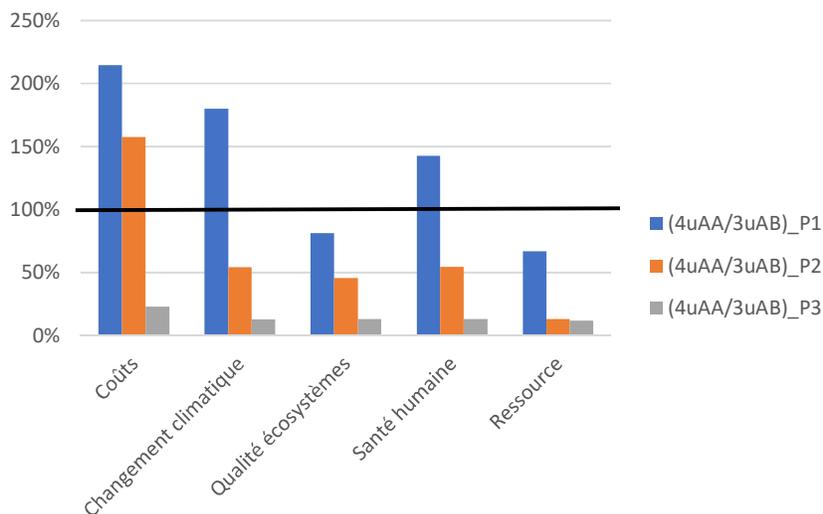
**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

dessus de la ligne de 100%, c'est que l'option en aluminium est pire alors qu'elle serait préférable si le résultat est en dessous.



**Figure 5-19** Évolution des comparaisons selon le périmètre étudié – milieu urbain

De la même manière, la Figure 5-20 montre les résultats en milieu urbain normalisés par rapport à l'option à dalle de béton selon les différents périmètres.



**Figure 5-20** Évolution des comparaisons selon le périmètre étudié – milieu rural

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Les figures montrent qu'une inversion des conclusions advient pour presque toutes les catégories si l'on considère l'entièreté du cycle de vie ainsi que les détournements du trafic.

Une décision basée seulement sur les coûts et les profils environnementaux de la construction initiale serait donc très différente de celle basée sur le cycle de de vie complet.

### **5.6.3 Perspectives**

Une continuation possible du projet serait d'améliorer la collecte de données principalement sur celles dont l'incertitude est la plus grande et dont la contribution est la plus grande.

L'analyse économique et environnementale ont permis d'identifier les paramètres les plus sensibles du modèle. Parmi ceux-ci, on retrouve :

- la masse de la poutre et du platelage ;
- le scénario d'entretiens envisagé ;
- les temps des travaux de construction et d'entretien ;
- la longueur du détour ;
- le DJMA ;
- la proportion de camions ;
- le taux d'actualisation ;
- la provenance de l'aluminium.

Il serait ainsi possible d'approfondir les différentes analyses d'incertitude et augmenter la robustesse des résultats.

Une autre suite possible du projet serait de développer un outil paramétré, basé sur la méthodologie et les conclusions de cette présente étude, permettant de comparer rapidement différents scénarios. L'utilisateur d'un tel outil n'aurait qu'à entrer une série de paramètres clés de conception, d'entretien et d'analyse et l'outil générerait automatiquement les résultats économiques environnementaux et la comparaison avec différents modèles. Un tel outil permettrait d'accompagner les prises de décisions futures dans les choix de tabliers de ponts au Ministère.

## **6. CONCLUSION**

Cette étude a permis de répondre aux deux objectifs établis au départ, à savoir : établir et comparer le coût du cycle de vie et le profil environnemental de quatre types de tabliers de pont, d'identifier les plus grands contributeurs aux coûts totaux et au profil environnemental et les paramètres clés propres aux différents systèmes à l'étude.

Les résultats ont ainsi montré que le pont à tablier acier-bois est préférable en milieu rural, selon les paramètres de trafic et de longueur du détour considérés, à l'option à platelage en aluminium. Il existe toutefois des scénarios où le DJMA et la longueur du détour rend le platelage d'aluminium préférable. Le platelage de l'aluminium est le principal contributeur aux indicateurs considérés. Les poutres d'acier contribuent aussi de manière importante.

En milieu urbain, le pont à tablier à platelage en aluminium s'avère être la meilleure option, car les contributions des détournements du trafic sont grandement plus faibles. En effet, ces derniers contribuent à près de 90 % aux résultats d'indicateurs pour le tablier à dalle de béton.

L'intégration des résultats de l'ACV à l'ACCV s'est fait grâce à la monétarisation des impacts environnementaux. Deux approches différentes ont été utilisées et mènent à des conclusions similaires. L'internalisation des aspects environnementaux représente entre 10 et 30 % des coûts globaux. Toutefois, cette internalisation ne change pas les conclusions des comparaisons.

Ce rapport a montré que la prise en compte de l'entièreté du cycle de vie peut influencer les conclusions d'une étude comparative. L'intégration de la pensée cycle de vie dans la prise de décisions des décideurs publics rendrait les décisions plus éclairées et cohérentes avec une perspective de développement durable. Pour le bien de tous et des générations futures, espérons que cette vision holistique soit de plus en plus intégrée aux décisions gouvernementales.

## 7. RÉFÉRENCE

- Arrien, P. (1995). *Remplacement d'un tablier de pont par un tablier en aluminium* (MSc). Université Laval.
- Arrow, K. J., Cropper, M. L., Gollier, C., Groom, B., Heal, G. M., Newell, R. G., ... Weitzman, M. L. (2013). How should benefits and costs be discounted in an intergenerational context? *Resources for the Future*. <https://doi.org/10.1093/reep/reu008>
- Arrow, K. J., Cropper, M. L., Gollier, C., Groom, B., Heal, G. M., Newell, R. G., ... Weitzman, M. L. (2014). Should Governments Use a Declining Discount Rate in Project Analysis? *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(2), 145–163. <https://doi.org/10.1093/reep/reu008>
- Association de l'aluminium du Canada. (2018). Infrastructures et ouvrages d'art - L'aluminium - Association de l'aluminium du Canada. Retrieved October 15, 2018, from <https://aluminium.ca/fr/aluminium/infrastructure-et-ouvrage-d-art>
- Bayan, C., Pedneault, J., Sorelli, L., Margni, M., Fafard, M., & Conciatori, D. (2018). *Analyse du coût total de possession sur le cycle de vie d'un pont routier à platelage aluminium - Complément du Rapport d'étape 3*.
- Beaulieu, D., Internoscia, J., & Hartileb. (2015). *Ponts et passerelles en aluminium - Rapport de visites et de rencontres en Suède, Hollande et aux États-Unis*.
- Beaulieu, Denis. (2013). *Les caractéristiques de l'aluminium structural*. Chicoutimi, Québec, Canada: Les Presses de l'aluminium.
- Beaulieu, Denis. (2016). *Calcul des ponts et passerelles en aluminium selon la norme CAS-S6-14 - Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Montréal, Québec, Canada.
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., ... Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Burgelin, J.-B. (2017). *Nouveau concept modulaire de tablier de pont tout aluminium à portée simple et assemblable en chantier* (MSc). Université Laval, Québec, Canada.
- CAN/CSA-S157-17: *Strength Design in Aluminum*. (2017). Mississauga, Ontario, Canada.
- CAN/CSA-S6-14: *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. (2014). Mississauga, Ontario, Canada.
- Djedid, A., Desjardins, V., Guillot, M., & Fafard, M. (2018). *Rapport d'étape 1 du projet de recherche R786.1 - Développement d'une solution de platelage en aluminium pour pont routier à poutres d'acier, avec action composite* (Rapport de recherche réalisé pour le compte du Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports). Québec, Canada.
- Fortin, D. (2016). *Remplacement du pont sur le rang 3 au-dessus de la rivière Couchepaganiche, à Metabetchouan* (Notes de calcul). Québec, Canada.
- Goedkoop, M. J. (2013). harmonised category indicators at the midpoint

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

- and the endpoint level ReCiPe 2008, (January).  
<https://doi.org/10.2307/40184439>
- Gollier, C. (2008). Declining discount rates: economic justifications and implications for long-run policy. *Economic Policy*, 23(56), 758–795.
- Gollier, C. (2015). Taux d'actualisation et rémunération du capital. *Revue Française d'économie*.
- Gouvernement du Québec, Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation. Stratégie québécoise de développement de l'aluminium 2015-2025 - MESI (2015).
- Guillot, M. (2013). *Introduction à la conception de produits et de structures en aluminium*. Montréal, Québec, Canada.
- ISO. (2006a). ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- ISO. (2006b). ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- ISO. (2017). ISO 15686-5:2017 - Buildings and constructed assets -- Service life planning -- Part 5: Life-cycle costing. Retrieved May 27, 2019, from <https://www.iso.org/standard/61148.html>
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., & Shaked, S. (2010). *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan - Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Crettaz - Google Books* (2nd ed.). Italie: Presses polytechniques et universitaire romandes. Retrieved from [https://books.google.ca/books?id=g9S55CkIsOoC&printsec=frontcover&dq=analyse+du+cycle+de+vie,+comprendre+et+réaliser+un+écobilan&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwixqqzlrscAhXnpVkkKHcojA24Q6AEIKTAA#v=onepage&q=analyse du cycle de vie%2C comprendre](https://books.google.ca/books?id=g9S55CkIsOoC&printsec=frontcover&dq=analyse+du+cycle+de+vie,+comprendre+et+réaliser+un+écobilan&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwixqqzlrscAhXnpVkkKHcojA24Q6AEIKTAA#v=onepage&q=analyse%20du%20cycle%20de%20vie%20comprendre)
- Kuczynski, B. (2019). False confidence: are we ignoring significant sources of uncertainty? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01623-9>
- Lebègue, D. (2005). *Révision du taux d'actualisation des investissements publics* (Rapport du Groupe d'Experts). Commissariat général du plan.
- Maadi Group. (2015). Maadi Group » 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.
- MTMDET. (2015). *Rapport annuel de gestion*. Ministère des transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.
- MTMDET. (2016a). *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier*. Québec, Canada.
- MTMDET. (2016b). *Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier*. Retrieved from [www.transports.gouv.qc.ca](http://www.transports.gouv.qc.ca)
- MTMDET. (2018a). *Cahier des charges et devis généraux - Infrastructures routières - Construction et réparation*. Québec, Québec, Canada.
- MTMDET. (2018b). Liste des prix suggérés 2018 – Construction et réparation.
- MTMDET. (2018c). Liste des prix suggérés 2018 – Entretien préventif.
- MTMDET. (2018d). Liste des prix suggérés 2018 – Ponts acier-bois.
- MTMDET. (2018e). *Manuel de conception des structures*. Québec, Canada.
- Niemeijer, D., & De Groot, R. S. (2008). A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators*, (8).

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À  
PLATELAGE EN ALUMINIUM**

- <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.11.012>
- Paraskevas, D., Kellens, K., Van De Voorde, A., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2016). Environmental Impact Analysis of Primary Aluminium Production at Country Level. *Procedia CIRP*, 40, 209–213. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.01.104>
- Pizzol, M., Weidema, B., Brandão, M., & Osset, P. (2015). Monetary valuation in Life Cycle Assessment: a review. *Journal of Cleaner Production*, 86, 170–179. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.08.007>
- Positionnement de l'aluminium dans la construction des ponts au Canada : répertoire, problématique et stratégie.* (2008). Québec, Québec, Canada.
- Prince, R. (1997). *Evaluation of Field Tests Performed on an Aluminium Deck Bridge*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginie, États-Unis.
- Reuter, M. (2013). *Metal Recycling Opportunities, Limits, Infrastructure*. Retrieved from [https://www.wrforum.org/wp-content/uploads/2015/03/Metal-Recycling-Opportunities-Limits-Infrastructure-2013Metal\\_recycling.pdf](https://www.wrforum.org/wp-content/uploads/2015/03/Metal-Recycling-Opportunities-Limits-Infrastructure-2013Metal_recycling.pdf)
- Roy, C. (1999). *Évaluation du potentiel d'utilisation de l'aluminium dans les ouvrages d'art* (MSc). Université Laval.
- Siwowski, T. (2006). Aluminium Bridges – Past, Present and Future. *Structural Engineering International*, 16(4), 286–293. <https://doi.org/10.2749/101686606778995137>
- Tremblay, L. (2012, January). L'aluminium moins cher pour construire les ponts. *La Presse*.
- Vargel, C. (1999). *La corrosion de l'aluminium*. Paris, France: Dunod.
- Walbridge, S., & de la Chevrotière, A. (2012). Opportunities for the use of Aluminum in Vehicular Bridge Construction.
- Weidema, B. P. (2009). Using the budget constraint to monetarise impact assessment results. *Ecological Economics*, 68(6), 1591–1598. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2008.01.019>
- Weitzman, M. L. (1998). Why far-distant future should be discounted at its lowest possible rate. *Journal of Environmental Economics and Management*.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., ... Wernet wernet, G. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

***ANNEXE A***  
***SYNTHÈSE DE REVUE DE LITTÉRATURE ACV***

---

# ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

**Tableau A-1 Synthèse de la revue de littérature des ACV environnementales**

Articles	Lieu	Type	UF	Indicateurs	Détour	ACCV	Comparaison
(Daniel, 2003)	Pays-Bas	App.	Passerelle piétonne de 13.5 m pour 50 ans	\$, MJ, m <sup>3</sup> air, m <sup>3</sup> eau polluée	-	X	Acier, acier inoxydable, composite, aluminium, béton
(Itoh & Kitagawa, 2003)	Japon	Inn.	Pont routier 150 m x 12 m pour 100 ans	\$, CO <sub>2</sub> eq, MJ	-	X	Béton conventionnel, poutre optimisée
(Lounis & Daigle, 2004)	Canada	Inn.	Pont routier 35 m x 12.5m pour 30 ans	\$, CO <sub>2</sub> eq, déchets produits	X	X	Béton conventionnel, béton à haute performance
(Keoleian, Kendall, & Dettling, 2005)	USA	Inn.	Tablier de pont et ses joints pour 60 ans	\$, CO <sub>2</sub> eq, MJ	X	X	Béton précontraint, dalle à béton optimisé
(Kendall, Keoleian, Helfand, 2008)	USA	Inn.	Pont de 160 m pour 60 ans	\$, CO <sub>2</sub> eq, VOC	X	X	Béton conventionnel, dalle de béton alternatif optimisé
(Gervásio & da Silva, 2008)	Portugal	App.	Viaduc de 364.5 m x 14.9 m pour 50 ans	\$, CO <sub>2</sub> eq, MJ, matériaux	X	X	Béton précontraint, composite acier-béton
(MEEDDM, 2010)	France	App.	Pont en béton de 50 m	MJ, eau, aire, kg CO <sub>2</sub> eq, kg CFC, kg SO <sub>2</sub>	-	-	Pont en béton
(Rantala, 2010)	Finlande	App.	Pont de 20m x 7.5 m	\$, CO <sub>2</sub> eq, Sb eq., SO <sub>2</sub> , PO <sub>4</sub> , CFC-11, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	X	X	Porte à faux en béton armé, tablier de pont en béton armé, poutre de béton précontraint,
(Mara, Haghani, Sagemo, Storck, & Nilsson, 2011)	Suède	Inn.	Pont de 22m x 20m pour 100 ans	\$, CO <sub>2</sub> eq, dépliéon ozone, acidification terrestre, eutrophisation de l'eau, combustible fossile	X	X	Béton armé conventionnel, trois modèles de bétons armés avec polymère à fibre renforcée
(Zhang, Lin, Abududdin, & Canning, 2011)	UK	App.	Pont de 12 m pour 120 ans	CO <sub>2</sub> eq	X	-	Béton conventionnel, béton armé avec polymère à fibre renforcée
(Hammervold, Reenaas, & Bratbø, 2013)	Norvège	App.	1 m <sup>2</sup> pont pour 100 ans	CO <sub>2</sub> eq, acidification, eutrophisation de l'eau, dépliéon ozone, dépliéon abiotique	-	-	Acier, béton, arc en bois
(Du & Karoumi, 2013)	Suède	App.	Pont 373 ans pour 100 ans	CO <sub>2</sub> eq, toxicité humaine, Dépliéon ozone, oxydation photochimique, Particules fines, énergie	X	-	Béton armé et poutre d'acier en I
(Pang et al., 2015)	Chine	App.	1m de section de pont pour 100 ans	\$, HH, Eco, Ressources	X	X	4 différentes méthodes de renforcement structural
(Ozoban, 2017)	USA	App.	Structure de pont pour 100 ans	\$, énergie, CO <sub>2</sub> eq	-	X	Béton armé, béton armé avec polymère à fibre renforcée
(Penadés-Plà, Segura, Martí, & Yepes, 2018)	Espagne	Inn.	Pont de 40m pour 120 ans	\$, Santé humaine, Ressources, Qualité des écosystèmes	X	X	Béton précontraint et préfabriqué, béton précontraint et préfabriqué avec design optimisé
(O'Born, 2018)	Norvège	App.	Pont de 1650 m avec 4 voies pour 60 ans	CO <sub>2</sub> eq, dépliéon abiotique, acidification Eutrophisation, CO <sub>2</sub> eq, oxydation photochimique	-	-	Pont en bois et pont en béton

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

***ANNEXE B***  
***CALCULS DES COÛTS ASSOCIÉES AUX DÉTOURS***

---

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

### Considérations générales

Afin de calculer les coûts liés aux fermetures de route pendant les travaux, deux types de véhicules, et donc deux débits, sont considérés : véhicules légers ( $DJMA_V$ ) et camions ( $DJMA_C$ ). Toutes les formules des sections subséquentes sont donc à calculer pour ces deux débits tels que :

$$DJMA = DJMA_V + DJMA_C$$

Avec  $DJMA_C \equiv 7 \% * DJMA$

Enfin, on trouve un facteur 2 dans toutes les formules présentées dans les sections suivantes, car tous les ponts étudiés comportent 2 voies de circulation.

### Coûts liés à la perte de temps

Lorsque la route est entièrement fermée, cela occasionne un détour pour les usagers et par conséquent une perte de temps. Or, la perte de temps pour l'utilisateur correspond à une perte potentielle de productivité pour la société et génère ainsi un coût. La quantification de ce temps perdu par les usagers est basée sur le différentiel entre le temps pour compléter le détour et le temps de référence pour traverser le pont lorsque la route est ouverte.

Le calcul du coût associé à la perte de temps se réalise ainsi de la manière suivante :

$$\left( \frac{L_{détour}}{v_{détour}} - \frac{L_{pont}}{v_{normale}} \right) * 2 * DJMA * N * n * \alpha$$

Avec :

- $N$ , le nombre de jours de fermeture de route
- $n$ , le nombre d'occupants dans le véhicule
- $DJMA$ , le débit journalier moyen annuel par voie de circulation différencié selon le type de véhicules (débit de véhicules  $DJMA_V$  et débit de camion  $DJMA_C$ )
- $\alpha$ , valeur horaire du temps en \$ selon le type de véhicule, le motif du déplacement et le type d'occupants du véhicules (Tableau B-1) (Guide avantages-coûts MTQ)

Étant donné qu'un gain de temps pour les usagers est assimilable à un gain potentiel de productivité pour la société, la détermination de la valeur horaire du temps associée à un déplacement est basée sur le salaire médian. Un ajustement est ensuite effectué en fonction du motif du déplacement, du type d'utilisateur (conducteur ou passager) et du type de véhicule utilisé (véhicules légers ou camion). Par exemple le salaire médian est pondéré de 50% pour le motif de déplacement « autres » pour le conducteur et 35% pour les passagers.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**Tableau B-1 Valeurs horaires du temps ( $\alpha_i$ ) selon le type de véhicules**

<b>Déplacements - véhicules légers</b>	
Motif	Valeur horaire
<i>Affaires</i>	23,63\$
<i>Autres - conducteur</i>	13,52\$
<i>Autres - passagers</i>	9,50\$
<b>Déplacements - camion</b>	
Type	Valeur horaire
<i>Camion régulier</i>	48,58\$

Source : (Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routiers, 2016)

Il est stipulé dans le guide de l'analyse avantages-coûts que si l'on n'est pas en mesure de déterminer les motifs de déplacement il faut utiliser les facteurs d'agrégation suivants :

- Taux d'occupation moyen des véhicules au Québec 1,23 (1 conducteur pour 0,23 passager)
- 5% de déplacements pour « Affaires » et 95 % pour « Autres »
- 

**Coûts d'utilisation des véhicules**

Les coûts d'utilisation des véhicules correspondent aux coûts générés par l'utilisation des véhicules pour parcourir un kilomètre. Ces coûts incluent ainsi la consommation de carburant, l'usure des pneus, la dépréciation des véhicules (kilométrage) et varient selon la vitesse des véhicules et la distance qu'ils parcourent.

Or, lorsque la route est entièrement fermée, cela occasionne un détour pour les usagers et par conséquent une distance supplémentaire à parcourir génératrice de coûts d'utilisation supplémentaires. La quantification de ces coûts est basée sur le différentiel de distance parcourue entre la longueur du détour et la longueur de référence, c'est-à-dire la longueur du pont.

Les coûts sont ainsi calculés par les formules suivantes :

- Carburant :

$$(L_{détour} \cdot \beta(v_{détour}) - L_{pont} \cdot \beta(v_{normale})) * 2 * DJMA * N$$

Avec :

- N, le nombre de jours de construction
- $\beta(v)$ , coûts du carburant en fonction de la vitesse en \$/km (Tableau B-2) (Guide avantages-coûts MTQ)

- Dépréciation véhicules :

$$(L_{détour} - L_{pont}) * 2 * DJMA * N * \gamma$$

Avec :

- N, le nombre de jours de construction
- $\gamma$ , coûts en fonction de la distance pour la dépréciation, l'entretien et les pneus en \$/km (Tableau B-3) (Guide avantage-coûts MTQ)

L'utilisation des véhicules est caractérisée par deux types de paramètres. Le premier paramètre,  $\beta(v)$ , correspond au carburant utilisé par les véhicules en fonction de la vitesse et de la distance (Tableau B-2) tandis que le second paramètre,  $\gamma_i$ , correspond à la dépréciation du véhicule (dépréciation générale, entretien requis, pneus) et ne dépend que de la distance parcourue (Tableau B-3).

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**Tableau B-2 Coûts en fonction de la vitesse et de la distance (carburant) ( $\beta_i$ )**

Vitesse (km/h)	Véhicule léger [\$/km]	Camion régulier [\$/km]
5	0,423	1,369
10	0,285	0,789
15	0,237	0,624
20	0,214	0,550
25	0,200	0,504
30	0,190	0,476
35	0,183	0,452
40	0,177	0,433
45	0,174	0,424
50	0,171	0,412
55	0,170	0,392
60	0,169	0,381
65	0,168	0,372
70	0,167	0,365
75	0,167	0,358
80	0,166	0,351

**Tableau B-3 Coûts en fonction de la distance ( $\gamma_i$ )**

Vitesse (km/h)	Véhicule léger [\$/km]	Camion régulier [\$/km]
<b>Dépréciation</b>	0,05\$	0,05\$
<b>Entretien</b>	0,03\$	0,12\$
<b>Pneu</b>	0,02\$	0,04\$
<b>TOTAL</b>	0,11\$	0,21\$

**Coûts environnementaux**

Les coûts environnementaux correspondent aux coûts des émissions de différents polluants atmosphériques et des GES causés par la circulation routière. Ces coûts dépendent de la vitesse des véhicules et de la distance parcourue et s'estiment à partir des prix à la tonne attribué à chaque polluant en fonction principalement des dommages générés pour la santé humaine, la qualité des écosystèmes, le changement climatique, etc.

Ainsi, lorsque le trafic routier est détourné, les émissions augmentent et des coûts sont générés. La quantification de ces coûts est basée sur le différentiel de distance entre la longueur de détour et la longueur de référence.

Les coûts des polluants atmosphériques et des GES sont donnés à la tonne métrique et les taux d'émissions de ces mêmes polluants et des GES sont donnés en fonction du type de véhicule et de la vitesse du véhicule.

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**Tableau B-4 Taux moyen de polluants atmosphériques et d'émissions de GES - véhicules légers ( $t_{i,véhicules}$ )**

Vitesse (km/h)	Polluant (g/km)						
	GES	CO	HC	NOx	SOx	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
5	1085	4,872	0,44	0,301	0,01007	0,01753	0,01941
10	614	2,879	0,234	0,21	0,0057	0,01019	0,0113
15	449	2,18	0,161	0,174	0,00416	0,00742	0,00824
20	371	1,857	0,126	0,153	0,00344	0,0058	0,00644
25	321	1,659	0,104	0,136	0,00298	0,00461	0,00512
30	287	1,56	0,09	0,123	0,00266	0,00396	0,0044
35	263	1,478	0,08	0,117	0,00243	0,0036	0,004
40	245	1,411	0,073	0,115	0,00227	0,00346	0,00386
45	233	1,363	0,068	0,115	0,00216	0,0034	0,00379
50	224	1,323	0,063	0,115	0,00208	0,00335	0,00374
55	220	1,293	0,06	0,119	0,00204	0,00334	0,00372
60	216	1,269	0,058	0,121	0,002	0,00333	0,00371
65	213	1,248	0,056	0,124	0,00198	0,00332	0,00371
70	211	1,231	0,054	0,126	0,00196	0,00331	0,0037
75	208	1,217	0,053	0,127	0,00193	0,00329	0,00367
80	2085	1,208	0,051	0,127	0,0019	0,00323	0,00361

**Tableau B-5 Taux moyen de polluants atmosphériques et d'émissions de GES – camions réguliers ( $t_{i,camion}$ )**

Vitesse (km/h)	Polluant (g/km)						
	GES	CO	HC	NOx	SOx	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
5	4064	5,113	1,704	11,605	0,01409	0,64816	0,70459
10	2034	2,758	0,908	5,608	0,00707	0,3206	0,34851
15	1456	1,958	0,613	3,965	0,00506	0,21944	0,23855
20	1196	1,617	0,476	3,211	0,00416	0,17208	0,18706
25	1036	1,423	0,391	2,738	0,00361	0,14241	0,15481
30	936	1,317	0,341	2,431	0,00327	0,12546	0,13639
35	853	1,222	0,299	2,185	0,00298	0,11203	0,12179
40	785	1,136	0,264	1,987	0,00274	0,10138	0,1102
45	754	1,092	0,244	1,897	0,00264	0,09511	0,10339
50	712	1,034	0,225	1,789	0,00249	0,08866	0,09638
55	644	0,947	0,21	1,638	0,00226	0,0814	0,08849
60	603	0,895	0,197	1,541	0,00212	0,0767	0,08338
65	573	0,857	0,185	1,466	0,00193	0,07304	0,0794
70	548	0,826	0,175	1,405	0,00184	0,07008	0,07619
75	523	0,794	0,166	1,346	0,00176	0,06733	0,0732
80	498	0,762	0,157	1,288	0,00169	0,06476	0,07041

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

### Émissions atmosphériques

Pour les principaux polluants atmosphériques, monoxyde de carbone, hydrocarbures, oxydes d'azote, oxydes de soufre et particules fines, les coûts se calculent selon la formule suivante :

$$\left( L_{détour} \cdot \sum_i t_i(v_{détour}) \delta_i - L_{pont} \cdot \sum_i t_i(v_{normale}) \delta_i \right) * 2 * N * DJMA$$

Avec :

- N, le nombre de jours de construction
- $t_i(v)$ , taux d'émission du polluant atmosphérique  $i$  en fonction de la vitesse en g/km pour les véhicules (Tableau B-4) et pour les camions (
- 
- Tableau B-5).
- $\delta_i$ , coût du polluant atmosphérique  $i$  en \$/tonne métrique (Tableau B-6) (Guide avantages-coûts MTQ)
- $i$ , polluants CO, HC, NOx, SOx, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>

Le calcul est à réaliser pour les véhicules et les camions avec les DJMA respectifs.

**Tableau B-6 Coûts des polluants atmosphériques ( $\delta_i$ )**

	CO	HC	NOx	SOx	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
\$/tonne métrique	437	2008	14 786	17 151	213 696	85 482

### Gaz à effet de serre

Pour les GES – gaz carbonique, méthane et protoxyde d'azote – le principe de calcul est identique aux coûts des autres polluants atmosphériques excepté que le coût  $\delta$  des GES est dépendant de l'année. En effet, plus l'on avance dans le temps plus le coût à la tonne métrique des GES sera élevé puisque leurs effets sont cumulatifs (ex : réchauffement climatique).

Ainsi le calcul à réaliser est le suivant :

$$\left( L_{détour} \cdot t_{GES}(v_{détour}) \cdot \delta_{GES}(a_i) - L_{pont} \cdot t_{GES}(v_{normale}) \cdot \delta_{GES}(a_i) \right) * 2 * N * DJMA$$

Avec :

- N, le nombre de jours de construction
- $t_{GES}(v)$ , taux d'émission des GES en fonction de la vitesse en g/km (Tableau B-4 pour les véhicules et
- 
- Tableau B-5 pour les camions)
- $\delta_{GES}(a_i)$ , coûts des GES en \$/tonne métrique à l'année  $a_i$  (Tableau B-7) (Guide avantages-coûts MTQ)

Les prix des GES dépendent quant à eux de l'année, car l'effet des GES sur l'environnement est cumulatif. A partir de l'année 2045, le guide de l'analyse avantages-coûts ne fournit plus de valeurs pour les coûts des GES. Étant donné qu'une relation parfaitement linéaire a été utilisé pour calculer ces coûts, une extrapolation linéaire a été

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

faite pour estimer calculer les coûts associés jusqu'en 2093, soit l'année finale de l'étude. Le Tableau B-7 montre les valeurs utilisées.

**Tableau B-7 Coûts des émissions de GES ( $\delta_{GES}(a_i)$ )**

<b>Années</b>	<b>Coût</b>	<b>Années</b>	<b>Coût</b>	<b>Années</b>	<b>Coût</b>
2018	82,79\$	2045	173,55\$	2072	264,18\$
2019	86,15\$	2046	176,90\$	2073	267,53\$
2020	89,51\$	2047	180,26\$	2074	270,89\$
2021	92,86\$	2048	183,62\$	2075	274,25\$
2022	96,22\$	2049	186,97\$	2076	277,60\$
2023	99,58\$	2050	190,33\$	2077	280,96\$
2024	102,93\$	2051	193,69\$	2078	284,31\$
2025	106,29\$	2052	197,04\$	2079	287,67\$
2026	109,65\$	2053	200,40\$	2080	291,03\$
2027	113,00\$	2054	203,76\$	2081	294,38\$
2028	116,36\$	2055	207,11\$	2082	297,74\$
2029	119,72\$	2056	210,47\$	2083	301,10\$
2030	123,07\$	2057	213,83\$	2084	304,45\$
2031	126,43\$	2058	217,18\$	2085	307,81\$
2032	129,79\$	2059	220,54\$	2086	311,17\$
2033	133,14\$	2060	223,90\$	2087	314,52\$
2034	136,50\$	2061	227,25\$	2088	317,88\$
2035	139,86\$	2062	230,61\$	2089	321,24\$
2036	143,21\$	2063	233,97\$	2090	324,59\$
2037	146,57\$	2064	237,32\$	2091	327,95\$
2038	149,93\$	2065	240,68\$	2092	331,31\$
2039	153,28\$	2066	244,04\$	2093	334,66\$
2040	156,64\$	2067	247,39\$		
2041	159,99\$	2068	250,75\$		
2042	163,35\$	2069	254,11\$		
2043	166,71\$	2070	257,46\$		
2044	170,06\$	2071	260,82\$		

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

***ANNEXE C***  
***FLUX ET PROCESSUS UTILISÉS EN ACV***

---

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

Les noms exacts des flux et des processus d'ecoinvent3.3 en anglais, ont été conservés dans les tableaux suivants par souci de transparence

**Tableau C-1 Flux et processus utilisés en ACV - Tablier bois acier - Milieu rural**

ÉTAPE	FLUX	FLUX - OPENLCA	PROCESSUS - OPEN LCA	QUANTITÉ	UNITÉ	
PÉRIMÈTRE 1	Structure	Acier 350 WT	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	22778	kg
		Métallisation	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	288	m^2
		Laminage	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	22778	kg
		Soudure	welding, arc, steel	welding, arc, steel   welding, arc, steel   cut-off, U - CA-QC	460	m
	Dalle	Traverse+Madrier	sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed	planing, beam, hardwood, u=10%   sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed   cut-off, S - CA-QC	30.7	m^3
		Traitement bois	wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact	market for wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   cut-off, S - GLO	276	kg
		Bois	sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed	planing, beam, hardwood, u=10%   sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed   cut-off, S - CA-QC	2.32	m^3
		Traitement bois	wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact	market for wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   cut-off, S - GLO	21	kg
	Système de retenue	Lisse - Acier 350WT	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	409	kg
		Métallisation	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	40	m^2
		Travail acier	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	409	kg
	Transport	Transport gate to site	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	9923	tkm
	Travaux de construction	Équipements légers	machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   cut-off, S - GLO	84	h
		Équipement moyen	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, steady-state   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, steady-state   cut-off, S - GLO	42	h
Équipement puissant		machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	14	h	
PÉRIMÈTRE 2	Matériaux entretien	Acier 350 WT structure	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	22778	kg
		Métallisation	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	288	m^2
		Laminage	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	22778	kg
		Soudure	welding, arc, steel	welding, arc, steel   welding, arc, steel   cut-off, U - CA-QC	460	m
	Matériaux entretien	Bois	sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed	planing, beam, hardwood, u=10%   sawnwood, beam, hardwood, dried (u=10%), planed   cut-off, S - CA-QC	91	m^3
		Traitement bois	wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact	market for wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact   cut-off, S - GLO	820	kg
		Peinturage	peinture	Peinture	69	kg
		Acier ret	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	817	kg
	Transport	Travail métal ret	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	817	kg
		Métallisation	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	80	m^2
		Transport usine et chantier	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	44490	tkm
		Petit équipement	machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   cut-off, S - GLO	204	h
	Travaux de construction	Moyen équipement	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	78	h
		Gros équipement	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	16	h
Fin de vie	Bois incinéré	waste building wood, chrome preserved	treatment of waste building wood, chrome preserved, municipal incineration   waste building wood, chrome preserved   cut-off, S - RoW	55840	kg	
	Bois enfouis	waste wood, untreated	treatment of waste wood, untreated, sanitary landfill   waste wood, untreated   cut-off, S - RoW	6204	kg	

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

PÉRIMÈTRE 3	Détournement trafic	Flux	Processus	Quantité	Unité
		Gaz naturel évité	heat, district or industrial, other than natural gas	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW   heat, district or industrial, other than natural gas   cut-off, S - CA-QC	893
Peinture	waste paint on metal	market for waste paint on metal   waste paint on metal   cut-off, S - RoW	69	kg	
Acier enfoui	scrap steel	treatment of scrap steel, inert material landfill   scrap steel   cut-off, S - RoW	4678	kg	
Acier trié	iron scrap, sorted, pressed	market for iron scrap, sorted, pressed   iron scrap, sorted, pressed   cut-off, S - GLO	42104	kg	
Acier recyclé	cast iron	cast iron production   cast iron   cut-off, U - Recyc - RoW	42104	kg	
Acier évité	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	38103	kg	
Voiture combustion	transport, passenger car with internal combustion engine	market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	18228	km	
Camion	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	10427	tkm	
Voiture combustion	transport, passenger car with internal combustion engine	market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	62145	km	
Camion	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	35550	tkm	

**Tableau C-2 Flux et processus utilisés en ACV - Tablier à platelage en aluminium - Milieu rural**

	ÉTAPE	FLUX	FLUX - OPENLCA	PROCESSUS - OPEN LCA	QUANTITÉ	UNITÉ
PÉRIMÈTRE 1	Structure	Poutre Acier 350 WT	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	19338	kg
		Métallisation	zinc coat, pieces	market for zinc coat, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, S - GLO	262	m <sup>2</sup>
		Laminage	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	19338	kg
		Soudure	welding, arc, steel	welding, arc, steel   welding, arc, steel   cut-off, U - CA-QC	320	m
	Dalle	Aluminium	aluminium, primary, ingot	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   cut-off, S - CA-QC	16000	kg
		Extrusion	section bar extrusion, aluminium	section bar extrusion, aluminium   section bar extrusion, aluminium   cut-off, U - CA-QC	16000	kg
		Boulons	steel, low-alloyed	market for steel, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - GLO	276.8	kg
	Revêtement	Travail acier	metal working, average for steel product manufacturing	market for metal working, average for steel product manufacturing   metal working, average for steel product manufacturing   cut-off, S - GLO	276.8	kg
		BimaGrip	Bimagrip	Bimagrip LS	1846	kg
	Système de retenue	Dispositif retenu alu	aluminium, primary, ingot	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   cut-off, S - CA-QC	733.36	kg
		Extrusion dispositif	section bar extrusion, aluminium	section bar extrusion, aluminium   section bar extrusion, aluminium   cut-off, U - CA-QC	733.36	kg
		Lisse acier masse	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	408.64	kg
		Lisse acier surface	zinc coat, pieces	market for zinc coat, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, S - GLO	24.3	m <sup>2</sup>
		Travail acier	metal working, average for steel product manufacturing	metal working, average for steel product manufacturing   metal working, average for steel product manufacturing   cut-off, S - RoW	408.64	kg
	Transport	transport gate to site	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	14727.2	tkm
Travaux de construction	Équipement léger	machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   cut-off, S - GLO	120	h	
	Équipement moyen	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	60	h	
	Équipement puissant	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	20	h	
PÉRIMÈTRE 2	Matériaux entretien	Bimagrip LS	Bimagrip LS	Bimagrip LS	3692	kg
		Acier boulon	steel, low-alloyed	market for steel, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - GLO	511.2	kg
	Transport	Transport	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	21905.3	tkm

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

PÉRIMÈTRE 3	Travaux de construction	Petit équipement	machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	36	h
		Moyen équipement	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	6	h
		Gros équipement	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	0	h
	Fin de vie	Acier enfouis	scrap steel	treatment of scrap steel, inert material landfill   scrap steel   cut-off, S - RoW	2053.46	kg
		Acier trié	iron scrap, sorted, pressed	market for iron scrap, sorted, pressed   iron scrap, sorted, pressed   cut-off, S - GLO	18481.2	kg
		Acier recyclé	cast iron	cast iron production   cast iron   cut-off, U - Recyc - RoW	18481.2	kg
		Acier évité	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	16725	kg
		Bimagrip enfoui	inert waste	treatment of inert waste, sanitary landfill   inert waste   cut-off, S - RoW	5538	kg
		Aluminium enfoui	waste aluminium	treatment of waste aluminium, sanitary landfill   waste aluminium   cut-off, S - RoW	1673.34	kg
		Aluminium trié	aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing   aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting   cut-off, S - RoW	15060	kg
		Aluminium recyclé	aluminium, cast alloy	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner   aluminium, cast alloy   cut-off, S - RoW	12048	kg
		Aluminium évité	aluminium, primary, ingot	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   cut-off, S - CA-QC	11697.1	kg
	Détournement trafic	Voiture combustion	transport, passenger car with internal combustion engine	market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	26040	km
Camion		transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	14896	tkm	
Voiture combustion		transport, passenger car with internal combustion engine	market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	24752.6	km	
Camion		transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	14159.5	tkm	

**Tableau C-3 Flux et processus utilisés en ACV - Tablier à dalle de béton - Milieu urbain**

	ÉTAPE	FLUX	FLUX - OPENLCA	PROCESSUS - OPEN LCA	QUANTITÉ	UNITÉ
PÉRIMÈTRE 1	Structure	struct Acier 350 WT	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	22778	kg
		Métallisation	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	288	m <sup>2</sup>
		Laminage	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	22778	kg
		Soudure	welding, arc, steel	welding, arc, steel   welding, arc, steel   cut-off, U - CA-QC	320	m
	Dalle	Béton	concrete, 35MPa	concrete production 35MPa, RNA only   concrete, 35MPa   cut-off, S - CA-QC	51.1	m <sup>3</sup>
		acier - armature	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	11546	kg
	Revêtement	laminage - armature	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	11546	kg
		Enrobé bitumineux	bitumen adhesive compound, hot	market for bitumen adhesive compound, hot   bitumen adhesive compound, hot   cut-off, S - GLO	36780	kg
	Système de retenue	Béton chasse-roue	concrete, 35MPa	concrete production 35MPa, RNA only   concrete, 35MPa   cut-off, S - CA-QC	5.04	m <sup>3</sup>
		Acier garde fous	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	4451.78	kg
		Travail acier garde-fou	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	4451.78	kg
	Transport	Acier métallisation	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	40.0464	m <sup>3</sup>
		Transport gate to site	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	30701.7	tkm
	Travaux de construction	Petit équipement	machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	504	h
		Moyen équipement	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	252	h
Gros équipement		machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	84	h	
PÉRIMÈTRE 2	Matériaux entretien	Remplacement enrobé	bitumen adhesive compound, hot	market for bitumen adhesive compound, hot   bitumen adhesive compound, hot   cut-off, S - GLO	183900	kg
		remplacement	concrete, 35MPa	concrete production 35MPa, RNA only   concrete, 35MPa	66.36	m <sup>3</sup>

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

	ÉTAPE	FLUX	FLUX - OPENLCA	PROCESSUS - OPEN LCA	QUANTITÉ	UNITÉ	
							PROCESSEUR
PÉRIMÈTRE 3	Transport	béton		cut-off, S - CA-QC			
		Peinture			0	0	0
		Remplacement acier	steel, low-alloyed		hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	15997.8	kg
		Surface acier remplacé	zinc coat, pieces		zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	40.0464	m <sup>2</sup>
		Travail d'acier	hot rolling, steel		hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	15997.8	kg
		Transport entre usine chantier	transport, freight, lorry, unspecified		market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	136459	tkm
	Travaux de construction	Petit équipement	machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor		market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	996	h
		Moyen équipement	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor		market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	498	h
		Gros équipement	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor		market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	0	h
	Fin de vie	Acier enfoui	scrap steel		treatment of scrap steel, inert material landfill   scrap steel   cut-off, S - RoW	5477.36	kg
		Acier trié	iron scrap, sorted, pressed		market for iron scrap, sorted, pressed   iron scrap, sorted, pressed   cut-off, S - GLO	49296.2	kg
		Acier recyclé	cast iron		cast iron production   cast iron   cut-off, U - Recyc - RoW	49296.2	kg
		Acier évité	steel, low-alloyed		steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	44612	kg
		Peinture	waste paint on metal		market for waste paint on metal   waste paint on metal   cut-off, S - RoW	69.12	kg
		Béton enfoui	inert waste		treatment of inert waste, sanitary landfill   inert waste   cut-off, S - RoW	281750	kg
	Détournement trafic	Enrobé enfoui	inert waste		treatment of inert waste, sanitary landfill   inert waste   cut-off, S - RoW	220680	kg
		Voiture combustion	transport, passenger car with internal combustion engine		market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	4882500	km
		Camion	transport, freight, lorry, unspecified		market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	3491250	tkm
Voiture combustion		transport, passenger car with internal combustion engine		market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	1.5E+07	km	
Camion		transport, freight, lorry, unspecified		market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	1E+07	tkm	

**Tableau C-4 Flux et processus utilisés en ACV - Tablier à platelage en aluminium - Milieu urbain**

	ÉTAPE	FLUX	FLUX - OPENLCA	PROCESSUS - OPEN LCA	QUANTITÉ	UNITÉ
PÉRIMÈTRE 1	Structure	Poutre Acier 350 WT	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	19338	kg
		Métallisation	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	262	m <sup>2</sup>
		Laminage	hot rolling, steel	hot rolling, steel   hot rolling, steel   cut-off, U - CA-QC	19338	kg
		Soudure	welding, arc, steel	welding, arc, steel   welding, arc, steel   cut-off, U - CA-QC	320	m
	Dalle	Aluminium	aluminium, primary, ingot	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   cut-off, S - CA-QC	24000	kg
		Extrusion	section bar extrusion, aluminium	section bar extrusion, aluminium   section bar extrusion, aluminium   cut-off, U - CA-QC	24000	kg
		Boulons	steel, low-alloyed	market for steel, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - GLO	277	kg
		Travail acier	metal working, average for steel product manufacturing	metal working, average for steel product manufacturing   metal working, average for steel product manufacturing   cut-off, S - RoW	277	kg
	Revêtement	BimaGrip	Bimagrip	Bimagrip LS	3169	kg
	Système de retenue	Lisse acier masse	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	4452	kg
		Lisse acier surface	zinc coat, pieces	zinc coating, pieces   zinc coat, pieces   cut-off, U - CA-QC	40	m <sup>2</sup>
		Travail acier	metal working, average for steel product manufacturing	market for metal working, average for steel product manufacturing   metal working, average for steel product manufacturing   cut-off, S - GLO	4452	kg
	Transport	Transport entre usine chantier	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	16718	tkm
	Travaux de construction	Petit équipement	machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	120	km

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

	Moyen équipement	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	60	km	
	Gros équipement	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	20	tkm	
PÉRIMÈTRE 2	Matériaux entretien	BimaGrip	Bimagrip	Bimagrip LS	6339	kg
		Acier boulon	steel, low-alloyed	market for steel, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - GLO	511	kg
		Travail acier	metal working, average for steel product manufacturing	metal working, average for steel product manufacturing   metal working, average for steel product manufacturing   cut-off, S - RoW	511	kg
	Transport	Transport entre usine chantier	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	27806	tkm
		Petit équipement	machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   machine operation, diesel, < 18.64 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	36	h
	Travaux de construction	Moyen équipement	machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	6	h
		Gros équipement	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   cut-off, S - GLO	0	h
	Fin de vie	Acier enfouis	scrap steel	treatment of scrap steel, inert material landfill   scrap steel   cut-off, S - RoW	2458	kg
		Acier trié	iron scrap, sorted, pressed	market for iron scrap, sorted, pressed   iron scrap, sorted, pressed   cut-off, S - GLO	0	0
		Acier recyclé	cast iron	cast iron production   cast iron   cut-off, U - Recyc - RoW	0	0
		Acier évité	steel, low-alloyed	steel production, electric, low-alloyed   steel, low-alloyed   cut-off, S - CA-QC	20018	kg
		Bimagrip enfoui	inert waste	treatment of inert waste, sanitary landfill   inert waste   cut-off, S - RoW	9508	kg
		Aluminium enfoui	waste aluminium	treatment of waste aluminium, sanitary landfill   waste aluminium   cut-off, S - RoW	2400	kg
		Aluminium trié	aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing   aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting   cut-off, S - RoW	21600	kg
		Aluminium recyclé	aluminium, cast alloy	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner   aluminium, cast alloy   cut-off, S - RoW	17280	kg
		Aluminium évité	aluminium, primary, ingot	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   cut-off, S - CA-QC	16777	kg
PÉRIMÈTRE 3	Déviation trafic	Voiture combustion	transport, passenger car with internal combustion engine	market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	1162500	km
		Camion	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	831250	tkm
		Voiture combustion	transport, passenger car with internal combustion engine	market for transport, passenger car with internal combustion engine   transport, passenger car with internal combustion engine   cut-off, S - RoW	1105025	km
		Camion	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	790152	tkm

**Tableau C-5 Flux et processus utilisés en ACV - Culées**

	FLUX	FLUX - OPENLCA	PROCESSUS - OPEN LCA	QUANTITÉ	UNITÉ
CULÉE	Quantité béton	Concrete, 25 MPA	concrete production 25MPa, RNA only   concrete, 25MPa   cut-off, S - CA-QC	46.5	m <sup>3</sup>
	Petit équipement	machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state	market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   cut-off, S - GLO	140	h
	Transport	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   cut-off, S - GLO	42780	tkm
	Enfouissement béton	waste concrete	market for waste concrete   waste concrete   cut-off, S - RoW	106950	m <sup>3</sup>

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

***ANNEXE D***  
***ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES***

---

## ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM

L'évaluation de la qualité des données se fait selon 3 critères : la fiabilité, la représentativité et la contribution. La fiabilité concerne les sources, les méthodes d'acquisition et les procédures de quantification des flux. La représentativité, quant à elle, traite des corrélations géographiques et technologiques des processus utilisés à la modélisation du système. Finalement, la contribution permet d'évaluer si la donnée évaluée a une grande influence sur les résultats. Le Tableau D-1, explicite les critères de qualification des trois critères alors que le Tableau D-2 regroupe l'évaluation de la qualité pour chacun des flux évalués.

**Tableau D-1 Critère de qualification des données selon la fiabilité, la représentativité et la contribution**

<b>Pointage</b>	<b>Critères d'évaluation de la fiabilité des données (quantité)</b>
1	Données vérifiées, mesurées ou calculées sur le terrain
2	Données vérifiées, en partie issues d'hypothèse
3	Données non vérifiées, en partie issus d'hypothèses ou estimation de qualité (par un expert)
4	Données estimées de façon grossière
<b>Pointage</b>	<b>Critères d'évaluation de la représentativité des données (processus)</b>
1	Donnée de terrain ou de laboratoire
2	Bonne représentativité géographiques et/ou technologique du processus sélectionné
3	Données relatives au même procédé, mais se référant à une technologie différente
4	Représentativité géographique et/ou technologique inadéquate
<b>Pointage</b>	<b>Critère de contribution</b>
1	0-5 % - Contribution potentiellement faible ou négligeable
2	6-10% - Contribution potentiellement influente
3	11-50% - Forte contribution potentielle
4	51-100% - Très forte contribution potentielle

La somme du score des trois critères donne un indicateur entre 3 et 12 sur la qualité de la donnée utilisée. À partir de ce score, un niveau de qualité est octroyé à la donnée selon les critères montrés au Tableau D-2.

**Tableau D-2 Qualification de la qualité de la donnée**

<b>Qualité de la donnée</b>	<b>Intervalle du score de qualité</b>
Très bonne	3-4
Bonne	5-6
Faible	7-9
Très faible	10-12

**ANALYSE DU COÛT TOTAL DE POSSESSION SUR LE CYCLE DE VIE D'UN PONT  
ROUTIER À PLATELAGE EN ALUMINIUM**

**Tableau D-3 Evaluation et qualification des qualités des données**

<b>Procédé</b>	<b>Fiabilité</b>	<b>Représen- tativité</b>	<b>Contribution</b>	<b>Total</b>	<b>Qualité de la donnée</b>
Production d'acier	1	2	3	6	Bonne
Métallisation	2	3	1	6	Bonne
Laminage	2	3	1	6	Bonne
Soudure	2	3	1	6	Bonne
Travail d'acier	2	3	1	6	Bonne
Bois	1	2	2	5	Bonne
Traitement du bois	2	2	1	5	Bonne
Aluminium	1	1	3	5	Bonne
Extrusion d'aluminium	1	3	1	5	Bonne
BimaGrip	1	4	1	6	Bonne
Peinture	3	3	1	7	Faible
Béton	1	1	2	4	Très bonne
Enrobé bitumineux	1	1	2	4	Très bonne
Transport	3	2	2	7	Faible
Équipement mécanisé	4	3	1	8	Faible
Tri de la ferraille d'acier	3	3	1	7	Faible
Tri de l'aluminium	3	3	1	7	Faible
Recyclage de l'acier	3	3	2	8	Faible
Recyclage d'aluminium	3	3	2	8	Faible
Enfouissement	2	2	1	5	Bonne
Détournement voiture	2	3	3-4	8-9	Faible
Détournement camion	2	3	3-4	8-9	Faible